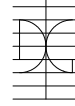




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CON-  
STRUCCIÓN Y DE PROYECTOS DE INGENIERÍA  
CIVIL

# **OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MULTIOBJETIVO DE CIMENTACIONES DE SOPORTES EN MEDIANERÍA.**

Autor: Carlos Cano Pérez

Director: Antonio Hospitaler Pérez

Valencia, Septiembre 2015.



## **RESUMEN.**

El objetivo fundamental de la presente Tesis es la aplicación de un algoritmo de optimización heurístico adecuado, que permita localizar soluciones óptimas al problema estructural consistente en la cimentación de dos soportes enfrentados, cuando uno de ellos se sitúa en una medianería, y por tanto, tiene impedida en una dirección la disposición de su cimientto.

Dado que existen diversos modelos estructurales que permiten solucionar el problema, se ha seleccionado entre ellos, los más habitualmente utilizados en la práctica actual. Los modelos estructurales finalmente seleccionados han sido los constituidos por zapatas aisladas, zapata combinada de ancho constante, zapata combinada asimétrica y zapata excéntrica con viga riostra.

También se ha podido confirmar la existencia de diversos modelos de análisis para la solución del problema, incuyéndose en la tesis tanto el modelo más sencillo de análisis, utilizado habitualmente en la práctica profesional, como un modelo más complejo que denominaremos, modelo elástico simplificado. El primero de ellos será el denominado ‘Cimiento Rígido’, donde se partirá de la premisa de un comportamiento rígido del cimientto, lo que implicará la suposición de que presión transmitida al terreno sigue una distribución lineal. Por otro lado, se analizará también un modelo de análisis que no limitará el comportamiento del cimientto únicamente al caso de cimientto rígido, modelizando el terreno mediante muelles a través del denominado ‘Módulo de Balasto’.

Como objetivo adicional de la tesis se establecerá el poder determinar el modelo estructural y el modelo de análisis más adecuado para la resolución del problema y determinar las diferencias con el resto de modelos usualmente utilizados.

Otro de los objetivos de la tesis será el de poder evaluar distintas funciones objetivo, de forma que se pueda evaluar el óptimo de una solución desde el punto de vista económico, medioambiental y de facilidad constructiva. De la revisión bibliográfica realizada, se ha podido constatar la existencia de numerosos estudios de optimización realizados en busca de óptimos económicos (coste de la solución, peso de la solución) y desde el punto de vista medioambiental (emisiones de CO<sub>2</sub>, consumo de energía, peso de la solución). Desde el punto de vista de la facilidad constructiva de la solución, los estudios realizados son menores, incluyéndose parámetros de ‘Uniformidad de Armado, Número de barras de armado o número de tipo de barras distintos’. En la presente tesis se evaluarán todas estas funciones objetivo, incorporándose como funciones de tipo medioambiental, el estudio de consumo de agua de los materiales constituyentes de la solución y desde el punto de vista de la facilidad constructiva, la relación Perímetro/Área y el parámetro Diámetro Medio de la solución, que se definirán más tarde.

Otro de los objetivos establecidos para la tesis ha sido el de poder comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo de Simulated Annealing, con los resultados que se hubieran obtenido en la práctica profesional habitual, siguiendo los procesos habituales de cálculo estructural. Para ello, se desarrolla un ejemplo de cálculo de zapata en medianería incluido en el libro “Cálculo de estructuras de cimentación” Edición 4, de Calavera, comparando los valores de las funciones objetivo de la solución aportada en el libro, con las alcanzadas tras la aplicación del algoritmo de optimización de SA y las conseguidas tras el uso de un software de cálculo estructural ampliamente utilizado en la práctica, como es ‘Cypecad ver 2014’.

Por último, el objetivo final de la tesis ha sido la realización de un estudio paramétrico, que permita aportar las soluciones óptimas de un amplio abanico de configuraciones del problema en estudio, de forma que se permita a los diseñadores poder disponer de criterios básicos iniciales de predimensionado, con los que poder determinar entre los mejores modelos estructurales para cada situación, desde el punto de vista económico, medioambiental o de facilidad constructiva.

## **SUMMARY.**

The main goal of this Thesis is the application of a suitable heuristic optimization algorithm that allows finding optimal solutions to the structural problem of faced brackets foundation, when one of them is located in a sharecropping, and therefore, the disposition of its foundation is prevented in one direction.

Since there are various structural models to solve the problem, it is the most commonly used in current practice. Isolated footings, constant width combined footing, asymmetrical combined footing, and beam brace eccentric shoe are the structural models finally selected.

Also, it has been confirmed the existence of various analytical models to solve the problem. Included in this Thesis is the simplest analysis model, commonly used in professional practice, and a more complex model that we call elastic simplified method. The first is the named "Rigid foundation", which is based on the premise of a rigid behavior foundation. This implies the assumption of a linear distribution of the pressure transmitted to the ground. On the other hand, it will also analyze a model of analysis that does not limit the performance of the foundation only to the case of rigid foundation, modeling the terrain with springs through the so-called 'subgrade reaction'.

As a further aim of the Thesis, is to determine the structural model and the most suitable analysis model for solving the problem and determine the differences with other commonly used models.

Another objective of the thesis will be to evaluate the different objective functions, so that they may assess the optimal solution in terms of economic, environmental and ease of construction. From the literature review, it has noted the existence of numerous optimization studies conducted in search of economic optimum (cost of the solution, solution weight) and from the environmental point of view (CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, solution weight). From the standpoint of ease of construction of the solution, studies are lower, including parameters 'Armed uniformity, number of reinforcing bars or number of different bar types'. In this Thesis all these objective functions will be evaluated, incorporating environmental features such as the study of water consumption of the constituent materials and from the point of view of ease of construction, the perimeter / area ratio and the parameter average diameter of the solution, which will be defined later.

Another of the objectives set for the thesis has been to be able to compare the results obtained by applying the "Simulated Annealing" algorithm, with the results that have been obtained in routine practice, following the usual process of structural calculation. A sample calculation in joint shoe is included in the book "Cálculo de estructuras de cimentación" 4<sup>th</sup> edition from Calavera, comparing the values of objective functions of the solution provided in the book, with those achieved after application of optimization

SA algorithm and those collected after using a structural calculation software widely used in practice, as is “Cypecad ver 2014”.

Finally, the ultimate goal of the thesis has been conducting a parametric study that allows providing the optimal solutions for a wide range of the problem under study configurations, so that designers are allowed to have initial basic criteria for presizing, with which to determine structural models among the best for every situation, from an economic, environmental or ease of construction point of view.

## **RESUM.**

L'objectiu fonamental de la present Tesi és l'aplicació d'un algoritme d'optimització heurístic adequat, que permeta localitzar solucions òptimes al problema estructural consistent en la fonamentació de dos suports enfrontats, quan un d'ells se situa en una paret mitgera, i per tant, té impedida en una direcció la disposició del seu fonament. Atés que hi ha diversos models estructurals que permeten solucionar el problema, s'ha seleccionat entre ells, els més habitualment utilitzats en la pràctica. Els models estructurals finalment seleccionats han sigut els constituïts per zapatas aïllades, zapata combinada d'ample constant, zapata combinada asimètrica i zapata excèntrica amb biga riostra.

També s'ha pogut confirmar l'existència de diversos models d'anàlisi per a la solució del problema, incuyéndose en la tesi tant el model més senzill d'anàlisi, utilitzat habitualment en la pràctica professional, com un model més complex que denominarem, model elàstic simplificat. El primer d'ells serà el denominat 'Cimiento Rígido', on es partirà de la premissa d'un comportament rígid del fonament, la qual cosa implicarà la suposició que pressió transmesa al terreny segueix una distribució lineal. D'altra banda, s'analitzarà també un model d'anàlisi que no limitarà el comportament del fonament únicament al cas de fonament rígid, modelizando el terreny per mitjà de molls a través del denominat 'Módulo de Balasto'.

Com a objectiu addicional de la tesi s'establirà el poder determinar el model estructural i el model d'anàlisi més adequat per a la resolució del problema i determinar les diferències amb la resta de models usualment utilitzats.

Un altre dels objectius de la tesi sera el de poder avaluar distintes funcions objectiu, de manera que es puga avaluar l'òptim d'una solució des del punt de vista econòmic, mediambiental i de facilitat constructiva. De la revisió bibliogràfica realitzada, s'ha pogut constatar l'existència de nombrosos estudis d'optimització realitzats a la cerca d'òptims econòmics (cost de la solució, pes de la solució) i des del punt de vista mediambiental (emissions de CO<sub>2</sub>, consum d'energia, pes de la solució). Des del punt de vista de la facilitat constructiva de la solució, els estudis realitzats són menors, incloent-se paràmetres de 'Uniformidad d'Armat, nombre de barres d'armat o nombre de tipus de barres distintos'. En la present tesi s'avaluaren totes estàs funciones objectiu, incorporant-se com funciones de tipus mediambiental, l'estudi de consum d'aigua dels materials constituents de la solució i des del punt de vista de la facilitat constructiva, la relació Perímetro/ Àrea i el paràmetre Diàmetre Mitjà de la solució, que es definirà més tard.

Un altre dels objectius establits per a la tesi ha sigut el de poder comparar els resultats obtinguts per mitjà de l'aplicació de l'algoritme de Simulated Annealing, amb els resultats que s'hagueren obtingut en la pràctica professional habitual, seguint els processos habituals de càlcul estructural. Per a això, es desenrotlla un exemple de càlcul de zapata

en paret mitgera inclòs en el llibre "Cálculo d'estructures de cimentacion" Edició 4, de Calavera, comparant els valors de les funcions objectiu de la solució aportada en el llibre, amb les aconseguides després de l'aplicació de l'algoritme d'optimització de SA i les aconseguides després de l'ús d'un programari de càlcul estructural àmpliament utilitzat en la pràctica, com és 'Cypecad ver 2014'

Finalment, l'objectiu final de la tesi ha sigut la realització d'un estudi paramètric, que permeta aportar la solucions òptimes d'un ampli espectre de configuracions del problema en estudi, de manera que es permeta als dissenyadors poder disposar de criteris bàsics de predimensionat, amb els que poder determinar entre els millors models estructurals per a cada situació, des del punt de vista econòmic, mediambiental o de facilitat constructiva



**INDICE:**

<b>1</b>	<b>Introducción a las Cimentaciones de Medianería.</b>	<b>22</b>
1.1	<i>Introducción.</i>	22
1.2	<i>Historia de las cimentaciones de medianería.</i>	25
1.3	<i>Criterios de diseño para optimización de cimientos.</i>	74
1.4	<i>Estructura del trabajo.</i>	76
1.5	<i>Referencias bibliográficas.</i>	77
<b>2</b>	<b>Objetivos del trabajo.</b>	<b>79</b>
2.1	<i>Introducción.</i>	79
<b>3</b>	<b>Definición del problema de Optimización.</b>	<b>81</b>
3.1	<i>Introducción.</i>	81
3.2	<i>Descripción del problema en estudio. Modelos de cálculo.</i>	83
3.2.1	Modelo 1: Zapatas Aisladas.	83
3.2.2	Modelo 2: Zapata Excéntrica con viga centradora de ancho constante.	83
3.2.3	Modelos 3, 4 y 5: Zapata Combinada.	83
3.2.3.1	Modelo 3: (Configuración 1): Zapata combinada asimétrica.	83
3.2.3.2	Modelo 4: (Configuración 2): Zapata combinada asimétrica.	84
3.2.3.3	Modelo 5: Zapata combinada de ancho constante.	84
3.3	<i>Parámetros de partida.</i>	84
3.3.1	Parámetros Geométricos.	84
3.3.2	Parámetros del terreno.	85
3.3.3	Parámetros relativos a los esfuerzos actuantes.	85
3.3.4	Combinaciones de las acciones.	86
3.3.5	Costes unitarios.	87
3.4	<i>Variables del problema.</i>	89
3.4.1	Variables de Primer Orden:	89
3.4.1.1	Variables Geométricas:	89
3.4.2	Variables relativas a los materiales:	92
3.4.3	Variables de Armado:	92
3.4.3.1	Variables de armado de primer orden.	93
3.4.3.2	Variables de armado de segundo orden:	94
3.5	<i>Funciones Objetivo.</i>	96
3.5.1	Función de Evaluación del 'Coste Económico'.	96
3.5.2	Funciones de Evaluación del 'Coste Medioambiental'.	99

3.5.2.1	Función Objetivo 'Emisión de CO <sub>2</sub> (kg)':	100
3.5.2.2	Función Objetivo 'Energía Consumida, (MJ)':	101
3.5.2.3	Función Objetivo 'Peso de la Solución, (kg)':	102
3.5.2.4	Función Objetivo 'Consumo de agua (kg)':	105
3.5.3	Funciones de Evaluación de la 'Constructibilidad':	105
3.5.3.1	Función Objetivo 'Relación Perímetro / Área, (mm <sup>-1</sup> )':	106
3.5.3.2	Función Objetivo 'Número de Barras':	106
3.5.3.3	Función Objetivo 'Número de Tipos de Barras distintos':	107
3.5.3.4	Función Objetivo 'Diámetro Medio Equivalente':	107
3.5.3.5	Función Objetivo 'Uniformidad de Armado':	108
3.6	<i>Restricciones. Comprobaciones estructurales.</i>	109
3.6.1	Restricciones de comportamiento mecánico según CTE [2] y EHE-08 [1].	110
3.6.1.1	Estados Límites.	110
3.6.2	Zapatas Aisladas (Modelo 1).	113
3.6.2.1	Dominio de las variables de diseño.	113
3.6.2.2	Patrones de armado.	116
3.6.2.3	Modelos de distribución de tensiones en el terreno.	116
3.6.2.4	Aptitud al Servicio. E.L.S. de Tensiones en el Terreno.	120
3.6.2.5	Aptitud al Servicio: Estado Límite de Fisuración.	130
3.6.2.6	Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al Vuelco.	134
3.6.2.7	Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al Deslizamiento.	135
3.6.2.8	Seguridad Estructural: E.L.U. Agotamiento solicitaciones normales. Flexión.	136
3.6.2.9	Seguridad Estructural: E.L.U. Agotamiento frente a Cortante.	138
3.6.2.10	Seguridad Estructural: Estado Límite Último de Punzonamiento.	142
3.6.2.11	Seguridad Estructural: Estado Límite Último de Anclaje.	145
3.6.3	Zapata Excéntrica con Viga Centradora de Ancho Constante (Modelo 2).	148
3.6.3.1	Dominio de las variables de diseño.	149
3.6.3.2	Patrones de armado.	153
3.6.3.3	Aptitud al Servicio. ELS de Tensiones en el Terreno.	154
3.6.3.4	Aptitud al Servicio. Estado Límite de Fisuración.	162
3.6.3.5	Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al vuelco.	162
3.6.3.6	Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al Deslizamiento.	163
3.6.3.7	Seguridad Estructural: E.L.U. de Flexión.	163
3.6.3.8	Seguridad Estructural: E.L.U. de Cortante.	169
3.6.3.9	Seguridad Estructural: E.L.U. de Punzonamiento.	172
3.6.3.10	Seguridad Estructural: E.L.U. de Anclaje.	172
3.6.4	Zapata Combinada de Ancho Constante (Modelo 5).	173
3.6.4.1	Dominio de las variables de diseño.	173
3.6.4.2	Patron de armado.	177
3.6.4.3	Aptitud al Servicio. E.L.S. de Tensiones en el Terreno.	178
3.6.4.4	Aptitud al Servicio. E.L.S. de Fisuración.	184

3.6.4.5	Seguridad Estructural: E.L.U. de Estabilidad al Vuelco.	184
3.6.4.6	Seguridad Estructural: E.L.U. de Estabilidad al Deslizamiento	184
3.6.4.7	Seguridad Estructural: E.L.U. de Flexión.	185
3.6.4.8	Seguridad Estructural: E.L.U. de Cortante.	188
3.6.4.9	Seguridad Estructural. E.L.U. de Punzonamiento.	192
3.6.4.10	Seguridad Estructural: E.L.U. de Anclaje.	192
3.6.5	Zapata Combinada Asimétrica. (Modelos 3 y 4)	197
3.6.5.1	Dominio de las variables de diseño.	198
3.6.5.2	Patrones de armado.	202
3.6.5.3	Aptitud al Servicio. E.L.S. de Tensiones en el Terreno.	204
3.6.5.4	Aptitud al Servicio. E.L.S. de Fisuración.	210
3.6.5.5	Seguridad Estructural. E.L.U. Estabilidad al vuelco.	210
3.6.5.6	Seguridad Estructural. E.L.U. Estabilidad al deslizamiento.	210
3.6.5.7	Seguridad Estructural. E.L.U. de Flexión.	210
3.6.5.8	Seguridad Estructural: E.L.U. de Cortante.	212
3.6.5.9	Seguridad Estructural. E.L.U. de Punzonamiento.	212
3.6.5.10	Seguridad Estructural: E. L.U. de Anclaje.	212
3.7	Diagrama de cálculo.	212
3.8	Referencias bibliográficas	214
<b>4</b>	<b>Estado del arte Optimización Estructuras</b>	<b>215</b>
4.1	Introducción	215
4.2	Optimización de estructuras.	215
4.3	Optimización mediante Métodos exactos.	217
4.3.1	Estructuras de hormigón armado y pretensado.	217
4.3.2	Cimentaciones de hormigón armado.	228
4.4	Optimización mediante Métodos Heurísticos.	230
4.4.1	Estructuras metálicas.	230
4.4.2	Estructuras de hormigón	233
4.4.3	Cimentaciones y muros de contención.	244
4.5	Resumen y conclusiones.	253
4.6	Referencias bibliográficas.	253
<b>5</b>	<b>Métodos Heurísticos de Optimización.</b>	<b>266</b>
5.1	Introducción.	266
5.2	Heurísticas y Meta-heurísticas.	268
5.3	Optimización Heurística mono-objetivo.	268

5.3.1	Estrategia de saltos múltiples aleatorios (Random Walk, RW).	269
5.3.2	Estrategia de búsqueda local de descenso (Descent Local Search, DLS).	271
5.3.2.1	Rangos de variación de las variables.	273
5.3.2.2	Número de variables a modificar.	274
5.3.2.3	Criterio de aceptación.	275
5.3.2.4	Criterio de parada, Número máximo de iteraciones sin mejora.	275
5.3.3	Cristalización Simulada (Simulated Annealing, SA).	277
5.3.3.1	Espacio de soluciones del problema.	279
5.3.3.2	Funciones objetivo.	279
5.3.3.3	Mecanismo de generación.	279
5.3.3.4	Criterio de aceptación.	280
5.3.3.5	Esquema de enfriamiento.	280
5.3.3.6	Diagrama de flujo del algoritmo.	282
5.4	<i>Optimización Heurística Multi-objetivo.</i>	284
5.4.1	Cristalización Simulada Multi-objetivo. (Simulated Annealing, MOSA).	284
5.4.1.1	Condición de aceptación. Frontera de Pareto.	286
5.4.1.2	Esquema de enfriamiento	287
5.4.1.3	Criterio de Parada.	289
5.4.1.4	Diagrama de Flujo del Algoritmo.	290
5.5	<i>Bibliografía.</i>	292
<b>6</b>	<b>Calibración de los Algoritmos.</b>	<b>293</b>
6.1	<i>Introducción</i>	293
6.2	<i>Definición del problema:</i>	294
6.3	<i>Aplicación de los métodos heurísticos.</i>	296
6.3.1	Introducción.	296
6.3.2	Búsqueda aleatoria de soluciones. (Random Walk)	297
6.3.2.1	Modelo I: Zapatas aisladas.	297
6.3.2.2	Modelo 2R: Zapata Excéntrica con viga riostra. Cimiento Rígido.	297
6.3.2.3	Modelo 2F: Zapata Excéntrica con viga riostra. Modelo Elástico.	299
6.3.2.4	Modelo 5R: Zapata Combinada Ancho Constante. Cimiento Rígido.	300
6.3.2.5	Modelo 5F: Zapata Combinada Ancho Constante. Modelo Elástico.	300
6.3.2.6	Modelo 3R: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 1. Cimiento Rígido.	301
6.3.2.7	Modelo 3F: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 1. Modelo Elástico.	302
6.3.2.8	Modelo 4R: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 2. Cimiento Rígido.	303
6.3.2.9	Modelo 4F: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 2. Modelo Elástico.	304
6.3.2.10	Correlaciones entre Funciones Objetivo:	304
6.3.2.11	Comparación de resultados.	310
6.3.3	Estrategia de Búsqueda local del Descenso (DLS).	312
6.3.3.1	Ajuste del Algoritmo de DLS:	312

6.3.3.2	Aplicación de la Heurística DLS:	316
6.3.4	Cristalización simulada Mono-objetivo, (SA, Simulated Annealing).	318
6.3.4.1	Ajuste de los parámetros de configuración del Algoritmo.	319
6.3.4.2	Análisis Estadístico. Determinación del número de experimentos.	328
6.3.4.3	Optimización de las Funciones Objetivo.	329
6.4	<i>Optimización multi-objetivo.</i>	334
6.4.1	Esquema de enfriamiento.	334
6.4.1.1	Temperatura inicial $T_0$ .	334
6.4.1.2	Ley de evolución de la temperatura.	335
6.4.1.3	Longitud de la cadena de Markov. Criterio de equilibrio.	336
6.4.1.4	Criterio de congelación.	336
6.4.2	Criterio de parada.	336
6.4.3	Resultados obtenidos MOSA.	336
6.5	<i>Conclusiones y Análisis de resultados.</i>	337
6.5.1	Relación entre funciones objetivo.	337
6.5.2	Configuración óptima de Algoritmos.	337
6.5.3	Análisis de resultados técnicas mono-objetivo, RW, DLS, SA.	340
6.5.4	Análisis de resultados técnica multi-objetivo, MOSA.	342
6.6	<i>Bibliografía.</i>	343
<b>7</b>	<b>Ejemplo de aplicación del Algoritmo de Simulated Annealing.</b>	<b>344</b>
7.1	<i>Introducción.</i>	344
7.2	<i>Definición del problema.</i>	345
7.3	<i>Solución Calavera [1].</i>	346
7.4	<i>Soluciones obtenidas mediante el Software CYPECAD [5].</i>	349
7.5	<i>Aplicación Heurística mono-objetivo de Cristalización Simulada (SA).</i>	350
7.5.1	Resultados Función objetivo 'Coste Económico'. (SA)	350
7.5.2	Funciones de 'Constructibilidad'.	369
7.5.3	Verificación de soluciones.	378
7.5.4	Estudio de sensibilidad.	380
7.5.4.1	Análisis de Sensibilidad. Tensión admisible del terreno:	380
7.5.4.2	Análisis de sensibilidad. Módulo de Balasto ( $K_{30}$ ).	382
7.5.4.3	Análisis de sensibilidad. Materiales.	386
7.6	<i>Optimización Multi-objetivo (MOSA).</i>	388
7.6.1	Introducción.	388
7.6.2	Resultados obtenidos.	388
7.6.2.1	Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Diámetro medio'	388
7.6.2.2	Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Relación P/A'	390

7.6.2.3	Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Nº Barras'.	392
7.6.2.4	Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Nº tipo de barras'	394
7.6.2.5	Análisis de sensibilidad.	396
7.7	<i>Análisis y Conclusiones.</i>	398
7.7.1.1	Funciones de Coste económico.	398
7.7.1.2	Funciones objetivo Medioambientales.	401
7.7.1.3	Funciones objetivo de 'Constructibilidad'.	401
7.7.1.4	Sensibilidad de las soluciones óptimas.	403
7.7.1.5	Resultados optimización multi-objetivo.	404
7.8	<i>Referencias bibliográficas.</i>	405
<b>8</b>	<b>Estudio de Parametrización.</b>	<b>406</b>
8.1	<i>Introducción.</i>	406
8.2	<i>Análisis de resultados.</i>	407
8.3	<i>Referencias bibliográficas.</i>	416
<b>9</b>	<b>Conclusiones y Futuras líneas de investigación.</b>	<b>417</b>
9.1	<i>Conclusiones.</i>	417
9.1.1	Estado del arte	417
9.1.2	Algoritmo de optimización utilizado.	420
9.1.2.1	Calibración del algoritmo.	420
9.1.2.2	Resultados.	421
9.1.3	Ejemplo de aplicación.	421
9.1.3.1	Función de Coste Económico.	422
9.1.3.2	Optimización Funciones objetivo Medioambientales.	424
9.1.3.3	Optimización Funciones objetivo de 'Constructibilidad'.	424
9.1.3.4	Sensibilidad de las soluciones.	428
9.1.3.5	Resultados optimización multi-objetivo.	429
9.1.4	Estudio de parametrización.	431
9.2	<i>Futuras líneas de investigación.</i>	431
9.3	<i>Referencias bibliográficas.</i>	433
<b>ANEXO I: Descripción de soluciones óptimas</b>		
<b>ANEXO II: Resultados del estudio de parametrización.</b>		

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1.1. Cimentación mediante zapatas. Dobson [2].	28
Figura 1.2. Cimentación por entablados. Dobson [2].	29
Figura 1.3. Cimentación mediante ataguías. Dobson [2].	29
Figura 1.4. Cimentación mediante emparrillado de vigas metálicas. Buel [3].	31
Figura 1.5. Zapata aislada de hormigón armado. Buel [3].	31
Figura 1.6. Zapata combinada de hormigón armado. Buel [3].	32
Figura 1.7. Cimentación mediante zapata combinada trapezoidal. Buel [3].	32
Figura 1.8. Zapata aislada con refuerzos. Buel [3].	33
Figura 1.9. Cimentación mediante pilotes. Buel [3].	33
Figura 1.10. Zapatas fábrica de ladrillo. Talbot et al. [4].	33
Figura 1.11. Ensayos en laboratorio sobre zapatas. Talbot [5].	34
Figura 1.12. Gráfica ensayo rotura cimentaciones Carga-Desplazamiento. Talbot [5].	34
Figura 1.13. Resultado ensayos rotura de cimentaciones. Talbot [5].	35
Figura 1.14. Gráficos de rotura en ensayos sobre cimientos. Talbot [5].	35
Figura 1.15. Zapatas aisladas trapezoidales de hormigón armado. Eddy et al. [6].	36
Figura 1.16. Zapatas aisladas compuestas. Eddy et al. [6].	36
Figura 1.17. Esquema de cimentación de un edificio- William [7].	38
Figura 1.18. Zapata de medianería con viga centradora. Lahuerta [9].	39
Figura 1.19. Presión transmitida en zapatas con momentos en los dos ejes. Teng [10].	40
Figura 1.20. Secciones de referencia para diseño zapatas aisladas. Teng [10].	41
Figura 1.21. Patrón de armado zapatas aisladas. Teng [10].	41
Figura 1.22. Soluciones para cimentaciones en medianerías. Teng [10].	42
Figura 1.23. Soluciones para cimentaciones aisladas con viga centradora. Teng [10].	42
Figura 1.24. Modelo análisis Zapata aislada con viga centradora. Teng [10].	43
Figura 1.25. Diagramas de esfuerzos zapata aislada con viga riostra. Teng [10].	44
Figura 1.26. Patrón de armado zapatas aislada con viga riostra. Teng [10].	45
Figura 1.27. Zapatas combinadas rígidas. Teng [10].	46
Figura 1.28. Distribución de tensiones sobre el terreno. Dunham [11].	48
Figura 1.29. Secciones referencia cálculo zapatas aisladas. Dunham [11].	49
Figura 1.30. Patrones de armado zapatas aisladas. Dunham [11].	49
Figura 1.31. Zapatas combinadas. Dunham [11].	50
Figura 1.32. Zapata combinada asimétrica. Dunham [11].	50
Figura 1.33. Zapata combinadas con nervios rigidizadores y trapezoidales. Dunham [11].	51
Figura 1.34. Modelos zapata combinada. Bowles [13].	53
Figura 1.35. Zapata combinada. Esfuerzos de diseño. Bowles [13].	54
Figura 1.36. Patrón de armado zapata combinada. Bowles [13].	54
Figura 1.37. Zapata combinada de ancho variable. Bowles [13].	55
Figura 1.38. Zapatas aisladas unidas mediante viga. Bowles [13].	55

Figura 1.39. Esfuerzos de diseño. Zapatas aisladas unidas con viga. Bowles [13].	56
Figura 1.40. Método de análisis de bielas y tirantes. Salas [14].	57
Figura 1.41. Modelos de cimentación de medianería. Salas [14].	57
Figura 1.42. Zapata excéntrica. Reacción estructura del piso superior. Calavera [15].	60
Figura 1.43. Zapata excéntrica. Reacción tirante en cara superior zapata. Calavera [15].	60
Figura 1.44. Zapata excéntrica con viga centradora. Calavera [15].	61
Figura 1.45. Zapata excéntrica con viga centradora. Calavera [15].	61
Figura 1.46. Zapata retranqueada. Calavera [15].	62
Figura 1.47. Modelo para zapata corrida con voladizos. Calavera [15].	62
Figura 1.48. Modelo para zapata combinada. Calavera [15].	63
Figura 1.49. Modelo cimiento flexible – estructura rígida. Calavera [15].	65
Figura 1.50. Modelo para cimiento mediante pozos. Calavera [15].	66
Figura 1.51. Criterios diseño zapata aislada. EH-68 [16].	67
Figura 1.52. Interacción suelo-cimiento-estructura. CTE [17].	69
Figura 1.53. Distribución tensiones en suelos arcillosos o arenosos. CTE [17].	70
Figura 1.54. Modelo de cálculo para zapatas aisladas. CTE [17].	71
Figura 1.55. Criterio Rigidez para zapatas combinadas. CTE [17].	72
Figura 3.1. Criterios de signos adoptado	86
Figura 3.2. Modelo Geométrico, Zapatas Aisladas.	90
Figura 3.3. Modelo Geométrico. Zapata Excéntrica con viga riostra	90
Figura 3.4. Modelo Geométrico. Zapata Combinada de ancho constante	91
Figura 3.5. Modelo Geométrico. Zapata Combinada asimétrica (Conf-1)	91
Figura 3.6. Modelo Geométrico. Zapata Combinada asimétrica (Conf-2)	92
Figura 3.7. Índice Diámetro Medio- Calavera et al. [5].	108
Figura 3.8. Patrón de armado para zapatas aisladas.	116
Figura 3.9. Condiciones rigidez para zapatas aisladas. CTE [2].	118
Figura 3.10. Zapata Aislada. Modelo lineal de tensiones (Caso 1).	121
Figura 3.11. Zapata Aislada. Modelo lineal de tensiones (Caso II).	123
Figura 3.12. Zapata Aislada. Modelo lineal de tensiones (Caso II). Equilibrio	124
Figura 3.13. Zapata Aislada. Modelo elástico de tensiones. Equilibrio	127
Figura 3.14. E.LS. de Fisuración. Parámetro $\varepsilon$ . EHE [1].	132
Figura 3.15. E.LS. de Fisuración. Parámetro $A_{x,eficaz}$ . EHE [1].	133
Figura 3.16. E.LU. de Estabilidad al vuelco.	134
Figura 3.17. E.LU. de Flexión. Sección de referencia para cálculo esfuerzos de flexión.	137
Figura 3.18. E.LU. de Cortante. Sección de referencia.	138
Figura 3.19. E.LU. de Punzonamiento. Perímetro crítico, $u_1$ . EHE [1].	143
Figura 3.20. E.LU. de Punzonamiento. Perímetro crítico $u_0$ . EHE [1].	144
Figura 3.21. E.LU. de Anclaje. Sección de cálculo $S_2$ .	146
Figura 3.22. E.LU. de Anclaje. Sección de cálculo $S_3$ .	147
Figura 3.23. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Modelo Geométrico.	149
Figura 3.24. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Patrón Armado	153
Figura 3.25. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Patrón Armado I	154



Figura 3.26. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Armado a cortante .....	154
Figura 3.27. Modelo 2. Modelo de Cálculo. Cimiento Rígido. ....	155
Figura 3.28. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo elástico simplificado.....	160
Figura 3.29. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelos de barras.....	160
Figura 3.30. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo Rígido. Equilibrio. ....	162
Figura 3.31. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo Cimiento Rígido. ....	164
Figura 3.32. Modelo 2. Leyes de esfuerzos. Modelo Rígido. ....	164
Figura 3.33. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo Elástico Simplificado. ....	168
Figura 3.34. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Gráficas de esfuerzos modelo Elástico. ....	168
Figura 3.35. Modelo 5. Modelo Geométrico. ....	173
Figura 3.36. Modelo 5. Patrón de armado. (Configuración 1). ....	177
Figura 3.37. Modelo 5. Patrón de armado. (Configuración 2). ....	178
Figura 3.38. Modelo 5. Patrón de armado. Refuerzo Cortante.....	178
Figura 3.39. Modelo 5. Criterios de Rigidez. EHE [1]. ....	179
Figura 3.40. Modelo 5. Modelo de cálculo lineal. ....	180
Figura 3.41. Modelo 5. Modelo de cálculo lineal II. ....	180
Figura 3.42. Zapata Combinada de ancho constante. Modelo Elástico Lineal. ....	183
Figura 3.43. Zapata Combinada de ancho constante. Modelo de barras. ....	183
Figura 3.44. Modelo 5. Modelo de cimiento rígido. Tensiones en el terreno.....	185
Figura 3.45. Modelo 5. Modelo de cimiento rígido. Esfuerzos de flexión. ....	186
Figura 3.46. Modelo 5. Cálculo armadura transversal.....	187
Figura 3.47. Modelo 5. E.L.U. Cortante. ....	188
Figura 3.48. Modelo 5. E.L.U. Punzonamiento. Perímetro crítico. ....	192
Figura 3.49. Modelo 5. E.L.U. Anclaje de armaduras. ....	192
Figura 3.50. Modelo 5. E.L.U. Anclaje de armaduras extremas. ....	194
Figura 3.51. Modelo 5. E.L.U. Anclaje. Ley de decalaje. EHE [1]. ....	195
Figura 3.52. Modelo 3. Modelo geométrico.....	197
Figura 3.53. Modelo 4. Modelo geométrico.....	197
Figura 3.54. Modelo 3. Patrón de armado I. Sin armado sup. ....	201
Figura 3.55. Modelo 4. Patrón de armado II. Con armado sup.....	202
Figura 3.56. Modelo 4. Patrón de armado I. Sin armado sup. ....	202
Figura 3.57. Modelo 4. Patrón de armado II. Con armado sup.....	203
Figura 3.58. Modelos de armado a cortante de la sección del cimiento.....	203
Figura 3.59. Modelo 3/4. Tensiones en el terreno. Modelo rígido. ....	204
Figura 3.60. Modelo 3/4. Tensiones en el terreno. ....	204
Figura 3.61. Modelo 3/4. Tensiones en el terreno II. ....	205
Figura 3.62. Zapata Asimétrica. Modelo Elástico Simplificado. ....	207
Figura 3.63. Zapata Asimétrica. Modelo de barra. ....	207
Figura 3.64. Zapata Asimétrica. Modelo Rígido y Elástico simplificado.....	209
Figura 4.1. Modelo de cálculo para zapata. Hannan [64]. ....	227
Figura 4.2. Modelo de cálculo muro contención. Saribas et al. [138]. ....	228
Figura 4.3. Diseño óptimo de encepados. Fadaee [65]. ....	228

Figura 4.4. Modelo de armado encepado. Fadaee et al. [135].....	229
Figura 4.5. Modelo de cálculo muro contención. Ceranic et al. [140]. .....	244
Figura 4.6. Modelo de cálculo zapata. Wang [142].....	246
Figura 4.7. Modelo de cálculo zapata. Wang [143].....	246
Figura 4.8. Modelo de cálculo zapata/muro contención. Khajehzadeh et al. [145]. .....	247
Figura 4.9. Variables de diseño. Algoritmo HS. Khajehzadeh [146].....	248
Figura 4.10. Variables de diseño. Algoritmo GSA. Khajehzadeh et al. [147]. .....	248
Figura 4.11. Modelo de cálculo zapata. Camp et al. [148].....	249
Figura 4.12. Modelo de cálculo zapata. Camp et al. [149].....	250
Figura 4.13. Modelo de cálculo zapata. Khajehzadeh et al [145].....	250
Figura 4.14. Variables y Modelo de cálculo. Khajehzadeh et al. [151]. .....	251
Figura 4.15. Modelo de tensiones transmitidas por zapata. Camp et al. [152].....	252
Figura 5.1. Búsqueda local del descenso. ....	271
Figura 5.2. Búsqueda local del descenso. Iteraciones adicionales.....	271
Figura 5.3. Búsqueda local del descenso. Re arranques. ....	272
Figura 5.4. Representación evolución búsqueda óptimo. S.A.....	279
Figura 6.1. Mod. 2. Resultados obtenidos mediante “Random Walk”.....	296
Figura 6.2. Gráfica Coste Económico-Emisión CO <sub>2</sub> (RW). .....	304
Figura 6.3. Analisis de residuos. Minitab [6].....	305
Figura 6.4. Gráfica Coste Económico-Coste Energético (RW). .....	306
Figura 6.5. Gráfica Coste Económico-Peso Total (RW). .....	306
Figura 6.6. Gráfica Coste Económico-Consumo de agua (RW). .....	307
Figura 6.7. Gráfica Peso Total-Consumo de agua (RW). .....	307
Figura 6.8. Gráfica Nº Tipos de Barra-Uniformidad armado (RW). .....	308
Figura 6.9. Gráficas de probabilidad, función 3 parámetros Weibull. ‘SA’. Minitub [6]....	328
Figura 7.1. Solución Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Calavera [1]. .....	345
Figura 7.2. Solución Zapata Excéntrica con Viga Riostra II. Calavera [1]. .....	346
Figura 7.3. Modelo elementos finitos Zapata Excéntrica con Viga Riostra. SAFE[7]. .....	347
Figura 7.4. Solución alternativa. Modelo elementos finitos. SAFE [7].....	348
Figura 7.5. Resolución problema mediante software CYPECAD [5].....	348
Figura 7.6. Ajuste datos solución SA a función Weibull. Minitab [6]. .....	351
Figura 7.7. Comparativa de resultados. ....	352
Figura 7.8. Distribución porcentual de los resultados S.A. ....	353
Figura 7.9. Comparación resultados S.A.....	354
Figura 7.10. Modelo Elementos finitos. SAFE [7].....	355
Figura 7.11. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 2R y 2F. ....	355
Figura 7.12. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 5R y 5F. ....	356
Figura 7.13. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 3R y 3F. ....	357
Figura 7.14. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 4R y 4F. ....	358
Figura 7.15. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico. ....	359
Figura 7.16. Solución Optima Económica. Modelo 2R.....	366
Figura 7.17. Solución Optima Económica con B/A<2. Modelo 2R. ....	367

Figura 7.18. Tensiones en el terreno ( $t/m^2$ ). SAP2000 [8].	378
Figura 7.19. Momentos en dirección x ( $t\ m$ ). SAP2000 [8].	378
Figura 7.20. Cortantes dirección x ( $t$ ). SAP2000 [8].	378
Figura 7.21. Estudio sensibilidad parámetro ' $\sigma_{adm}$ '. (I).	380
Figura 7.22. Estudio sensibilidad parámetro ' $\sigma_{adm}$ '. (II)	380
Figura 7.23. Gráfica sensibilidad parámetro $\sigma_{adm}$ .	381
Figura 7.24. Sensibilidad $K_{30}$ . Suelo Granular.	383
Figura 7.25. Gráfica Sensibilidad 'Módulo de Balasto $K_{30}$ '. Suelo Granular.	384
Figura 7.26. Sensibilidad parámetro $K_{30}$ . Suelos Cohesivos.	384
Figura 7.27. Gráfica sensibilidad. Materiales.	385
Figura 7.28. Gráfica sensibilidad 'Tipo Hormigón-Acero'.	386
Figura 7.29. Gráfica sensibilidad 'Tipo Hormigón'.	386
Figura 7.30. MOSA. Frontera de Pareto CE-DM.	388
Figura 7.31. MOSA. Frontera de Pareto CE-PA.	390
Figura 7.32. MOSA. Frontera de Pareto CE-NB.	392
Figura 7.33. MOSA. Frontera de Pareto CE-N <sup>o</sup> TB.	394

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Parámetros Geométricos.....	84
Tabla 3.2. Parámetros del terreno.....	85
Tabla 3.3. Acciones consideradas sobre los cimientos .....	86
Tabla 3.4. Coeficientes de mayoración de acciones .....	87
Tabla 3.5. Costes unitarios adoptados. BEDEC [4].....	88
Tabla 3.6. Variables geométricas. ....	89
Tabla 3.7. Variables de materiales. ....	92
Tabla 3.8. Variables de Armado I. (Primer orden). ....	93
Tabla 3.9. Variables de Armado II. (Primer orden). ....	93
Tabla 3.10. Variables de Armado III. (Primer orden). ....	93
Tabla 3.11. Variables de Armado IV. (Primer orden). ....	94
Tabla 3.12. Variables de Armado de segundo orden. Modelo 1.....	94
Tabla 3.13. Variables de Armado de segundo orden. Modelo 2.....	95
Tabla 3.14. Variables de Armado de segundo orden. Modelo 5.....	95
Tabla 3.15. Variables de Armado de segundo orden. Modelos 3 y 4. ....	95
Tabla 3.16. Variables Geométricas Zapatas aisladas. ....	113
Tabla 3.17. Variables de Materiales, Zapatas aisladas. ....	114
Tabla 3.18. Variables de Armado, Zapatas aisladas.....	114
Tabla 3.19. Variables de Armado (2º orden), Zapatas aisladas. ....	115
Tabla 3.20. Cuantías de armado, Zapatas aisladas. ....	115
Tabla 3.21. Distancias mínimas/máximas, Zapatas aisladas. ....	115
Tabla 3.22. Abertura máxima de fisura. EHE [1]. ....	131
Tabla 3.23. Coeficientes de seguridad materiales. ....	141
Tabla 3.24. Anclaje. Parámetro "m". EHE [1]. ....	145
Tabla 3.25. Anclaje. Parámetro "β". EHE [1]. ....	146
Tabla 3.26. Modelo 2. Variables Geométricas.....	150
Tabla 3.27. Modelo 2. Variables de los materiales. EHE[1]. ....	150
Tabla 3.28. Modelo 2. Variables de Armado. ....	151
Tabla 3.29. Modelo 2. Variables de Armado (II). ....	151
Tabla 3.30. Modelo 2. Cuantías de armado. EHE [1]. ....	152
Tabla 3.31. Modelo 2. Distancias Max/Min entre armaduras.....	153
Tabla 3.32. Modelo 5. Variables Geométricas.....	174
Tabla 3.33. Modelo 5. Variables de los materiales.....	174
Tabla 3.34. Modelo 5. Variables de armado. (I). ....	175
Tabla 3.35. Modelo 5. Variables de armado. (II). ....	175
Tabla 3.36. Modelo 5. Cuantías de armado. EHE [1]. ....	176
Tabla 3.37. Modelo 5. Distancias min/Max de armado. ....	176
Tabla 3.38. Modelo 5. Anclaje armadura. Parámetro "m". EHE [1]. ....	193

<i>Tabla 3.39. Modelo 5. Anclaje armaduras. Factor <math>\beta</math>. EHE [1].</i>	193
<i>Tabla 3.40. Modelo 3/4. Variables geométricas</i>	198
<i>Tabla 3.41. Modelo 3/4. Variables de los materiales</i>	198
<i>Tabla 3.42. Modelo 3/4. Variables de armado</i>	199
<i>Tabla 3.43. Modelo 3/4. Variables de armado II</i>	199
<i>Tabla 3.44. Modelo 3/4. Cuantías de armado</i>	200
<i>Tabla 3.45. Modelo 3/4. Distancias Min/Max entre armaduras</i>	201
<i>Tabla 5.1. Variables en cada modelo de cimentación</i>	266
<i>Tabla 5.2. Espacio de soluciones para cada modelo</i>	266
<i>Tabla 5.3. Rangos de valores para las variables del problema</i>	273
<i>Tabla 5.4. Número de variables del problema</i>	274
<i>Tabla 5.5. Espacio de soluciones</i>	278
<i>Tabla 6.1. Parámetros del problema</i>	293
<i>Tabla 6.2. Análisis estadístico de resultados (Mod 2R)</i>	297
<i>Tabla 6.3. Análisis estadístico de resultados (Modelo 2F)</i>	298
<i>Tabla 6.4. Análisis estadístico de resultados (Modelo 5R)</i>	299
<i>Tabla 6.5. Análisis estadístico de resultados (Modelo 5F)</i>	300
<i>Tabla 6.6. Análisis estadístico de resultados (Modelo 3R)</i>	301
<i>Tabla 6.7. Análisis estadístico de resultados (Modelo 3F)</i>	301
<i>Tabla 6.8. Análisis estadístico de resultados (Modelo 4R)</i>	302
<i>Tabla 6.9. Análisis estadístico de resultados (Modelo 4F)</i>	303
<i>Tabla 6.10. Análisis resultados función 'Coste Económico' (RW)</i>	309
<i>Tabla 6.11. Análisis resultados función 'Emisión CO<sub>2</sub>' (RW)</i>	310
<i>Tabla 6.12. Análisis resultados funciones de 'constructibilidad' (RW)</i>	310
<i>Tabla 6.13. Nº Variables según modelo. Algoritmo DLS</i>	312
<i>Tabla 6.14. Mecanismo de parada. Algoritmo DLS</i>	312
<i>Tabla 6.15. Mecanismo de parada. Vecindad. Algoritmo DLS</i>	313
<i>Tabla 6.16. Resultados sobre 100 experimentos. Ajuste Algoritmo DLS</i>	313
<i>Tabla 6.17. Resultados Coste Económico. Algoritmo DLS</i>	315
<i>Tabla 6.18. Resultados "Mínimo Peso Armadura (kg)". Algoritmo DLS</i>	316
<i>Tabla 6.19. Resultados "Constructibilidad". I. Algoritmo DLS</i>	317
<i>Tabla 6.20. Resultados "Constructibilidad". II. Algoritmo DLS</i>	317
<i>Tabla 6.21. Número variables. Algoritmo SA</i>	318
<i>Tabla 6.22. Resultados. Modelo Tipo 2R. Algoritmo SA</i>	319
<i>Tabla 6.23. Ajuste parámetro "Gamma". Tipo 2R. (SA)</i>	321
<i>Tabla 6.24. Ajuste parámetro "Vecindad". (SA)</i>	323
<i>Tabla 6.25. Ajuste parámetro "K". Tipo 2. (SA)</i>	323
<i>Tabla 6.26. Ajuste parámetro "Congelación". Tipo 2R. (SA)</i>	325
<i>Tabla 6.27. Resultados 'Coste económico'. Algoritmo SA</i>	329
<i>Tabla 6.28. Ajuste Weibull. Resultados 'Coste económico'</i>	329
<i>Tabla 6.29. Resultados 'Peso Armado'</i>	330
<i>Tabla 6.30. Resultados. Nº Barras. Algoritmo SA</i>	330

Tabla 6.31. Resultados ‘Número Tipos de Barras’. Algoritmo SA.....	331
Tabla 6.32. Resultados Relación Perímetro/Area. Algoritmo SA.....	332
Tabla 6.33. Resultados parámetro Diámetro medio. Algoritmo SA.....	332
Tabla 6.34. Mecanismo de parada. Vecindad. Algoritmo DLS.....	337
Tabla 6.35. Comparativa resultados “Coste Económico Mínimo”.....	339
Tabla 6.36. Comparación Resultados “Nº Barras de armado”.....	340
Tabla 6.37. Comparación Resultados “Número Tipo de Barras”.....	340
Tabla 6.38. Comparación Resultados “Relación P/A”.....	341
Tabla 6.39. Comparación Resultados “Diámetro Medio”.....	341
Tabla 7.1. Parámetros problema Calavera.....	344
Tabla 7.2. Funciones Objetivo con solución libro Calavera [1].	346
Tabla 7.3. Funciones Objetivo con solución CYPECAD [5].	349
Tabla 7.4. Resultados “Coste Económico” (SA).....	350
Tabla 7.5. Ajuste Weibull. Resultados ‘Coste económico’.	351
Tabla 7.6. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2R. Zapata 1. (SA).....	360
Tabla 7.7. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2R. Zapata 2. (SA).....	361
Tabla 7.8. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2F. Zapata 1. (SA).....	362
Tabla 7.9. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2F. Zapata 2. (SA).....	363
Tabla 7.10. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 5R. (SA).....	364
Tabla 7.11. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 5F. (SA).....	365
Tabla 7.12. Resultados “Peso Armadura” (SA).....	368
Tabla 7.13. Comparativa resultados I. “Peso Armadura Total” (SA).....	368
Tabla 7.14. Comparativa resultados II. “Peso Armadura Total” (SA).....	369
Tabla 7.15. Resultados “Mínimo Número de Barras” (SA).....	369
Tabla 7.16. Comparativa resultados I. “Número de barras” (SA).....	370
Tabla 7.17. Comparativa resultados II. “Número de barras” (SA).....	370
Tabla 7.18. Resultados “Mínimo Número de Tipos de Barra.” (SA).....	371
Tabla 7.19. Comparativa resultados I. “Número tipos de barras” (SA).....	372
Tabla 7.20. Comparativa resultados I. “Número tipos de barras” (SA).....	372
Tabla 7.21. Resultados “Relación P/A.” (SA).....	373
Tabla 7.22. Comparativa resultados I. “Relación P/A” (SA).....	373
Tabla 7.23. Comparativa resultados I. “Relación P/A” (SA).....	374
Tabla 7.24. Resultados “Diámetro Medio”. (SA).....	374
Tabla 7.25. Comparativa resultados I. “Diámetro Medio” (SA).....	375
Tabla 7.26. Comparativa resultados II. “Diámetro Medio” (SA).....	375
Tabla 7.27. Óptimos para cada función objetivo I. (SA).....	376
Tabla 7.28. Óptimos para cada función objetivo II. (SA).....	377
Tabla 7.29. Módulo de Balasto para distintos tipos de suelo. CTE [3].....	382
Tabla 7.30. Optimización mono-objetivo. CE-DM.....	387
Tabla 7.32. Optimización multi-objetivo. CE-DM. (MOSA).....	388
Tabla 7.33. Optimización multi-objetivo, CE-DM. Resultados.....	389
Tabla 7.34. Optimización mono-objetivo. CE-PA.....	389

<i>Tabla 7.35. Optimización multi-objetivo. CE-PA. (MOSA).</i> .....	390
<i>Tabla 7.36. Optimización multi-objetivo. CE-PA. Resultados.</i> .....	391
<i>Tabla 7.37. Optimización mono-objetivo. CE-NB.</i> .....	391
<i>Tabla 7.38. Optimización multi-objetivo. CE-NºBarras. (MOSA)</i> .....	392
<i>Tabla 7.39. Optimización multi-objetivo. CE-NºBarras. Resultados.</i> .....	393
<i>Tabla 7.40. Optimización mono-objetivo. CE-NºTipoBarra</i> .....	393
<i>Tabla 7.41. Optimización multi-objetivo. CE-DM. (MOSA).</i> .....	394
<i>Tabla 7.42. Optimización multi-objetivo. CE-NºTiposBarras. Resultados.</i> .....	395
<i>Tabla 7.43. Análisis sensibilidad. Tipo 2R. (MOSA).</i> .....	395
<i>Tabla 7.44. Análisis sensibilidad. Tipo 5R. (MOSA).</i> .....	396
<i>Tabla 8.1. Parámetros problema.</i> .....	405

# Capítulo 1

## Introducción a las Cimentaciones de Medianería.

### 1.1 Introducción.

Las cimentaciones en medianería se definen como aquellas correspondientes a un soporte que se sitúa habitualmente en el linde de la parcela y por ende, tiene condicionada la dimensión del cimiento bajo el, en al menos una de las direcciones.

Este tipo de cimentaciones se dá habitualmente en la práctica y ha llevado a generar varios modelos de solución distintos, si bien no se ha llegado a establecer los parámetros que permitan discernir entre la opción más óptima en cada caso.

Históricamente, en el cálculo estructural en general y en el de cimentaciones en particular, el proceso de cálculo se iniciaba con un predimensionado, fijando por parte del Ingeniero una primera solución tanto geométrica como de los materiales constituyentes, que en general dependía fundamentalmente de la experiencia del calculista. A posteriori, en base a los principios del análisis estructural y de la resistencia materiales y siguiendo los criterios normativos existentes, se termina de definir y comprobar la validez de los valores adoptados. El proceso habitual consistía en los siguientes pasos:

- a) Elección del tipo de materiales a utilizar en el cimiento (Hormigón y acero fundamentalmente).
- b) Elección del modelo de cimentación a disponer y de su modelo matemático de resolución.
- c) Predimensionado geométrico.



- d) Obtención de esfuerzos actuantes en las secciones de comprobación.
- e) Verificación de Estados Límite de Servicio.
- f) Determinación de armados para verificación de Estados Límite Últimos.

Este proceso implica normalmente varias modificaciones sobre los valores del predimensionado inicial, dependiendo de este, por tanto, la bondad de la solución final y el tiempo de cálculo empleado. Por otro lado, rara vez se evalúan o analizan los resultados obtenidos de la primera solución factible del problema, en busca de un óptimo, dándose por definitiva la primera solución válida obtenida.

A este condicionante, hay que añadir para el problema en estudio, la existencia de varios posibles modelos de cálculo distintos, y dentro de cada uno de ellos, la posibilidad de evaluar el comportamiento del terreno de diversas formas, lo que eleva considerablemente el número de alternativas en manos del ingeniero, para obtener una solución válida y óptima.

Desde el inicio, han existido autores que han desarrollado el análisis matemático de ciertos problemas estructurales mediante Técnicas Exactas, si bien dado el alto número de variables del sistema, el comportamiento no lineal de los materiales, unido a la extensión de los procedimientos de análisis de los problemas, complica la aplicación de estos métodos y conduce a buscar otro tipo de alternativas de cálculo.

Entre las alternativas más utilizadas destacan la aplicación de los métodos heurísticos, como métodos que pese a no obtener la solución óptima al problema, permiten obtener una solución suficientemente aproximada a ella, con un tiempo de cálculo razonable.

El desarrollo informático, con la aparición de ordenadores cada vez más potentes, han permitido poder abordar el proceso de optimización para algunos problemas estructurales mediante estas técnicas heurísticas.

Independientemente de los métodos de resolución empleados, un problema de optimización se compondrá de:

- Unos **parámetros**  $\mathbf{P}(p_1, \dots, p_k)$  del problema, que se identifican con aquellos valores que permanecerán constantes en el proceso de optimización y que definen el problema.
- Unas **variables**  $\mathbf{X}(x_1, \dots, x_n)$  del problema, cuyo valor se modificará durante el proceso de optimización, hasta alcanzar el valor final y que junto con los parámetros definirán el problema. Distinguiremos a su vez entre variables de primer orden, como aquellas variables cuyo valor es totalmente independiente y variables de segundo orden, como aquellas variables cuyo valor dependerá del valor obtenido para las variables de primer orden.

- Un conjunto de **restricciones**, que definen aquellas condiciones cuyo cumplimiento ha de asegurarse por parte de la solución evaluada. Entre ellas podremos distinguir entre:
  - Restricción de Tipo Constructivo: Entre las que se incluirán.
    - Restricción implícita. Patrones de armado.
    - Dominio de las variables de diseño.  $X_{\min} < X < X_{\max}$ .
  - Restricciones de Comportamiento Mecánico ( $G_j(X) \leq 0$ ): Entre las que se incluirán.
    - Seguridad Estructural
    - Aptitud al servicio.
    - Durabilidad.
- Un conjunto de **funciones objetivo**  $F=f(X)$ , que serán las funciones a evaluar y cuyo valor se pretende optimizar. La función objetivo habitual en el caso de optimización de estructuras, se corresponde con la obtención del mínimo coste económico, si bien es cada vez más habitual incorporar otro tipo de funciones objetivos. En el caso del presente estudio las funciones a evaluar se dividirán en:
  - Funciones económicas. En este caso, el objetivo será obtener la solución al problema que implique un mínimo coste económico.
  - Funciones Medioambientales. Cada vez más importante en nuestra sociedad, en este grupo se incluirán aquellas funciones cuyos objetivos minimicen:
    - Emisión de CO2 (kg).
    - Energía Consumida (MJ).
    - Peso (kg).
    - Consumo de agua (kg).
  - Funciones de 'constructibilidad'. Este tipo de funciones evaluarán la facilidad constructiva de la solución. Los índices a evaluar serán:
    - Número de barras de armadura.
    - Número de Tipos distintos de barras de armadura.
    - Relación Perímetro / Área.
    - Diámetro medio de la armadura.
    - Uniformidad de armado.

Con estas definiciones, el problema de optimización, se definirá como la búsqueda del conjunto de variables del vector X, que cumple:

$$F=f(X) \rightarrow \text{Min o Max}$$

Condicionado por:

$$\mathbf{G}_j(\mathbf{X}) \leq 0 \text{ con } j=1, \dots, m$$

$$\mathbf{X}_{i,\min} < \mathbf{X} < \mathbf{X}_{i,\max} \text{ con } i=1, \dots, n$$

Finalmente, habrá de distinguirse entre los problemas de optimización mono-objetivo, donde se busca la optimización de una única función objetivo y los problemas de optimización multi-objetivo donde la optimización se realiza sobre varias funciones objetivo al mismo tiempo.

## **1.2 Historia de las cimentaciones de medianería.**

El problema planteado para el cálculo de la cimentación correspondiente a un soporte de medianería, ha sido ampliamente recogido en la bibliografía de referencia en cálculo de estructuras de cimentación, describiéndose distintos modelos de cálculo para su resolución.

Como se podrá comprobar, pese al extenso tratamiento del problema en multitud de publicaciones, no se han localizado prácticamente reglas o criterios que permitan establecer las mejores o más óptimas entre todas aquellas propuestas.

También se hará una referencia al tratamiento incluido en las distintas instrucciones españolas de hormigón armado aparecidas hasta la fecha para el problema en estudio.

A continuación se incluye un repaso por la bibliografía existente en relación a las cimentaciones superficiales y más concretamente sobre los modelos de cálculo utilizados para la resolución de cimentaciones de medianería.

El inicio en la construcción de cimentaciones es tan antiguo como el paso del hombre de una sociedad nómada a una sociedad sedentaria. La necesidad de construir cobijos estables para el hombre implica el desarrollo de los conocimientos necesarios para el desarrollo de construcción y en consecuencia, de sus cimentaciones.

En los orígenes de la construcción, la cimentación se limitaba al apoyo de la estructura portante sobre los terrenos, pero conforme se van haciendo más exigentes las construcciones, (mayores alturas o distancias entre apoyos), también se desarrollan los sistemas de cimentación necesarios.

Así, se tiene constancia de la utilización de pilotes de madera construidas en el neolítico en viviendas de Italia o Irlanda hace 5.000 años.

Se sabe a su vez que en la ciudad de Babilonia se utilizaron rellenos de tierra de hasta 5.00 m de altura como terrenos de apoyo, dada la existencia de suelos blandos en la zona, cimentando sobre lechos de ladrillo unidos por morteros naturales.

Griegos, Chinos y Mayas utilizaron como elementos de cimentación bases de mampostería en forma de losas de reparto.

La aparición de la civilización romana, significó un gran avance en el desarrollo de las técnicas de cimentación. Los romanos disponían de varios sistemas de cimentación en función del terreno de apoyo, pilotes de madera para suelos blandos, planchas de madera en terrenos más competentes, o cimentaciones elevadas de piedras planas unidas por cemento romano o mortero de cal.

Los romanos desarrollaron las cimentaciones mediante hormigones en masa, como las dispuestas en el Coliseo de Roma, donde se dispone de un anillo macizo de 12 m de profundidad compuesto de hormigón y bloques de piedra.

**Vitrubio [1]**, fue sin duda el primer ingeniero que desarrolló la importancia de los cimientos en las edificaciones, estableciendo algunos criterios de diseño. Autor del tratado sobre arquitectura más antiguo que se conserva y el único de la Antigüedad clásica, *De Architectura*, en 10 libros (probablemente escrito entre los años 23 y 27 a. C.). Inspirada en teóricos helenísticos, se refiere expresamente a inventos del gran Ctesibio. La obra trata sobre órdenes, materiales, técnicas decorativas, construcción, tipos de edificios, hidráulica, colores, mecánica y gnomónica, dedicando algunos apartados a las cimentaciones de los edificios:

*“Si es posible encontrar un terreno sólido, la cimentación de estos edificios se excava sobre terreno firme en una extensión que se ajuste proporcionalmente a las exigencia del volumen de la construcción; se levantará la obra lo más sólida posible, ocupando la totalidad del suelo firme. Se erigirán unas paredes sobre la tierra, debajo de las columnas con un grosor que sobrepase en la mitad al diámetro de las columnas que posteriormente se levantarán, con el fin de que las inferiores, que se llaman estrobatae por soportar todo el peso, sean más sólidas que las situadas encima de ellas”.*

*“Los resaltos de las basas no sobresalgan más allá de la base; debe mantenerse con la misma proporción el grosor de las paredes superiores. El espacio que quede en medio se abovedara o bien se consolidará mediante relleno, con el fin de que todo quede bien compactado. Si, por el contrario, no se encuentra un terreno solido sino que es de tierra de relleno en gran profundidad, o bien, si se trata de un terreno palustre, entonces se excavará, se vaciará y se clavarán estacas endurecidas al fuego de álamo, de olivo o de roble y se hundirán como puntales o pilotes, en el mayor número posible, utilizando unas máquinas; entre los pilotes se rellenará el espacio con carbones; así, quedarán llenos los cimientos con una estructura muy consistente. Una vez dispuestos los cimientos, deben colocarse a nivel los estilóbatos”.*

En el imperio Bizantino, sus iglesias se construyen mediante bóvedas apoyadas sobre pechinas y no sobre elementos continuos como lo hacían los romanos. La cimentación, como en la cúpula de Santa Sofía, se resuelve mediante unos muros escalonados de piedra caliza y mortero hidráulico.

La **zapata aislada** aparecería en la Edad Media con el estilo gótico, dado el empleo de grandes luces y columnas aisladas. Las cimentaciones se resolvían con muros de mam-

postería algo más anchos que los muros soportados, o con muros escalonados como en la catedral de Amiens.

No será hasta el siglo XVIII, cuando se desarrolle con Coulomb, la Mecánica de Suelos. Hasta ese momento el diseño de las cimentaciones era totalmente empírico no existiendo conocimientos teóricos sobre el comportamiento del terreno bajo cargas.

En **1773, Coulomb**, enuncia el criterio de rotura de terreno desarrollando a su vez teorías de empujes de tierras.

Sería en el siglo XIX, cuando se produciría un gran avance en los modelos utilizados como cimentación, así como en su análisis, sobre todo a raíz del gran nivel de construcción alcanzado en Chicago tras sufrir un gran incendio.

**Bauman**, en **1873**, enunciaría el principio de la presión admisible, desarrollando el folleto “**The art of Preparing Foundations with particular illustration of the method of Isolated piers**”, donde se establecían criterios de diseño para las cimentaciones así como límites de asientos admisibles (1 ½ pulgada).

En esta época, las cimentaciones aisladas se resolvían habitualmente en piedra, disponiendo varios niveles escalonados en profundidad. El incremento cada vez mayor de las alturas de los edificios y la necesidad de construcción sobre terrenos malos, obliga a la búsqueda de criterios alternativos para la resolución de las cimentaciones.

Así, en el edificio Pullman, se emplearían emparrillados de madera dispuestos en varios niveles y en el edificio Rookeery, se emplean para los cimientos de soportes aislados, zapatas resueltas mediante emparrillados de perfiles metálicos embebidos en una capa de hormigón.

También empiezan a aparecer soluciones mediante losas, como la formada por cúpulas invertidas de ladrillo utilizadas en los cimientos del molino “Albion Flour” en Blackfriars, Londres.

En **1885 Boussinesq** publica “**Application des potentiels a l'étude des solides élastiques**” donde desarrolla expresiones sencillas para la determinación de las tensiones producidas en el interior de un semiespacio elástico por una carga concentrada normal a la superficie del semiespacio, que permitirán el cálculo de asientos en las cimentaciones.

En **1900 Hennebique** utilizaría la primera losa de hormigón armado.

Es a partir del siglo XIX, cuando se experimenta un mayor desarrollo del análisis y compresión de los elementos de cimentación, incluyéndose a continuación algunas de las referencias más notables.

**Dobson [2]**, en 1872, en su libro *Foundations and Concrete Works*, aporta una descripción de los distintos modelos de cimentaciones utilizados en la época. Así, inicialmente establece dos categorías de cimentaciones.

- Clase I: Cimentaciones construidas en situaciones donde el terreno natural es suficientemente competente para soportar las cargas transmitidas por la construcción.
- Clase II; Cimentaciones construidas en situaciones donde es necesario disponer un estrato artificial para soportar las cargas.

Además, cada una de estas clases se dividía en:

- División A: Cimentaciones no afectadas en su ejecución por el agua.
- División B: Cimentaciones bajo el agua.

Distingue a su vez entre distintas tipologías de cimentación:

Zapatás (Footings): Resueltos mediante muros de fábrica de ladrillo o piedra, de ancho mayor a los muros soportados.

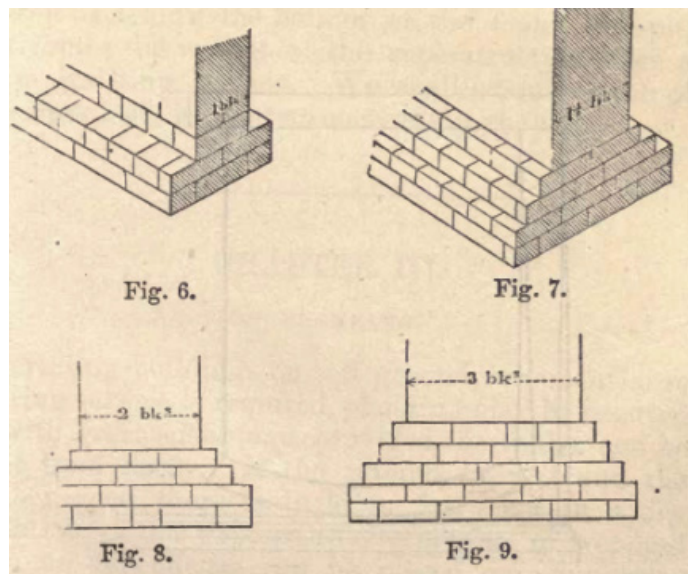


Figura 1.1. Cimentación mediante zapatas. Dobson [2].

Entablados (Planking): Utilizado en casos de edificios cimentados sobre suelos blandos, donde la superficie de apoyo necesaria es grande.

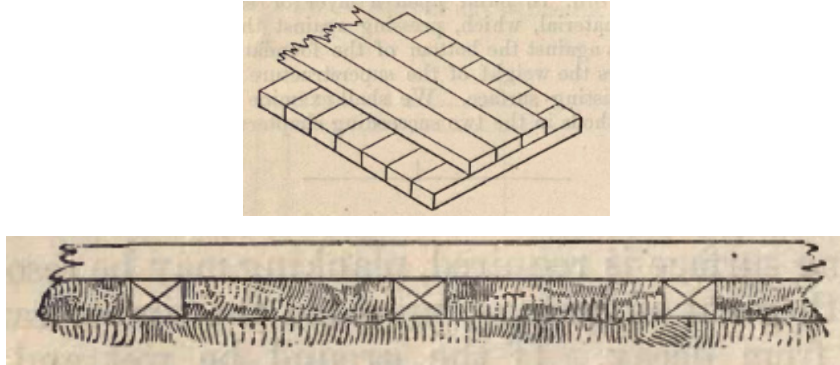


Figura 1.2. Cimentación por entablados. Dobson [2].

Además, enumera tres procedimientos para conseguir un estrato resistente, mediante la utilización de:

- Arena (Sand). En este caso se plantean dos opciones, bien la disposición de capas de arena o la utilización de pilotes de arena. En este último caso, se hincan pilotes de madera a una profundidad corta para luego retirarlos y rellenar con arena.
- Ataguías (Cofferdams): Definido como un muro hermético, para permitir la ejecución de cimientos en zonas bajo el agua. El muro se suele realizar con dos muros de pilotes rellenos de tierra.

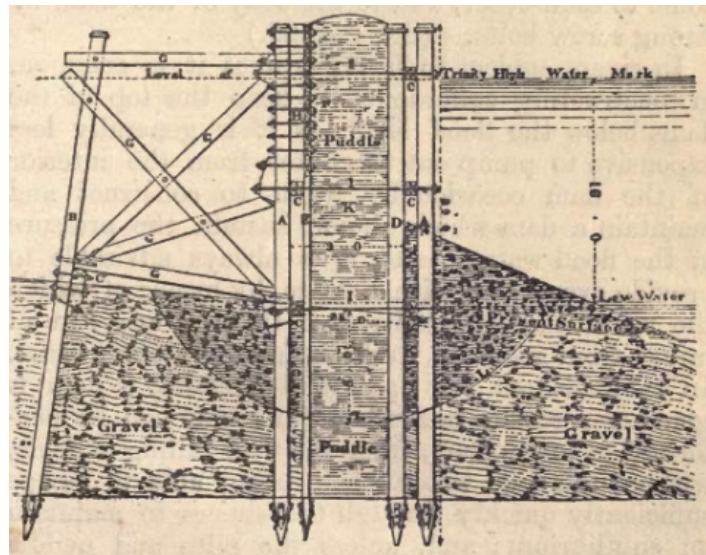


Figura 1.3. Cimentación mediante ataguías. Dobson [2].

- Hormigón (Concrete). Dobson describe el hormigón como un conglomerado artificial en el que piedras que componen la mayor parte de su volumen se cementan entre sí mediante un mortero de cal.
- Cajones (Caissons): Realizados habitualmente con madera, permiten la ejecución de cimentaciones en suelos de bajas resistencia.
- Beton. Considerado como un hormigón hidráulico usado principalmente en trabajos submarinos como sustituto de la albañilería. El método de uso habitual es el disponer capas alternas de un pie de espesor, primero de beton y luego de escombros.
- Pilotes hincados (Pile Driving): Donde se describen los métodos de hincado y maquinaria utilizada tanto para pilotes de madera como para pilotes de hierro.

**Buel [3]**, en 1904, en su libro *Reinforced Concrete*, hace una completa descripción de los elementos estructurales resueltos mediante hormigón armado en la época, incluyendo el desarrollo de la teoría de flexión que describe su comportamiento.

En el documento se introducen las cimentaciones mediante hormigón armado, indicando su mejora económica en relación a las cimentaciones resueltas mediante emparrillados de vigas metálicas. En su capítulo VI se hace una breve descripción de las cimentaciones resueltas mediante hormigón armado, diferenciando entre cimentaciones superficiales, ‘spread foundations’ y las cimentaciones mediante pilotes.

Entre este primer tipo, distingue entre las cimentaciones de simple columna, las combinadas de dos o más soportes y las cimentaciones continuas.

Según indica Buel [3], *‘estas formas son similares; el propósito de cada una es proporcionar una losa o placa de hormigón y acero embebido, que se comporta de forma rígida bajo la carga concentrada del soporte y así es capaz de distribuirla sobre un terreno de apoyo sin transmitirle esfuerzos por encima de su capacidad. Puede dividirse en celosía de vigas pesadas de acero embebidas en el hormigón y en las zapatas de hormigón con esqueletos compuestos de elementos pequeños, tales como varillas, barras y mallas de metal’*.

A continuación se muestran algunas figuras con ejemplos de cada uno de los modelos aportados:



- Solución mediante emparrillados de vigas metálicas embebidas en hormigón armado. Beam Grillage:

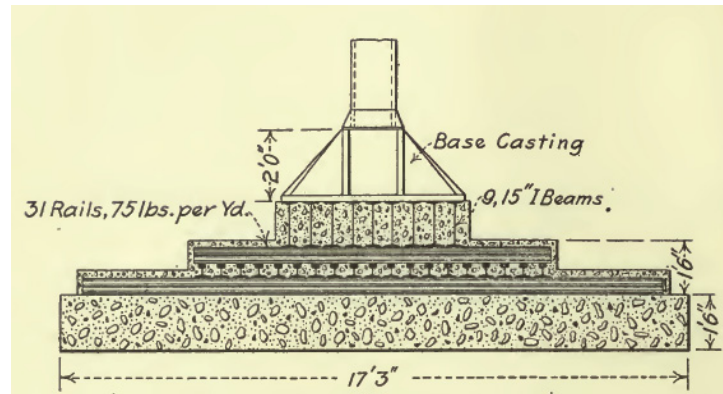


Figura 1.4. Cimentación mediante emparrillado de vigas metálicas. Buel [3].

- Solución mediante zapata aislada de un solo soporte con hormigón armado:

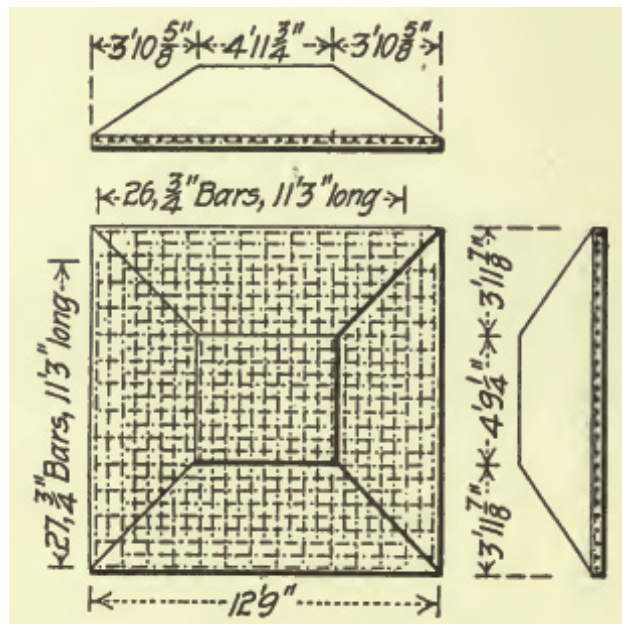


Figura 1.5. Zapata aislada de hormigón armado. Buel [3].

- Solución mediante zapata combinada de dos soportes de hormigón armado:

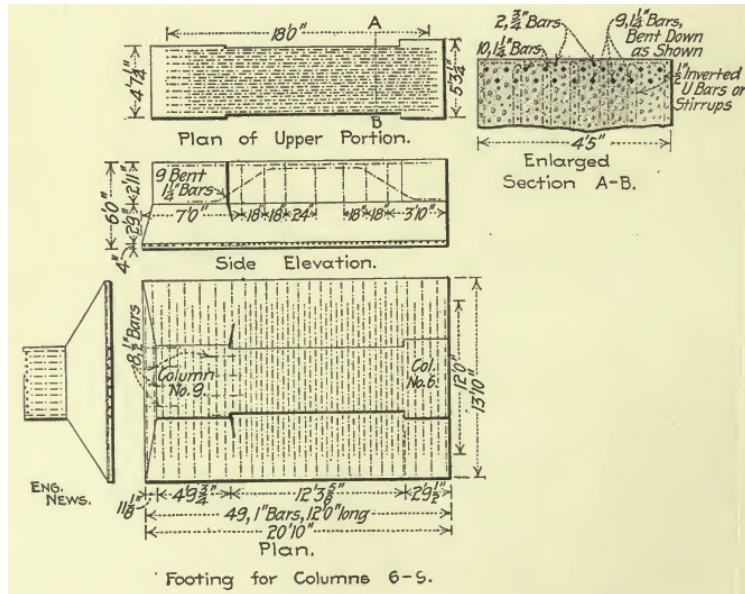


Figura 1.6. Zapata combinada de hormigón armado. Buel [3].

- Solución mediante zapata combinada trapezoidal de dos soportes de cargas distintas:

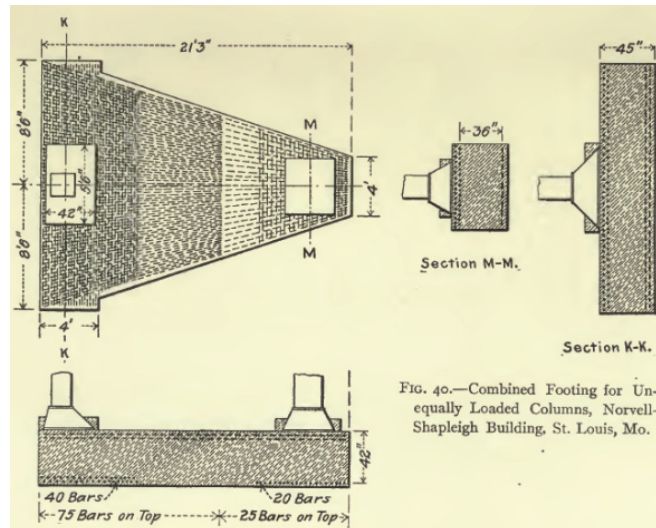


Figura 1.7. Cimentación mediante zapata combinada trapezoidal. Buel [3].

También se hace referencia a un tipo de cimentación utilizado en Europa por Hennebique, compuesto por zapatas aisladas de hormigón y refuerzos a base de barras longitudinales en la base del cimiento y barras verticales (cercos).

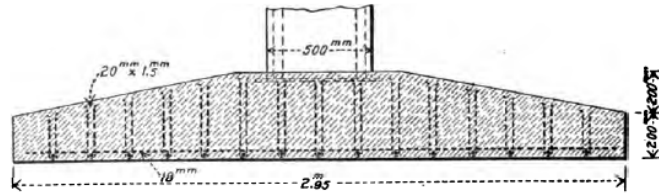


Figura 1.8. Zapata aislada con refuerzos. Buel [3].

Finalmente se aportan soluciones mediante pilotes con encepados. (pile foundation with reinforced concrete caps),

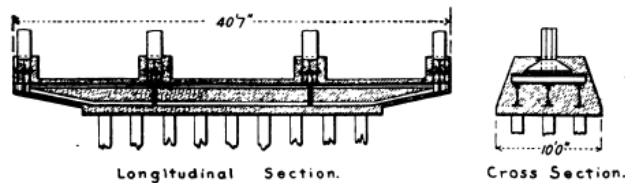


Figura 1.9. Cimentación mediante pilotes. Buel [3].

Talbot et al. [4], en 1909, publican el Bulletin nº 27 *Test of Bricks Columns and Terra Cotta Block Columns*, donde se describen los resultados obtenidos en los ensayos realizados en los laboratorios de la Universidad de Illinois sobre zapatas de fábrica de ladrillo bajo muros.

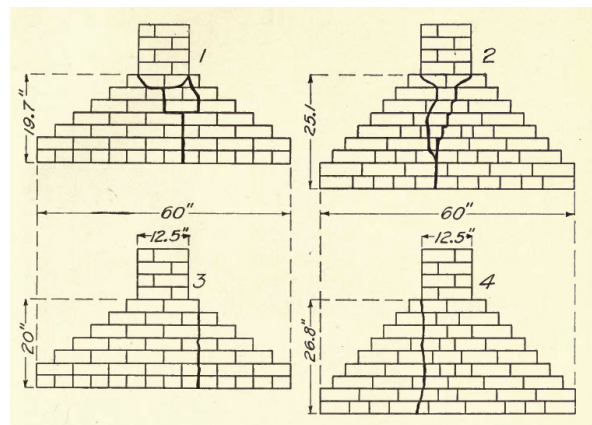


Figura 1.10. Zapatas fábrica de ladrillo. Talbot et al. [4].

Talbot [5], en 1913, en su libro *Reinforced Concrete Wall Footings and Column Footings* realiza una recopilación y análisis de los primeros ensayos realizados en laboratorio sobre elementos de cimentación. Los ensayos se realizan en la Universidad de Illinois, desde el año 1908, sobre 114 Zapatas de muro y 83 zapatas bajo columna aislada.

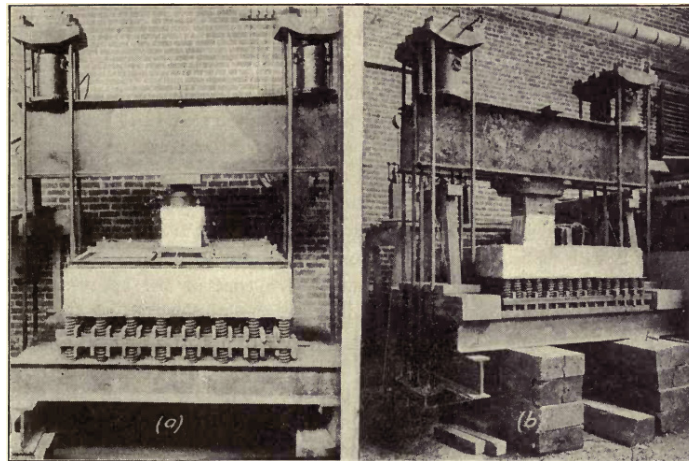


Figura 1.11. Ensayos en laboratorio sobre zapatas. Talbot [5].

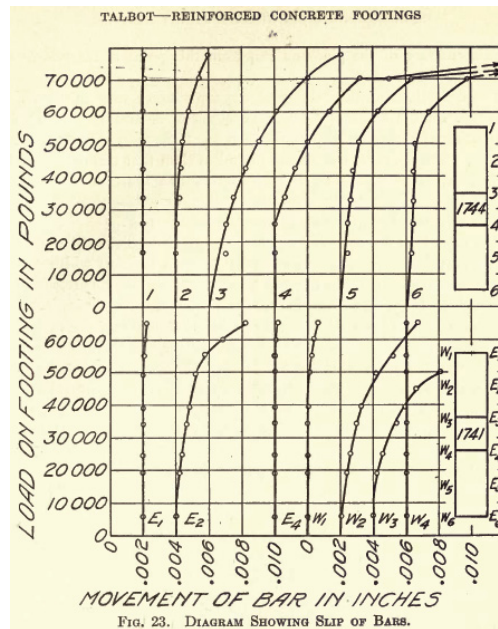


Figura 1.12. Gráfica ensayo rotura cimentaciones Carga-Desplazamiento. Talbot [5].

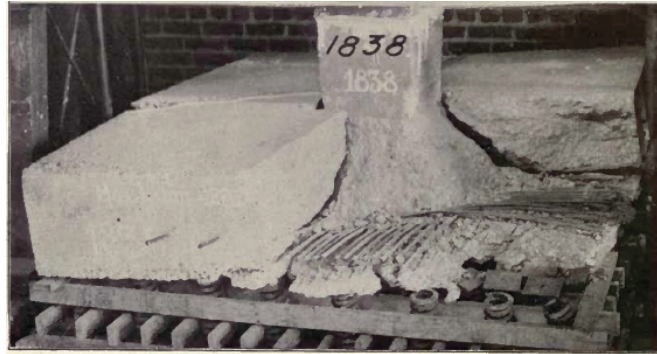


Figura 1.13. Resultado ensayos rotura de cimentaciones. Talbot [5].

En la publicación se analizan los resultados obtenidos y se determinan las secciones críticas resistentes ante los distintos fallos detectados (flexión, anclaje, cortante,...), resaltando los fallos localizados por falta de anclaje de las armaduras.

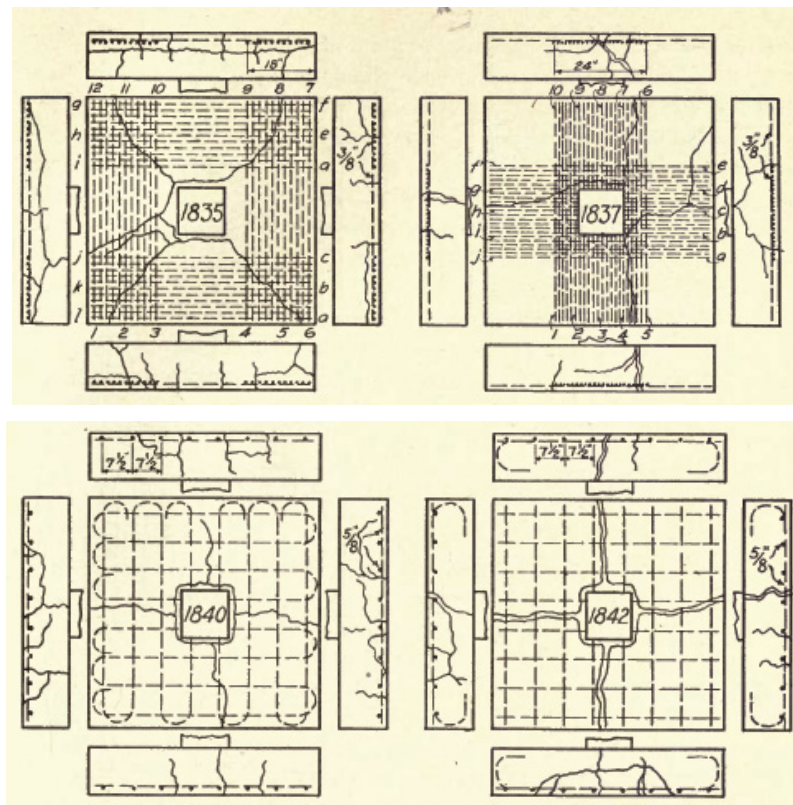


Figura 1.14. Gráficos de rotura en ensayos sobre cimientos. Talbot [5].

Eddy et al. [6], en 1914, en su libro *Concrete-Steel Construction*, también dedica su apartado IV a las cimentaciones, incluyendo tanto cimentaciones mediante zapatas aisladas de hormigón armado como cimentaciones mediante pilotes.

En el primer caso se incluyen inicialmente zapatas trapezoidales, tal y como se muestra en la siguiente figura:

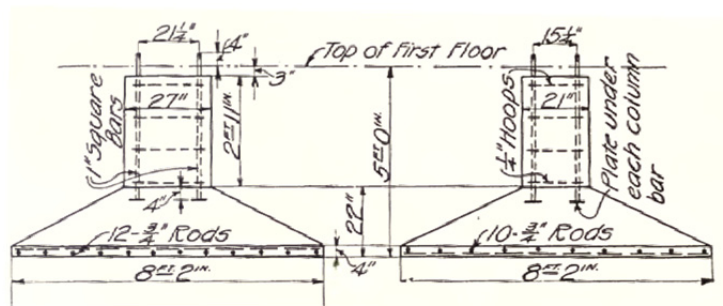


Figura 1.15. Zapatas aisladas trapezoidales de hormigón armado. Eddy et al. [6].

Sin embargo, recomienda un segundo tipo de zapatas aisladas, formadas por dos elementos ejecutados de forma independiente. Inicialmente y en contacto con el terreno se dispone una zapata armada inferiormente, para posteriormente disponer sobre ella un segundo cimiento de hormigón armado donde se embebe el arranque del soporte.

La ventaja indicada por el autor para este modelo, es que la capa superior de barras ayuda al cimiento a soportar el esfuerzo cortante producido por el soporte que tiende a punzonar el cimiento y en segundo lugar también ayuda a distribuir la carga en la placa inferior.

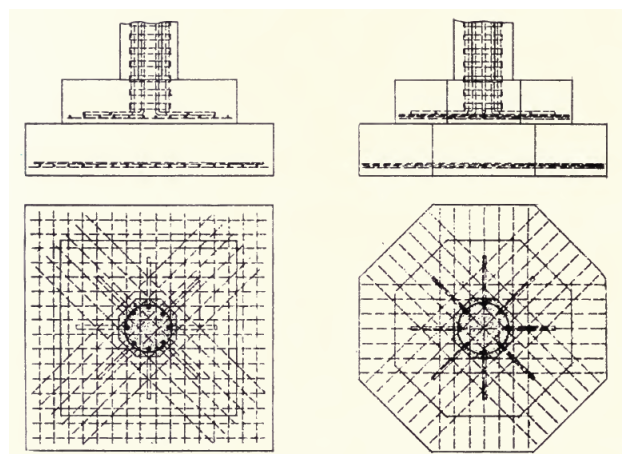


Figura 1.16. Zapatas aisladas compuestas. Eddy et al. [6].

**Williams [7]**, en 1922 publica *The Desig of Masonry Structures and Foundations*. En su publicación, se incluye en su Capítulo XIII las cimentaciones en suelo seco, incluyendo la siguiente clasificación:

- Directas
- Cimentaciones superficiales
- Zapatas
- Emparrilados
- Cimentación flotantes
- Losas
- Vigas y losas
- Arcos invertidos y losas
- Groined arch
- Open well, or pier foundations
- Sheet Piling
- Sectional lagging
- Compacted soil foundations
- Timber compacting piles
- Sand and Stone piles
- Concrete ingot east in depressions
- Cupping process
- Pile foundations
- Timber piles
- Concrete piles
- Miscellaneous

En la publicación se muestran esquemas de cimentaciones correspondientes a edificios realizados en la ciudad de Nueva York, donde se puede apreciar las soluciones dispuestas para las medianerías, apreciándose la disposición de cimientos combinados.

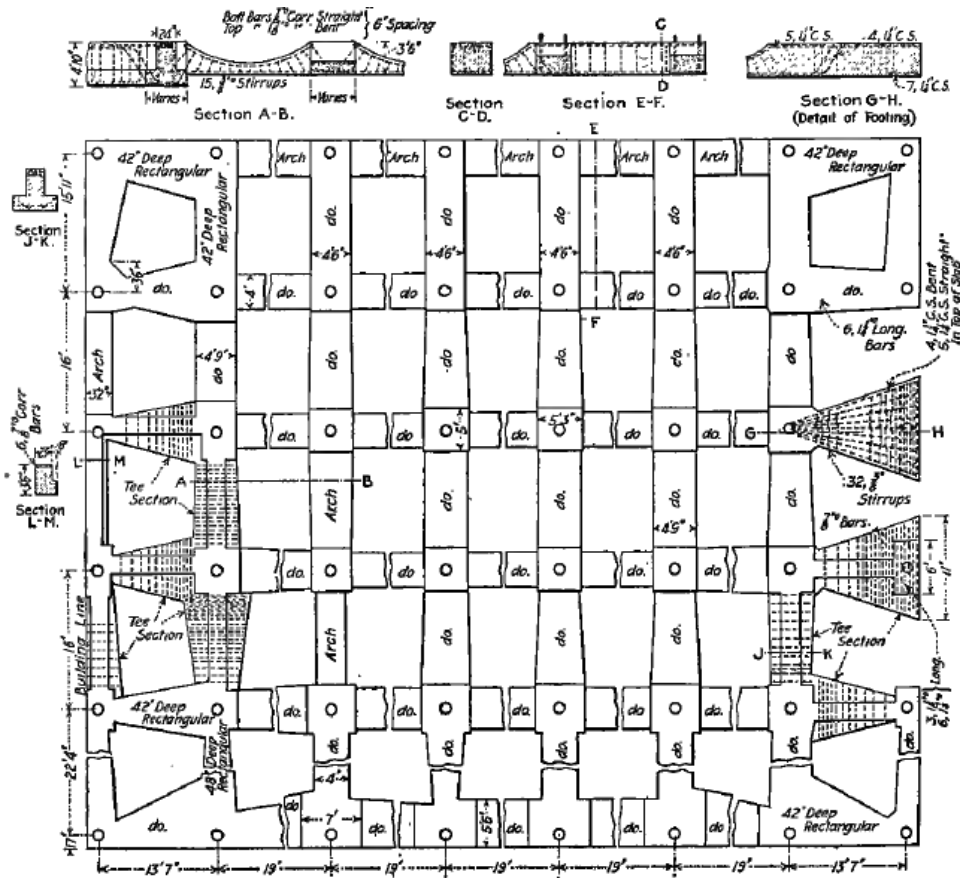


Figura 1.17. Esquema de cimentación de un edificio- William [7].

En 1915, Hicks [8], en la publicación *Standardized Square Footings of Reinforced Concrete*, aporta unos diagramas para el diseño y revisión de zapatas cuadradas de hormigón armado, de forma sencilla. Los resultados se comparan con los resultados obtenidos en ensayos reales realizados por el profesor Talbot [5], de la Universidad de Illinois. En la publicación solo se hace referencia a cimentaciones resueltas con zapatas cuadradas.

Lahuerta [9], en 1948, publica en la Revista Nacional de Arquitectura, un artículo titulado, *Dos propuestas sobre la cimentación en medianeras*. En él, se analizan las soluciones mediante zapatas aisladas excéntricas para la cimentación de soportes en medianera, proponiendo como soluciones alternativas para reducir las superficies del cimiento, el disponer el cimiento a más profundidad o como solución más ventajosa la



de centrar la carga mediante la generación de un momento flector contrario a la excentricidad geométrica existente.

Esta última, es la opción que indica más ventajosa desde el punto de vista económico y constructivamente. Como se aprecia en las siguientes figuras incluidas en la publicación, se soluciona mediante la colocación de una viga suficientemente rígida (denominada centradora), entre el soporte medianero y el interior, que debe ser capaz de soportar el momento inducido por el descentramiento de la carga.

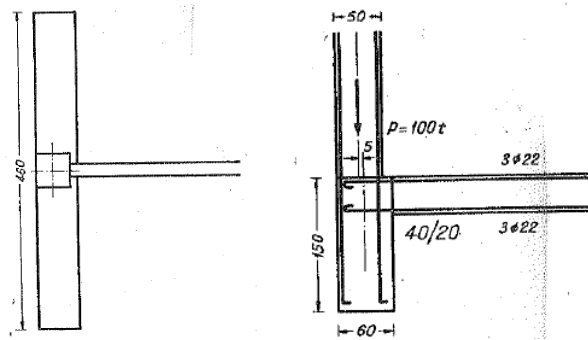


Figura 1.18. Zapata de medianería con viga centradora. Lahuerta [9]

El autor no aporta un análisis ni criterios constructivos completos del modelo propuesto para este tipo de solución.

**Teng [10]**, en 1962, en su libro "*Foundation Design*" incluye un amplio análisis de varios modelos para la solución del problema a tratar en el presente estudio.

Inicialmente Teng, clasifica los cimientos superficiales en:

- Zapatas aisladas (Spread footings)
- Zapatas unidas con vigas (Strap footings)
- Zapatas combinadas (Combined Footings)
- Losas de cimentación (Mat foundations).

En el capítulo 6 de su publicación, se dedica al análisis de la solución de zapata aislada (Spreads footing), incluyendo el cálculo mediante gráficas para la obtención de las presiones transmitidas al terreno, en zapatas rectangulares sometidas a momentos en los dos planos.

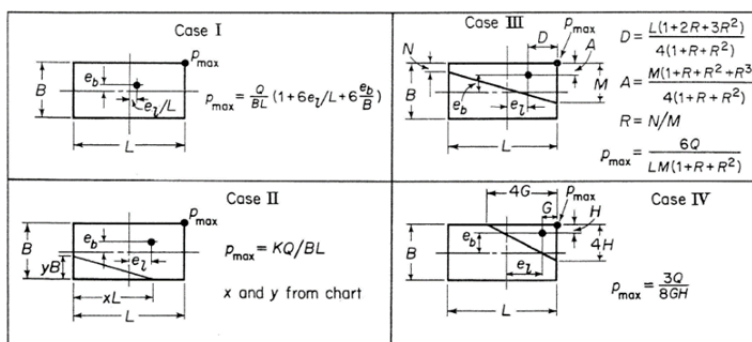
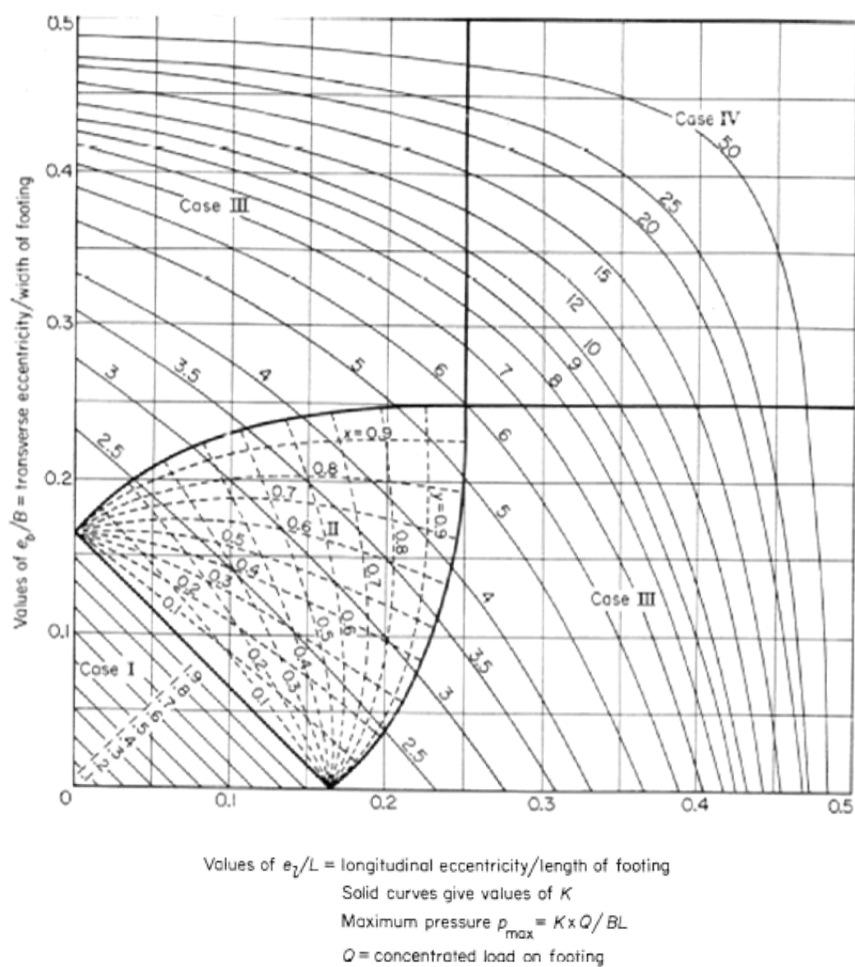


Figura 1.19. Presión transmitida en zapatas con momentos en los dos ejes. Teng [10].

En la siguiente figura, se muestran las secciones de referencia para la comprobación de los estados de agotamiento por flexión y cortante, que como se verá en capítulos posteriores, son muy similares a las adoptadas por las normativas actuales.

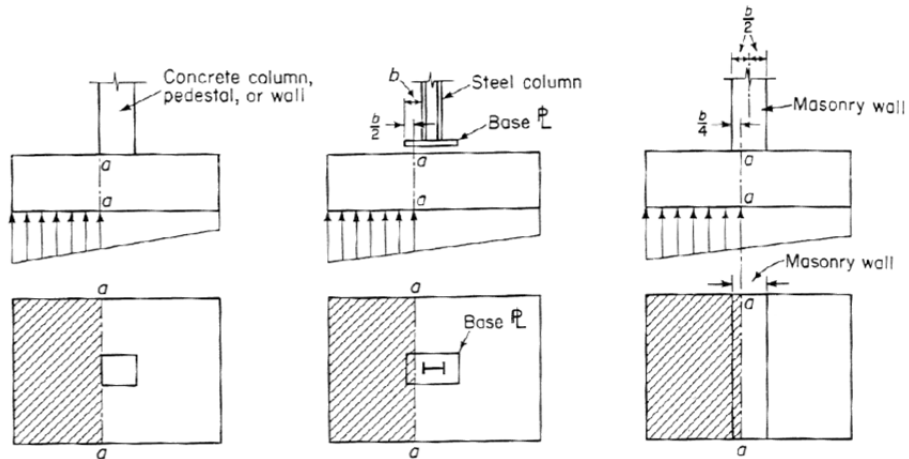


Figura 1.20. Secciones de referencia para diseño zapatas aisladas. Teng [10].

Finalmente, a través de los ejemplos incluidos en la publicación, podemos comprobar los patrones de armado adoptados para este tipo de cimentación:

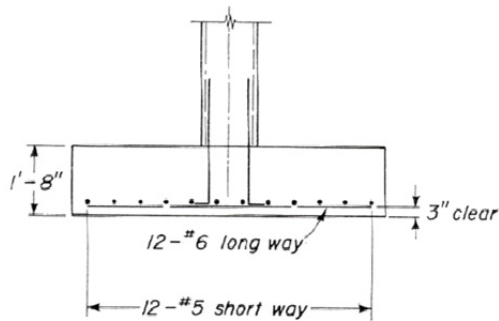


Figura 1.21. Patrón de armado zapatas aisladas. Teng [10].

En el capítulo 7, se dedica a la descripción de 3 soluciones de cimentación, pensadas para los casos de dos soportes confrontados cuando uno de ellos es medianero con otra propiedad y su cimentación no puede disponerse en esa dirección. Las opciones planteadas son:

- Zapatas aisladas con viga centradora (Strap Footing, Cantilever Footings or pump-handle foundations ). Correspondiente a la disposición de dos zapatas aisladas conectadas mediante una viga.
- Zapata combinada (Combined Footing). Correspondiente a la disposición de una sola zapata que engloba los dos soportes.
- Losa de Cimentación (Mat or raft foundation). Correspondiente a un único elemento de cimentación que engloba varios soportes.

En las siguientes figuras del citado libro se muestran los distintos tipos:

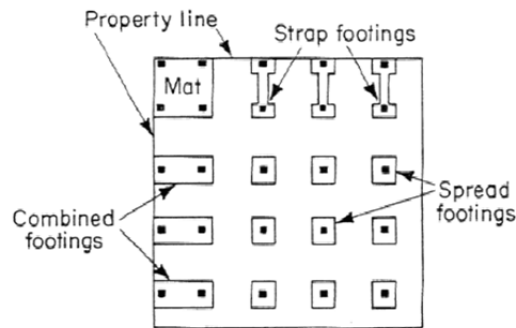


Figura 1.22. Soluciones para cimentaciones en medianerías. Teng [10].

La publicación incluye un análisis de cada uno de los modelos propuestos. Para el primer modelo se establecen diversas alternativas de diseño:

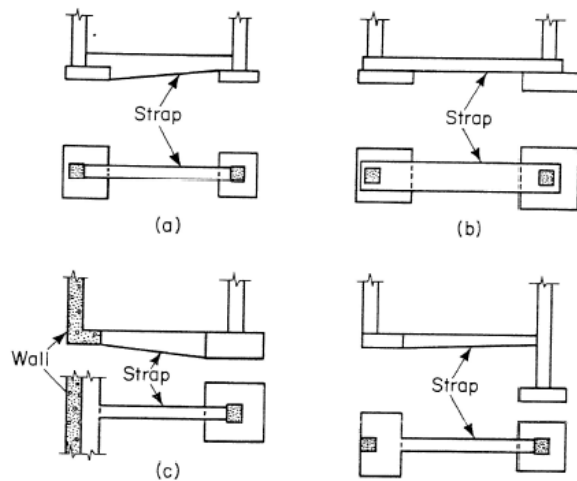


Figura 1.23. Soluciones para cimentaciones aisladas con viga centradora. Teng [10].

Los modelos incluyen una viga riostra de ancho constante o variable, y con cantos, bien embebidos en el canto de las zapatas, o bien dispuestos sobre ellas.

Los supuestos adoptados para el análisis de la solución son:

- La viga de unión es infinitamente rígida. De este modo la viga transmite la carga de los soportes al terreno, provocando que las zapatas transmitan una tensión uniforme e igual al terreno.
- La viga únicamente trabaja a flexión, no transmitiendo tensiones al terreno, para lo que indica la necesidad de escarificar el terreno antes de la colocación del hormigón de limpieza en estos elementos.

Así pues, el modelo para el análisis, corresponde a una viga infinitamente rígida biapoyada sobre los dos soportes como muestra la siguiente figura:

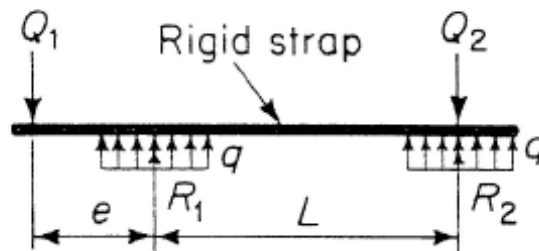


Figura 1.24. Modelo análisis Zapata aislada con viga centradora. Teng [10].

Y de su análisis se obtendrán los esfuerzos de diseño de la misma. Dado el levantamiento producido sobre la zapata interior, para el análisis de la misma habrá que suponer que sobre el soporte 1, solo actúa la carga debida a peso propio, situación que generara la mínima carga de levantamiento en la zapata interior y por tanto, la máxima carga vertical de diseño del cimiento.

Las zapatas, por su parte, se calcularán como zapatas aisladas, sometidas a los esfuerzos determinados en las secciones de referencia y actuando sobre el terreno, las tensiones determinadas a través del modelo de viga indicado.

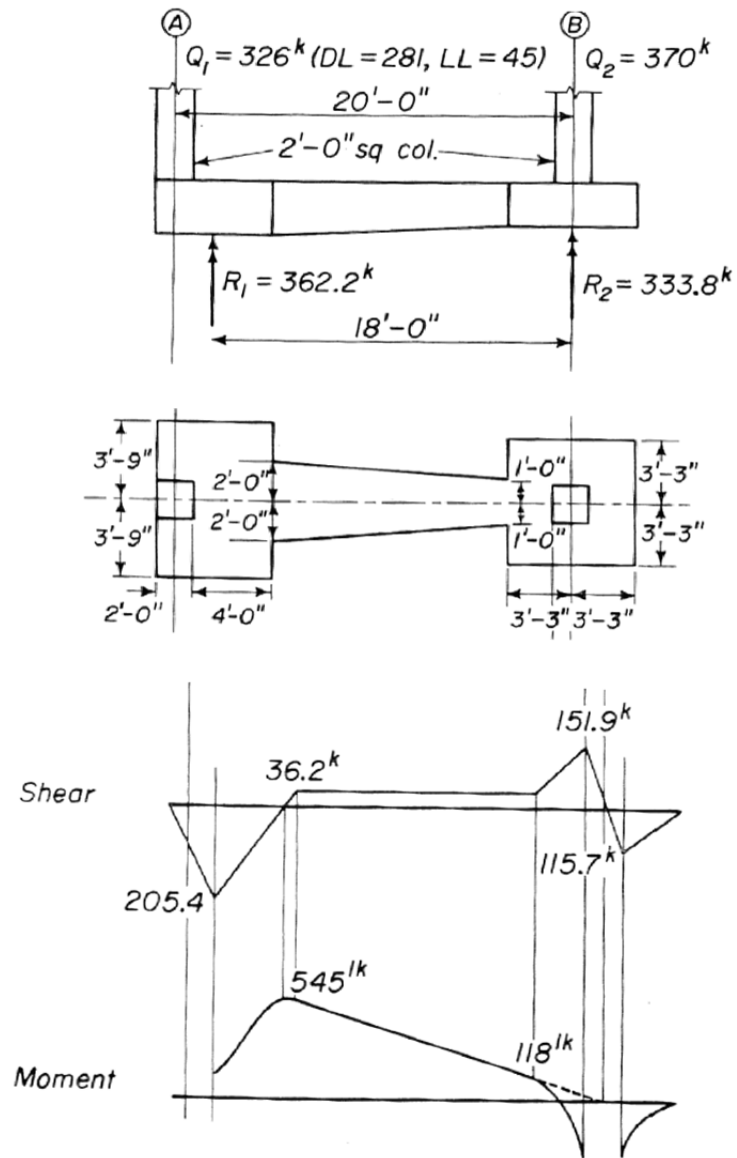


Figura 1.25. Diagramas de esfuerzos zapata aislada con viga riostra. Teng [10].

Finalmente se incluye un ejemplo para un caso de viga riostra de ancho variable a partir de cuyos resultados podemos comprobar el patrón de armado propuesto:

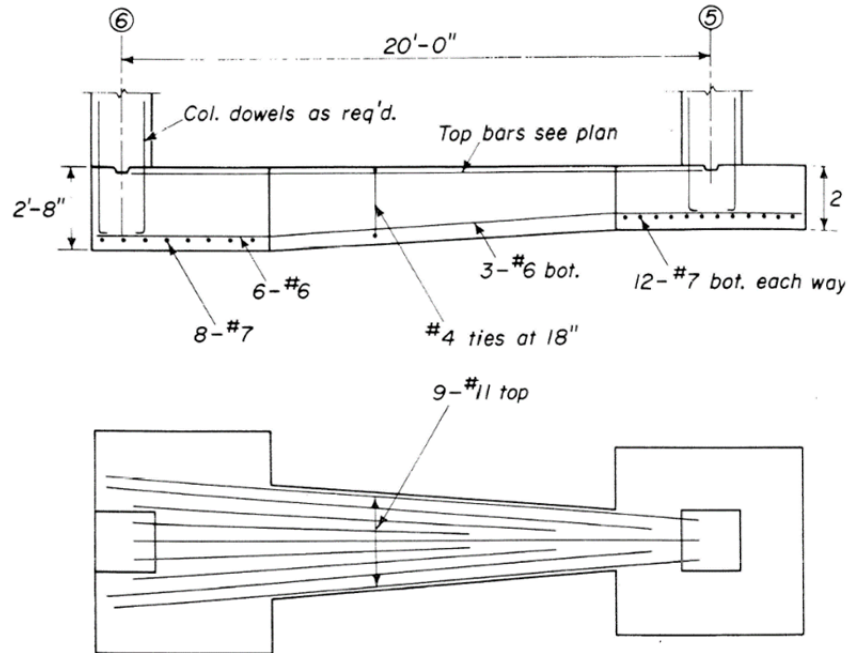


Figura 1.26. Patrón de armado zapatas aislada con viga riostra. Teng [10].

En relación a las zapatas combinadas y losas, se plantean varios métodos de diseño:

- Método convencional o Método rígido.
- Método elástico simplificado.
- Método elástico General.

Método convencional o Método rígido. En él se asumirá:

La cimentación es infinitamente rígida y por tanto la deformación de la misma no influye en la distribución de presiones en el terreno. La presión del terreno sigue una distribución lineal, de tal forma que el centroide de las presiones, coincide con la resultante de las fuerzas actuantes.

Así pues, el modelo pasará a ser el de una viga biapoyada en los dos soportes, de cuyo análisis se extraerán los esfuerzos de diseño de la misma.

La publicación incluye un ejemplo de diseño de cimentación combinada de ancho constante, del que se puede comprobar el patrón de armado adoptado.

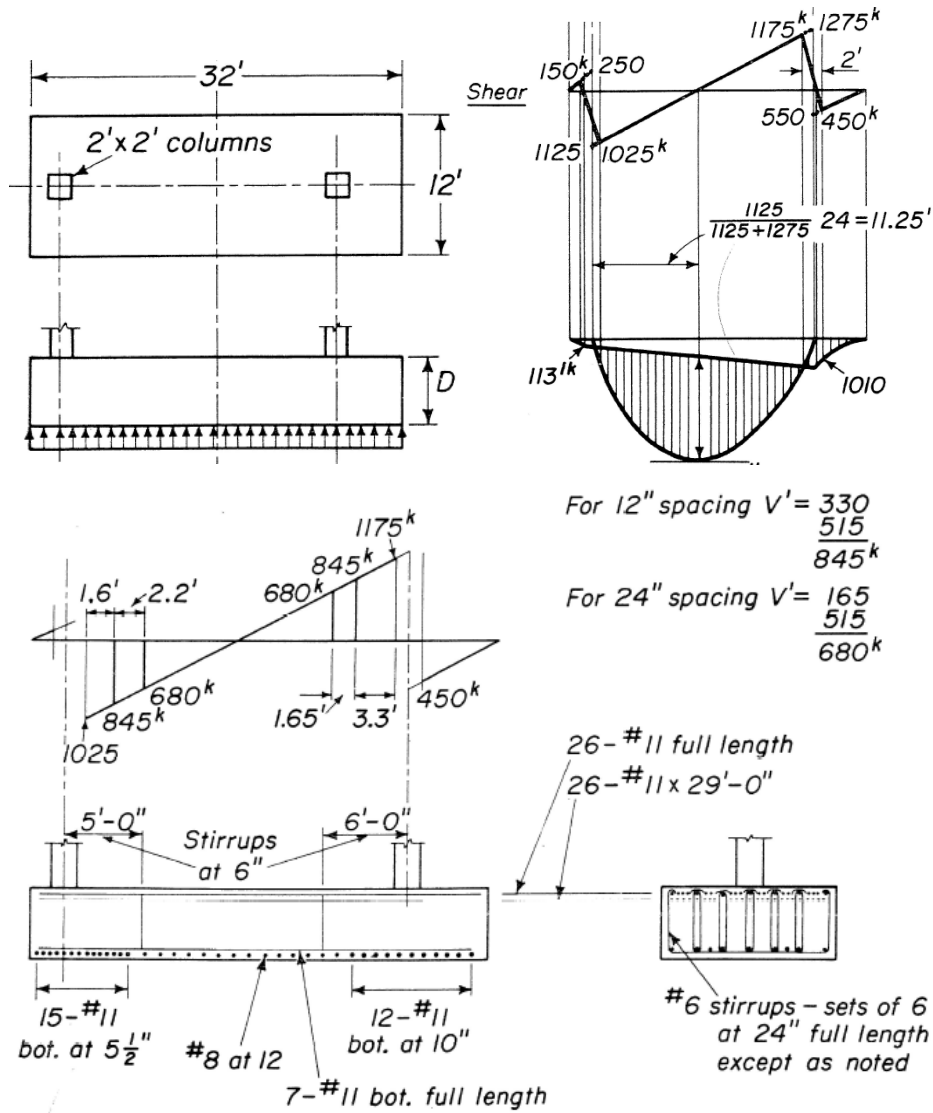


Figura 1.27. Zapatas combinadas rígidas. Teng [10].

Método elástico simplificado, que asumirá que el cimiento no es infinitamente rígido y el comportamiento del terreno se asemeja a un número infinito de resortes, cuyo comportamiento es independiente uno de otro. Los resortes



funcionarán a compresión mediante una ley proporcional entre presión y desplazamiento a través de la constante K del resorte.

Así, de la ecuación de la elástica:

$$\frac{M}{E \cdot I} = \frac{d^2 y}{d x^2}$$
$$\frac{d}{dx} \left( \frac{M}{E \cdot I} \right) = V$$
$$\frac{d}{dx} \cdot V = q$$

Donde:

M. Es el momento actuante en un punto x, de la viga.

x: es la posición longitudinal.

y: Es el asiento del cimiento.

V: Es el esfuerzo cortante actuante en el punto x.

q: Es la reacción de la cimentación en el punto x.

E: Es el módulo de elasticidad.

I: Es la inercia de la sección del cimiento.

Asignando un comportamiento a los resortes caracterizado por:

$$q = -y \cdot B \cdot k$$

Donde

B: Es el ancho del cimiento

K: Es el coeficiente de reacción

Sustituyendo en la ecuación inicial:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{d x^4} = -y \cdot B \cdot k$$

Método elástico General. Este es el último método aportado y se corresponde con el caso anterior, con la salvedad de que el modelo del suelo corresponderá

con un sólido elástico que seguirá la ley de Hooke en todas direcciones. Dada su complejidad de aplicación se restringe a casos muy sencillos.

**Dunham [11], en 1962**, en su libro “Cimentaciones de Estructuras” también trata con extensión la mayoría de casos expuestos ya por **Teng [10]**.

En el capítulo 4 de su libro, trata algunas cuestiones generales de las cimentaciones, como la posible distribución de tensiones transmitidas al terreno.

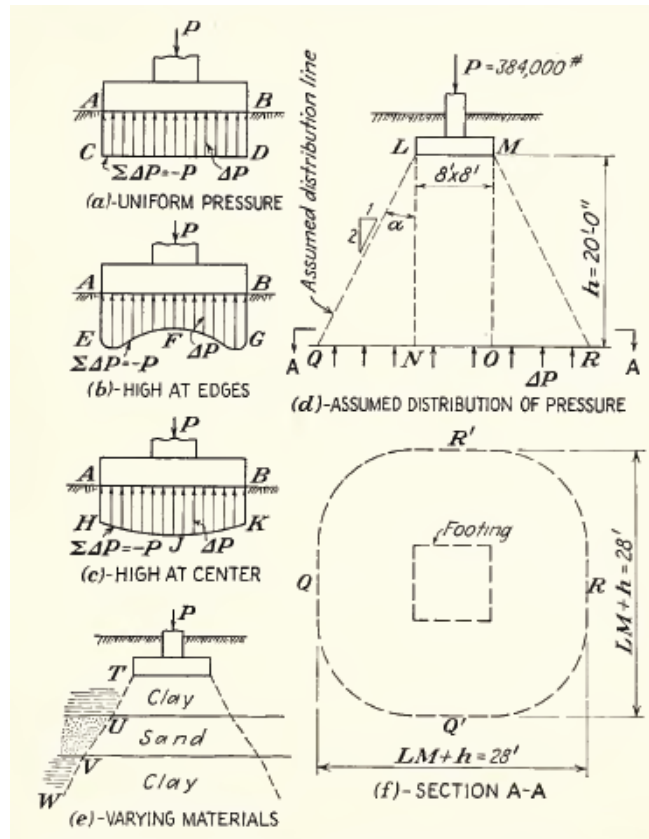


Figura 1.28. Distribución de tensiones sobre el terreno. Dunham [11].

En el Capítulo 5, se trata las zapatas, donde se incluye el análisis de distintos tipos de zapatas aisladas (sobre pedestales, de hormigón en masa, circular, escalonada) y zapatas combinadas.

Para el caso de las zapatas aisladas, al igual que Teng [10], establece las secciones de referencia para cálculo de esfuerzos de acuerdo al Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-56) tal y como se muestra en la siguiente figura:

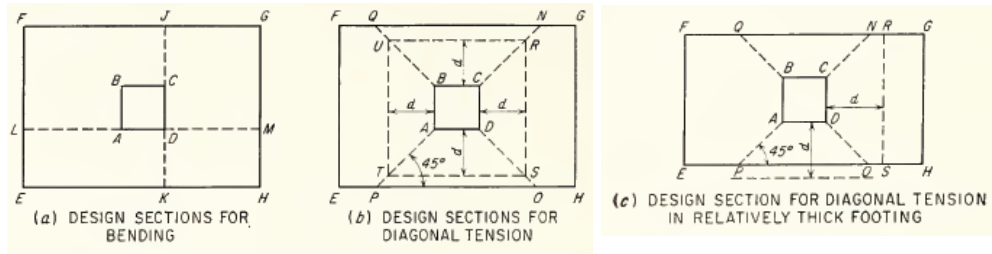


Figura 1.29. Secciones referencia cálculo zapatas aisladas. Dunham [11].

Aportándose así mismo, algún esquema de armado de las mismas:

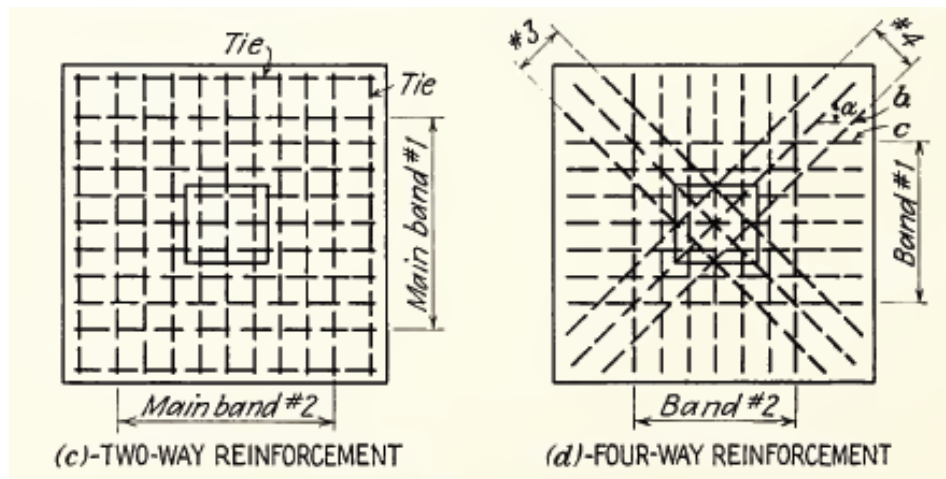


Figura 1.30. Patrones de armado zapatas aisladas. Dunham [11].

En relación a las zapatas combinadas, indica las circunstancias en las que son de aplicación:

- Caso de soportes próximos a línea de fachada.
- Caso de soportes próximos entre sí.
- Caso de proyectarse un arriostramiento entre zapatas para resistir esfuerzos de subpresión, vuelco o fuerzas horizontales opuestas.
- Caso de estructuras de dos o más soportes apoyados sobre suelos de baja capacidad.

En las siguientes figuras se pueden ver algunos de los casos:

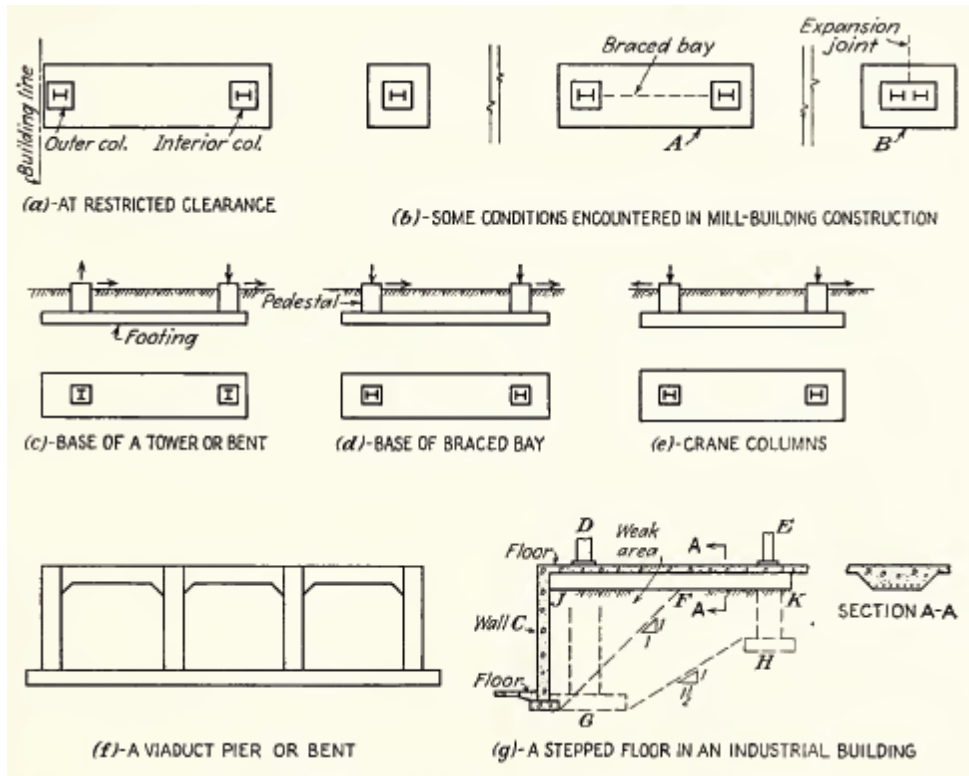


Figura 1.31. Zapatas combinadas. Dunham [11].

Dentro de las zapatas combinadas, además de las dispuestas con ancho constante, incluye un nuevo modelo al que denomina, “Zapata combinada asimétrica”, con el objeto de conseguir que el centro de gravedad del cimiento coincida con la resultante de las cargas.

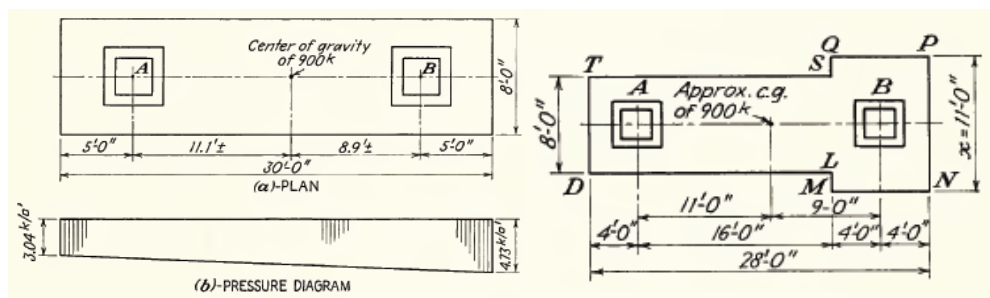


Figura 1.32. Zapata combinada asimétrica. Dunham [11].

Del mismo modo, incluye zapatas combinadas con nervios rigidizadores y zapatas combinadas de forma trapezoidal.

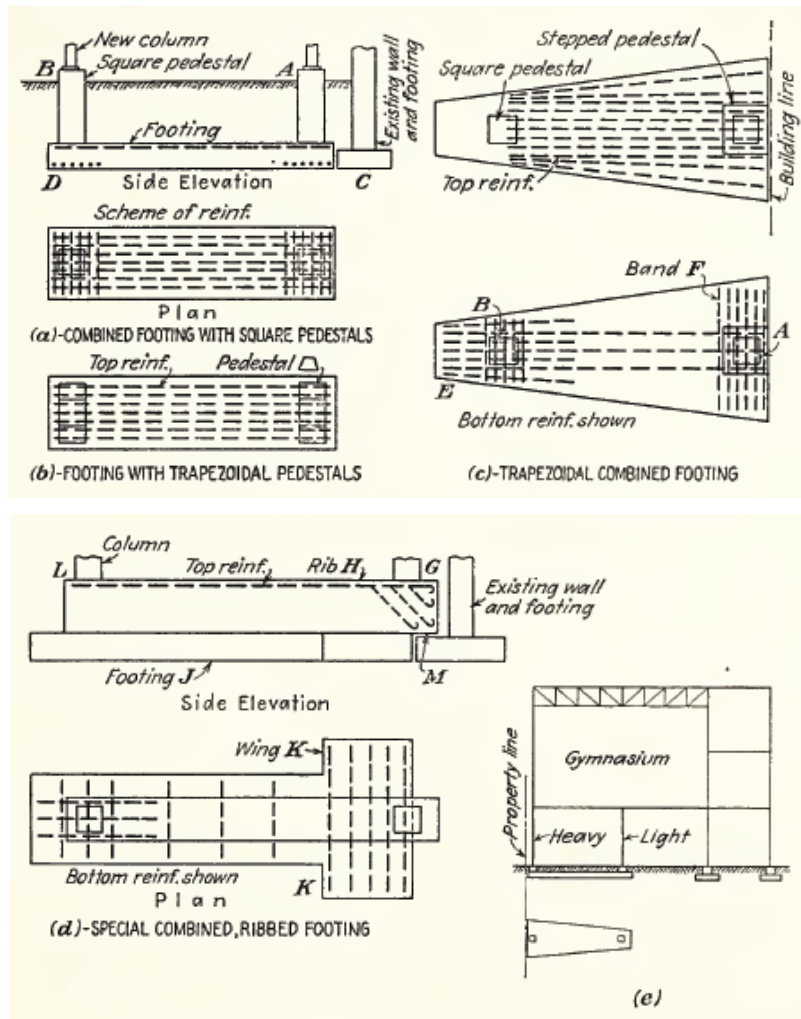


Figura 1.33. Zapata combinadas con nervios rigidizadores y trapezoidales. Dunham [11].

En el libro se incluyen varios ejemplos de cálculo de cada uno de los modelos indicados.

**Guerrin [12]** en 1967, en su libro *Traité de Béton Armé, Tome III Les Fondations, Quatrième Edition*, también desarrolla en profundidad diversos modelos para la resolución de elementos de cimentación. Así, el “capítulo 2” de su libro se dedica a las zapatas de cimentación, haciendo un repaso por los distintos repartos de presión posi-

bles bajo la zapata, así como un análisis de varios métodos de cálculo, incluido el de bielas y tirantes para zapatas rígidas, desarrollado por M. Lebelle.

En el apartado B del “capítulo 2” incluye un análisis de cimentación para dos o más soportes, incluyendo zapatas combinadas de anchos constante y zapatas trapezoidales.

El apartado C del capítulo 2 se dedica a las zapatas aisladas distinguiendo entre:

- Rectangulares
- Paralelepípedos
- Trapezoidales (rígidas y flexibles)
- Nervadas
- Circulares
- Troncocónicas
- Cónica hueca

Se aportan, así mismo, algunos esquemas de armado de cada una de las zapatas.

El punto 24 de la publicación se dedica a las zapatas sometidas a esfuerzos de flexión en ambas direcciones, incluyendo gráficos para su resolución.

El apartado D del capítulo 2, se dedica al análisis de zapatas excéntricas, concluyendo que las mismas presentan el problema de las altas presiones transmitidas al terreno:

Como solución propone diversas alternativas:

- Zapata con base rígida  
Zapata excéntrica sobre pozo. De forma que la masa adicional del pozo consigue centrar la resultante.
- Pórtico desalineado.  
Modelo conectado a la estructura. De forma que la excentricidad se absorbe mediante un tirante en la parte superior del soporte.
- Viga en báscula.  
Disposición de una viga que conecta la zapata excéntrica con una zapata o muro interior y que equilibra la excentricidad existente.

Finalmente el punto 2 del capítulo 2, se dedica a las losas de cimentación, el punto 3 a soluciones mediante pozos y el punto 4 a soluciones mediante pilotes.

**Bowles [13]**, en 1968, en su libro *Foundation Analysis And Design*, analiza diversos modelos de cálculo asociados a distintas tipológicas de cimentación. Así, en su Capítulo 8, se describen y aportan las reglas de diseño para el caso de cimentaciones mediante

zapatas aisladas sometidas a carga vertical y momentos en uno o dos planos, para cuyo diseño se aplican los criterios descritos en la norma ACI.

Por su parte, el capítulo 9, se dedica a la explicación de los modelos de cimentación mediante zapatas combinadas, definidas como aquellas que reciben las acciones de más de un soporte.

En la siguiente figura, el autor muestra los modelos indicados anteriormente (zapatas combinadas de ancho constante o variable y zapatas aisladas):

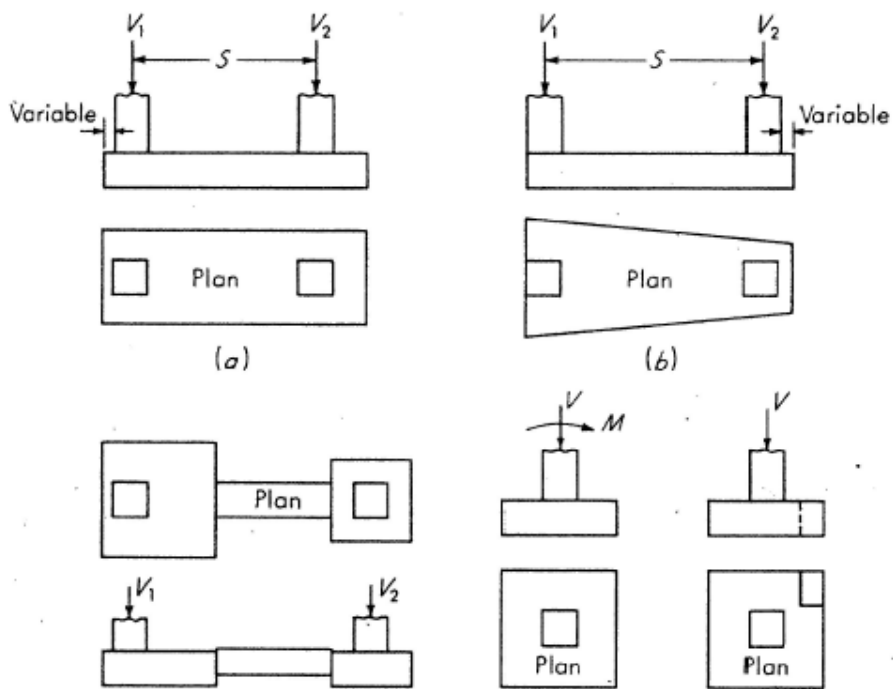


Figura 1.34. Modelos zapata combinada. Bowles [13].

Para el análisis de las zapatas combinadas, se parte de los supuestos de que la misma presenta un comportamiento rígido, resultando una distribución lineal de presiones sobre el terreno. Analizando la zapata como una viga biapoyada sobre los soportes se obtienen los esfuerzos de diseño de la cimentación:

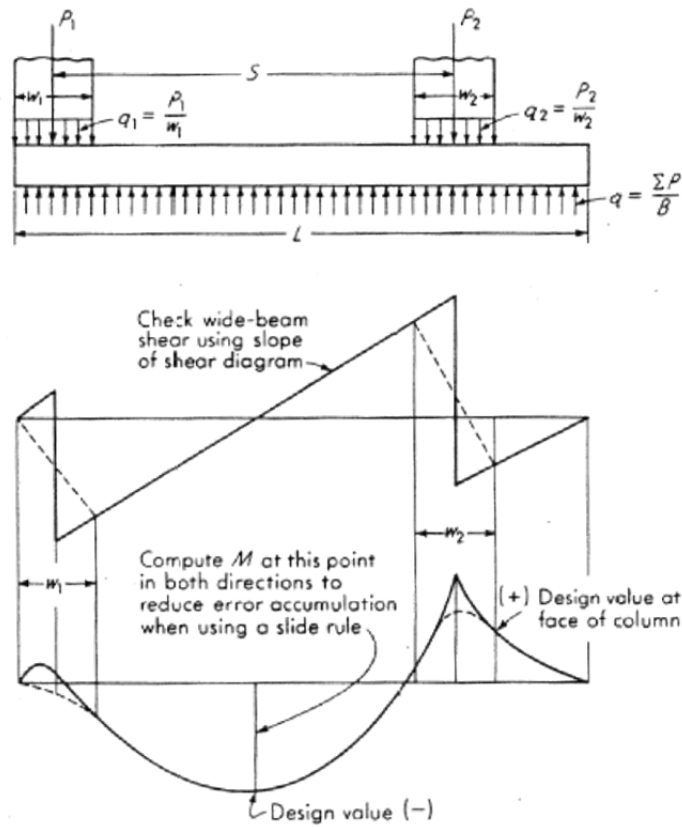


Figura 1.35. Zapata combinada. Esfuerzos de diseño. Bowles [13].

En el texto se desarrolla un ejemplo de aplicación del modelo propuesto, a través de cuyas figuras se puede apreciar el modelo de armado dispuesto.

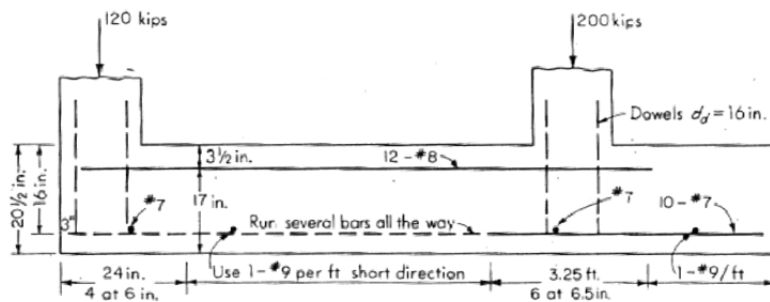


Figura 1.36. Patrón de armado zapata combinada. Bowles [13].



Del mismo modo, el texto incluye una variante al modelo de zapata combinada anterior, disponiendo una solución mediante anchos variables.

Esta última solución, se plantea en los casos en que la limitación del vuelo de la zapata de medianera sea importante, o las cargas de los soportes desiguales, ya que permite buscar geometrías que hagan coincidir la resultante de las cargas con el centro de gravedad de la sección. El modelo de basa en el planteamiento de una viga rígida apoyada en los soportes, supuesto cimiento rígido y presiones sobre el terreno uniformes

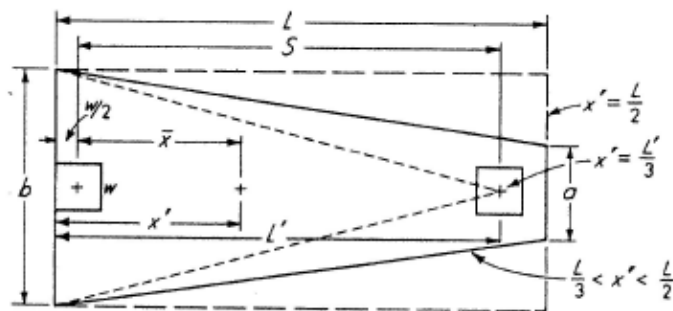


Figura 1.37. Zapata combinada de ancho variable. Bowles [13].

Sobre este modelo, también se desarrolla un ejemplo, aunque parcialmente, no llegándose a incluir en el texto el modelo de armado dispuesto para esta solución.

Por último, se desarrolla una solución mediante la disposición de dos zapatas aisladas unidas mediante una viga. Esta solución se propone cuando la distancia entre soportes es elevada, y una solución mediante zapata combinada daría como resultado momentos elevados o cuando la posición del centro de gravedad de la sección se sitúa por debajo de 1/3 de la Longitud de la zapata.

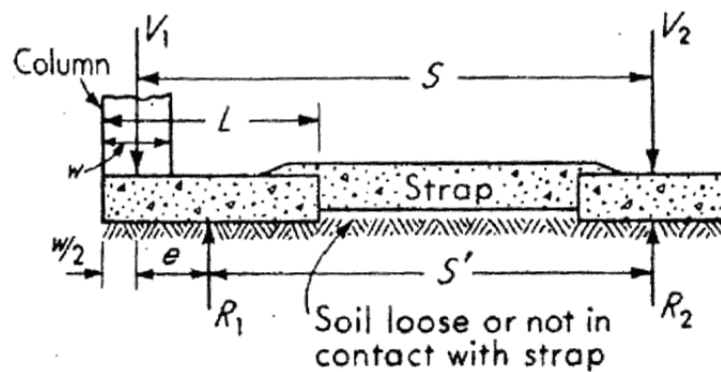


Figura 1.38. Zapatas aisladas unidas mediante viga. Bowles [13].

El modelo de cálculo propuesto consiste en disponer un elemento de unión entre las zapatas aisladas, que se encargará de transmitir el momento de la zapata exterior. Para el análisis del momento, se impondrá la condición de tensión uniforme bajo cada cimiento aislado y se procede al análisis del sistema como una viga apoyada en los soportes. Los gráficos de esfuerzos obtenidos se muestran a continuación:

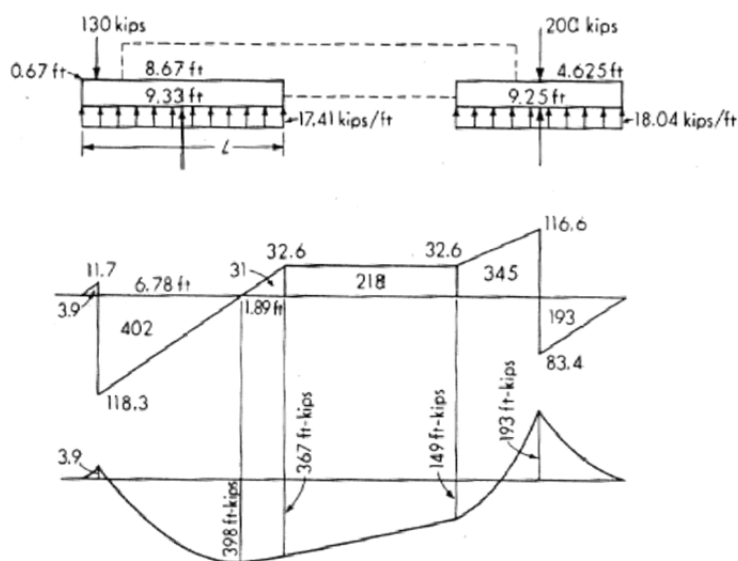


Figura 1.39. Esfuerzos de diseño. Zapatas aisladas unidas con viga. Bowles [13].

Salas [14], en 1980, en la primera parte de su volumen III, *Geotecnia y Cimientos*, distingue entre cimentaciones superficiales, semiprofundas y pilotajes. Dentro de las cimentaciones superficiales diferencia entre las siguientes tipologías:

- Viga flotante. Cimentación constituida por una viga continua sobre la que apoyan dos o más soportes.
- Zapatas. Donde además de tratar las zapatas aisladas tradicionales, incluye otras tipologías como son, zapatas combinadas, corridas, de medianería.
- Losas. Describas como una zapata de grandes dimensiones, que recibe la carga de varios soportes.

En relación a las zapatas, se aportan métodos de cálculo para las tensiones transmitidas al terreno, tanto aplicando teorías del coeficiente de balasto como de la elástica. Se aportan criterios de rigidez y se incluye el método de análisis de bielas y tirantes propuesto por Lebellet.

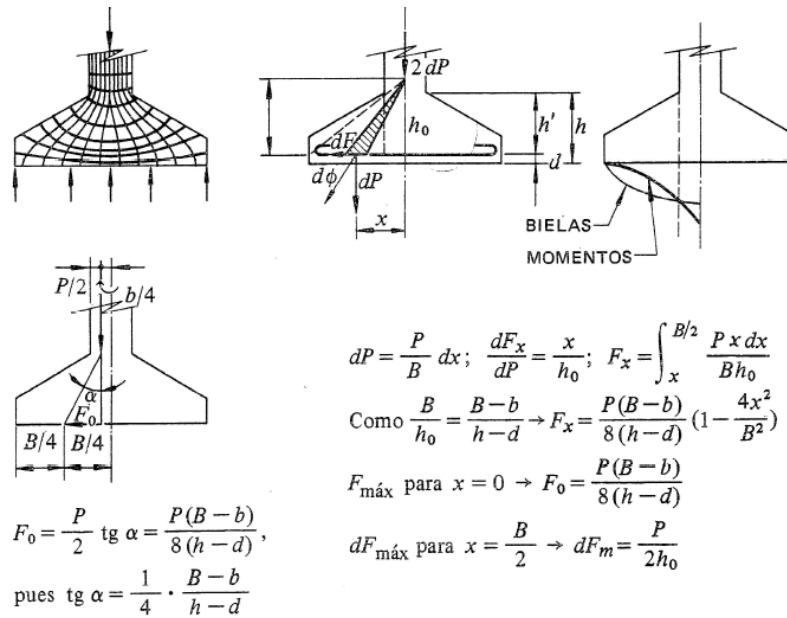


Figura 1.40. Método de análisis de bielas y tirantes. Salas [14].

Como caso especial, se incluye el relativo a una cimentación de medianera, para el que se dan distintas soluciones:

- Mediante un tirante en el forjado superior.
- Mediante zapatas corridas.
- Mediante zapatas combinadas.

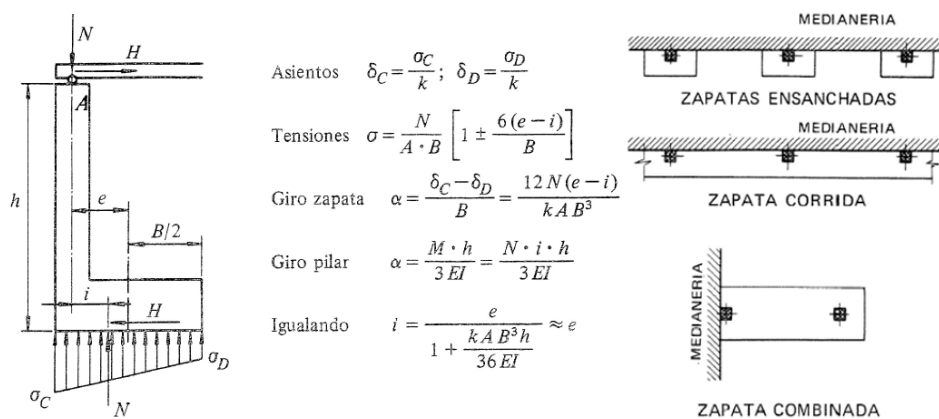


Figura 1.41. Modelos de cimentación de medianería. Salas [14].

Tal y como se indica en **Salas[14]**, el cálculo de las presiones de contacto en la base de cimientos, rigideces o flexiones representa un problema complejo en el campo de la elasticidad, habiéndose resuelto únicamente algunos problemas particulares de forma y cargas. Como modelos matemáticos alternativos, el más habitual, es el introducido por Winkler en 1867 y que sirvió de base para el trabajo de Zimmermann del análisis de los carriles sobre traviesas de ferrocarril, llamado “método del coeficiente de balasto”.

#### Método del coeficiente de Balasto.

El método consiste en la suposición de que el asiento es proporcional a la presión en cualquier punto de la viga.

$$p = k_s \cdot y$$

Donde  $y$  es el asiento y  $k_s$  la constante de proporcionalidad o coeficiente de balasto.  $k_s$  tiene unidades de densidad, por lo que se corresponde a suponer la viga flotando sobre un líquido de densidad  $k_s$ . Esta hipótesis no está comprobada en la práctica, como en los casos donde existan capas compresibles solo en una parte de la viga, situación bastante habitual en la práctica,

Así pues, el método descrito presenta algunos inconvenientes como son;

- Supone que cada punto del suelo se comporta de forma independiente de las cargas existentes en sus alrededores.
- No incluye el efecto de la naturaleza del terreno en superficie
- No incluye la presencia de capas compresibles en profundidad
- No tiene en cuenta el efecto de la forma y dimensiones de las cimentaciones
- No tiene en cuenta el nivel de las cargas aplicadas.

La determinación del Módulo de balasto podrá realizarse:

- A partir de ensayos de carga con placa.
- A partir de la determinación de parámetros de deformabilidad representativos del terreno bajo la zona de influencia de la cimentación, ya sea mediante ensayos in situ o en laboratorio y el posterior cálculo geotécnico de asientos.

La conversión del módulo de placa de 30cm al coeficiente de referencia se realizará con las siguientes expresiones:

Para terrenos cohesivos:

$$k_{sB} = k_{sp30} \cdot \frac{0,3}{B}$$

Para terrenos granulares:

$$k_{sB} = k_{sp30} \cdot \left( \frac{B + 0,3}{2 \cdot B} \right)^2$$

Estas formulaciones se aplican sobre zapatas cuadradas. Para zapata rectangular se aplicará la corrección:

$$k_{sB,L} = k_{spB} \cdot \left( 1 + \frac{B}{2 \cdot L} \right)$$

Determinación de las ecuaciones diferenciales.

En la publicación de Salas [14], se incluye así mismo el análisis y determinación de las ecuaciones diferenciales para el caso de una viga solicitada por cargas verticales y pares cualesquiera, que descansa sobre un apoyo continuo, del que recibe reacciones verticales por unidad de superficie.

En la citada referencia se incluyen la resolución de algunos casos particulares de vigas infinitas y semi-infinitas. Para vigas de longitud finita, Salas [14] describe los siguientes métodos;

- Método de Timoshenko-Hetenyi.
- Método de Bleich.
- Método de Magnel.

**Calavera [15] en 1982**, en su publicación “*Cálculo de estructuras de Cimentación*” describe varios modelos de cálculo para solucionar el problema, recopilando gran parte de lo expuesto en las anteriores referencias y aportando ejemplos y algunos criterios adicionales de aplicación.

En general, clasifica las cimentaciones en superficiales o profundas. Dentro de las cimentaciones superficiales se incluyen las constituidas por zapatas, vigas y placas y dentro de las profundas incluye los pilotes o pozos de cimentación.

El Capítulo 3, se dedica al análisis de zapatas aisladas, incluyendo situaciones con la acción de momentos en dos direcciones

Por otro lado, dedica el Capítulo 4 a la descripción de modelos de cimentación para zapatas de medianera. En él, se incluyen los siguientes modelos de cimienta:

- Zapata Excéntrica con reacción en la estructura del piso superior y distribución de presiones constante o variable.

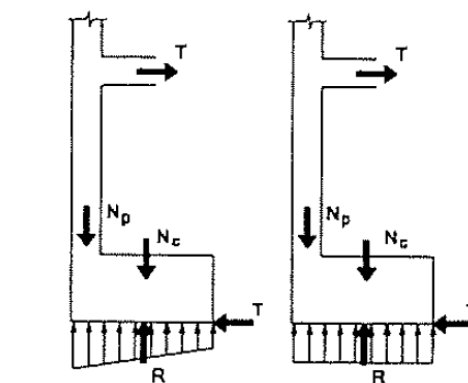


Figura 1.42. Zapata excéntrica. Reacción estructura del piso superior. Calavera [15].

En este modelo, la excentricidad de la resultante,  $R$ , se equilibra con una par de fuerzas horizontales  $T$ , una sobre el forjado superior que deberá ser absorbida por la armadura del mismo y otra a nivel de la cimentación que se deberá absorber por rozamiento.

Como principal inconveniente de este modelo, se indica el momento adicional producido sobre el soporte de valor igual a  $T$  por la altura, desde el forjado superior a la cota superior de la zapata.

Como caso particular de este modelo se podrían imponer las condiciones geométricas necesarias al cimiento para que la transmisión de esfuerzos al terreno siguiera una ley uniforme.

- Zapata Excéntrica y reacción mediante un tirante a nivel de la cara superior de zapata y distribución de presiones constante o variable.

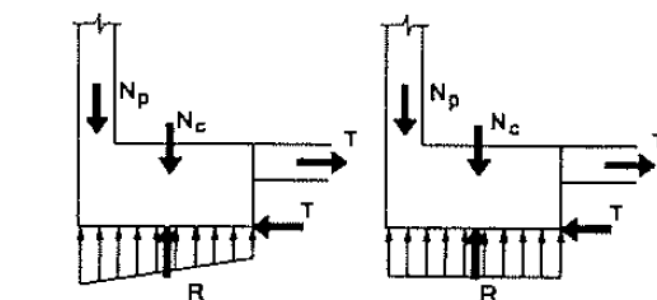


Figura 1.43. Zapata excéntrica. Reacción tirante en cara superior zapata. Calavera [15].

En este caso, la excentricidad de la reacción sobre el terreno,  $R$ , se absorbe mediante un tirante a disponer sobre la cara superior de la zapata. Al igual que en el caso anterior, el esfuerzo  $T$  deberá también ser absorbido por rozamiento.

Este modelo supone que no existe coacción al giro del soporte, como la que generaría un forjado superior, ya que en este caso aparecería una reacción  $T$  en la planta superior tal y como se indicó en el modelo anterior.

Como caso particular de este modelo se podrían imponer las condiciones geométricas necesarias al cimiento para que la transmisión de esfuerzos al terreno siguiera una ley uniforme.

- Zapata Excéntrica con viga centradora.

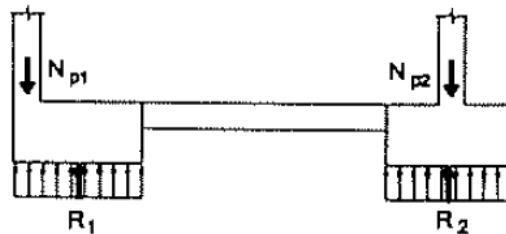


Figura 1.44. Zapata excéntrica con viga centradora. Calavera [15].

El modelo consiste en la disposición de una viga entre la zapatas de medianería y la zapata interior, denominada viga centradora, ya que su función será la de centrar la carga para conseguir una distribución lineal de tensiones bajo los cimientos.

Atendiendo a las características de la viga, aparecerán varios modelos con viga de ancho y canto constante, de canto variable igual al de las zapatas o de canto superior al de las zapatas.

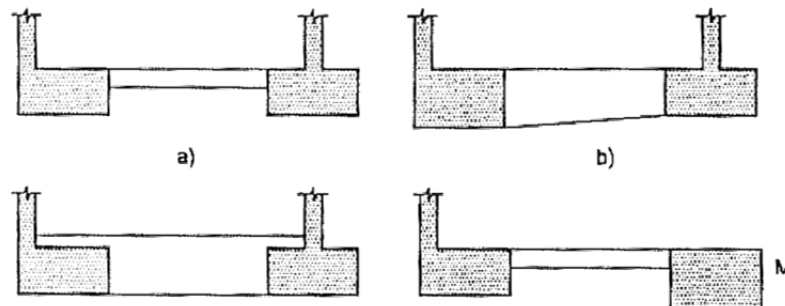


Figura 1.45. Zapata excéntrica con viga centradora. Calavera [15].

Como características de este modelo, se destaca la obtención de un valor de esfuerzo vertical actuante sobre la zapata de medianera, superior al esfuerzo vertical de este soporte y consecuentemente un levantamiento generado en la zapata interior.

- Zapata retranqueada.

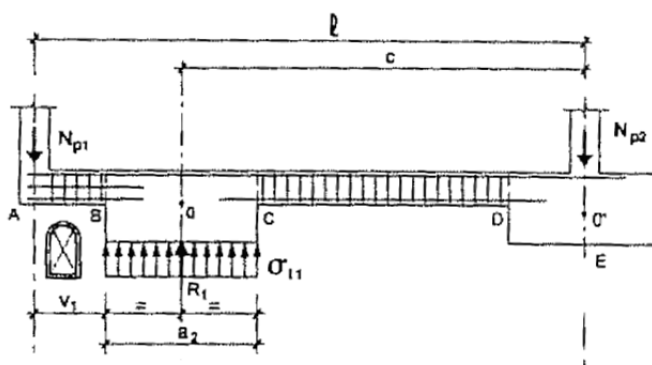


Figura 1.46. Zapata retranqueada. Calavera [15].

Caso particular, donde bajo el soporte de medianera, no es posible disponer el elemento de cimentación, retranqueándose la disposición de la zapata bajo el soporte y disponiendo una viga en voladizo de soporte a zapata retranqueada y una viga centradora entre zapatas.

- Zapata corrida con voladizos.

Caso particular cuando ambos soportes correspondan a medianerías. Se aporta el siguiente modelo, indicando que es poco utilizado en la práctica.

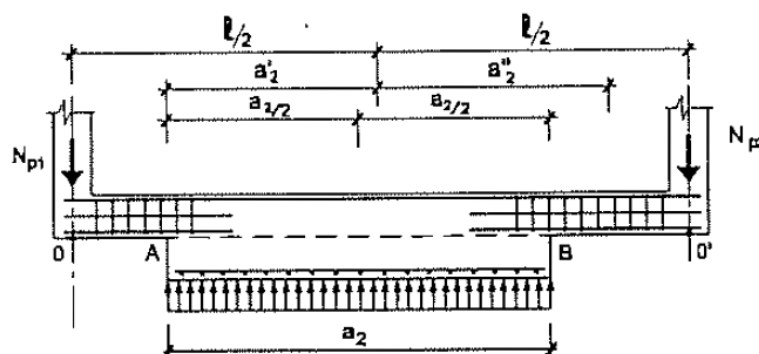


Figura 1.47. Modelo para zapata corrida con voladizos. Calavera [15].



Calavera [15], hace una breve discusión sobre los distintos modelos propuestos:

- Zapatas excéntricas con tracción absorbida por la estructura de techo.
- Zapata excéntrica absorbiendo la tracción con un tirante enterrado.
- Disposición de viga centradora.

Considerando, como el más adecuado económicamente, el correspondiente a la disposición de viga centradora, sobre todo ante esfuerzos axiales importantes, teniendo la ventaja de no transmitir momentos adicionales al soporte. Destacar que en este caso no se han considerado otras alternativas, como las relativas a la disposición de zapatas combinadas de anchos variables o constante. El Capítulo 5 se dedica al análisis de zapatas de esquina, elementos sin interés en el presente estudio. El Capítulo 6 de la publicación se dedica a los modelos de cimentación mediante zapatas combinadas, definidos como zapatas que reciben la carga de varios soportes. Se aportan varias alternativas, desde zapatas combinadas de ancho constante, trapezoidales o con secciones en 'T' invertida:

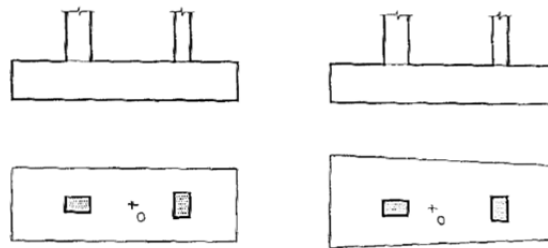


Figura 1.48. Modelo para zapata combinada. Calavera [15].

Se aporta como criterio de buena práctica, intentar el dimensionado de estos elementos de forma que coincida el c.d.g. de la sección con el de las acciones. Las hipótesis de partida serán la de verificar que el cimiento se comporta rígidamente para lo se aportan las relaciones a cumplir.

$$l_2 \leq 1,75 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{k_c \cdot b}} \quad l_1 \leq 0,88 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{k_c \cdot b}} \quad l_3 \leq 0,88 \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{k_c \cdot b}}$$

En el texto se incluyen ejemplos de aplicación, a través de los cuales se aprecia el patrón de armado considerado. El Capítulo 7 se dedica a la descripción de las soluciones de cimentación mediante vigas de cimentación, definidas como aquellas sobre las que apoyan 3 o más soportes aunque los métodos son aplicables a cimentación combinadas para dos soportes.

Dada la complejidad de la resolución del problema se plantean 3 alternativas de cálculo.

- Suponer el Cimiento Rígido (Indeformable). El terreno no situado bajo el cimiento no experimenta deformaciones.
- Suponer una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes. El terreno no situado bajo el cimiento no experimenta deformaciones.
- Plantear el problema de forma general. El terreno que no se sitúa bajo el cimiento experimenta deformaciones bajo la acción de este.

Por otro lado, se indica la necesidad de considerar la rigidez de la estructura en relación con la del cimiento y del terreno. Así se plantean los siguientes casos:

- 1.- Cimiento Rígido – Estructura Rígida.

Primero se comprobará que el cimiento verifica las condiciones de rigidez.

Posteriormente, a través de las condiciones de equilibrio se obtendrá el valor y posición de la resultante de esfuerzos transmitidos por la estructura y a partir de ellos se obtendrá la ley de distribución de presiones sobre el terreno. El cálculo estructural como elemento de hormigón seguirá los mismos casos que los descritos para zapatas combinadas.

- 2.- Cimiento Rígido o Flexible – Estructura Flexible.

Basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimiento al suelo y el asiento en este mismo punto. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga pero sin estar coaccionado por otros a través del cimiento.

$$y = \sigma / K$$

Donde K es el llamado Módulo de Balasto del terreno.

Partiendo de la ecuación de la curvatura en piezas lineales flectadas:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

Como:

$$\frac{dM}{dx} = -V \quad \text{y} \quad \frac{dV}{dx} = q \cdot b - \sigma \cdot b$$

Siendo b el ancho del cimiento

Operando, suponiendo que  $EI$  es cte:

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{d^2M}{dx^2} = q \cdot b - \sigma \cdot b = b(q - K \cdot y)$$

Siendo  $K$  el llamado Módulo de balasto del terreno. Con lo que:

$$\frac{d^2M}{dx^2} = -E \cdot I \cdot \frac{d^4y}{dx^4} \rightarrow E \cdot I \cdot \frac{d^4y}{dx^4} + K \cdot b \cdot y - q \cdot b = 0$$

La integración de la ecuación de diferencias, dará como resultado la ecuación de la deformada.  $y=f(x)$ . A partir de ella se obtendrá la ley de presiones sobre el terreno:

$$\sigma = K \cdot f(x)$$

Y a partir de ella, la ley de momentos actuantes:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2y}{dx^2}$$

– 3.- Cimiento Flexible – Estructura Rígida.

En este caso, la gran rigidez de la estructura hace que los puntos de enlace de los soportes con el cimiento no puedan asentar más que manteniéndose todos alineados. No existe una solución práctica, aportándose un método simplificado obtenido de “Guide Veritas du Batiment” Editions du Moniteur, Paris 1981, cuya aplicación se resume en los siguientes puntos:

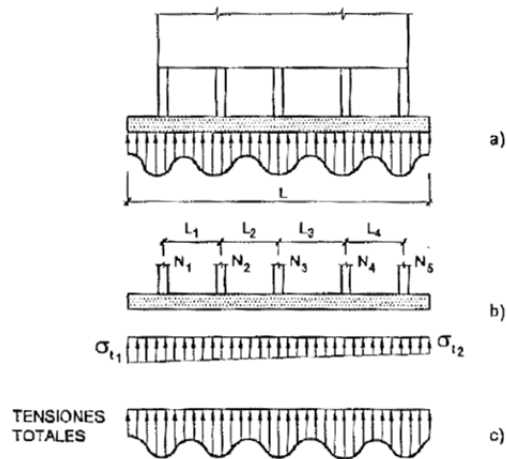


Figura 1.49. Modelo cimiento flexible – estructura rígida. Calavera [15].

La distribución de tensiones en el terreno se considerará suma de una distribución lineal (b) y otra correspondiente a una viga flotante (a).

La ley de presiones lineal se calculará para una carga en soportes de valor  $P_{il} = \beta \cdot P_i$ , considerándose el cimiento rígido.

El resto de la carga inicial,  $(1 - \beta) \cdot P_i$ , determinará la ley de presiones considerando una viga flotante.

Una vez determinada la ley de presiones sobre el terreno total (suma de a+b), el cálculo estructural del cimiento seguirá lo ya descrito en los modelos de zapata combinada.

El capítulo 8 describe soluciones de cimentación mediante emparrillados, el capítulo 9 se encarga de las placas de cimentación mientras el capítulo 10 se dedica a los muros de cimentación, sin aplicación al presente trabajo.

En el capítulo 10, se hace un repaso a la solución de cimentación mediante pozos. Descrita como una solución intermedia entre las cimentaciones superficiales y la cimentación por pilotes, aportándose varias alternativas.

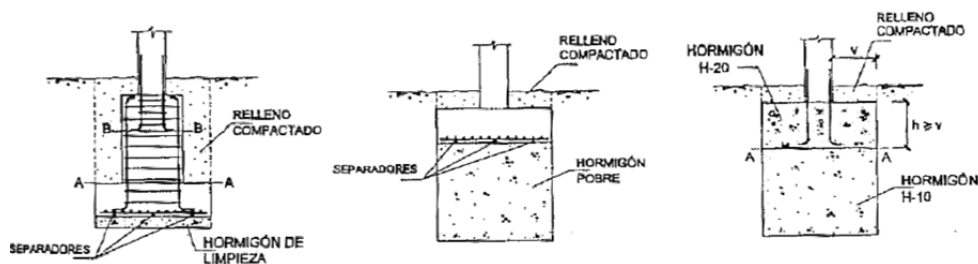


Figura 1.50. Modelo para cimiento mediante pozos. Calavera [15].

La utilización de estos elementos se especifica para los casos donde el terreno adecuado se sitúa a una profundidad entre 4 a 6 m

Finalmente, en el Capítulo 10 se describen las soluciones de cimentación profunda mediante pilotes.

Como se puede apreciar, es amplio el número de modelos de cálculo planteados, si bien no existe bibliografía que recoja el estudio comparativo de los mismos y que permita la elección en cada caso del más recomendable.

A nivel normativo, tanto la normativa Española como la de otros países del entorno, han contemplado desde sus primeras versiones, las cimentaciones mediante zapatas aisladas, pero no así otro tipo de soluciones de cimentación.

La primera instrucción Española publicada por el Ministerio de Obras Públicas, hoy Ministerio de Fomento, fue la EH de 1968 [16], si bien con anterioridad estaba vigente una instrucción para el proyecto de obras de hormigón promulgada en 1939, existiendo unas normas para el cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado de la Dirección General de Arquitectura de 1941.

A continuación se incluye un resumen de los aspectos más destacados contemplados en las instrucciones publicadas por el actual Ministerio de Fomento.

**EH-68 [16]. “Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado”**, contemplaba en su artículo 55 los criterios de diseño y dimensionado de zapatas de cimentación aisladas.

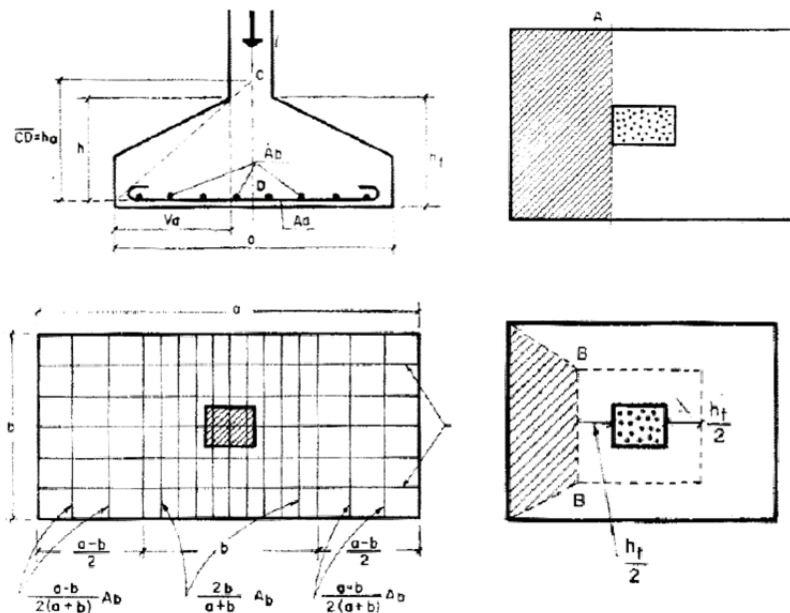


Figura 1.51. Criterios diseño zapata aislada. EH-68 [16].

La norma ya distingue entre zapatas rígidas y flexibles, en función de que el canto de las mismas fuera o no mayor del vuelo de las mismas.

A partir de esta han sido numerosas las actualizaciones realizadas sobre la normativa española, EH-73, EH-80, EH-82, EH-88, EH-91, EHE y EHE-08, no incluyéndose sin embargo en ninguna de ellas, criterios de diseño para cualquier otra tipología de cimentación, salvo los relativos a encepados de pilotes incorporados a partir de EH-91.

No ha sido hasta la aparición de la normativa, **Código Técnico de la Edificación, CTE [17]**, Parte II: Documento Básico: DB SE-C Seguridad Estructural: Cimientos. Minis-

terio de la vivienda del Estado Español. Marzo 2006. ISBN: 84-340-163-0, cuando se han incorporado algunos aspectos de diseño de ciertos elementos de cimentación.

Así CTE [17], clasifica las cimentaciones en:

- Cimentaciones directas. Aquellas que reparten las cargas de la estructura en un plano horizontal, construidas habitualmente a poca profundidad.
- Cimentaciones profundas. Cimientos dispuestos a una profundidad mayor de 8 veces su diámetro o ancho. En este apartado se incluyen los pilotes y micropilotes.

En relación a las cimentaciones directas, se recogen los tipos y su utilización más habitual. El documento establece, algunos criterios de aplicación para cada solución:

Zapatas aisladas:

- Recomendables para terrenos firmes, con tensiones de terreno medio altas. Provocan asientos pequeños o moderados.
- Si es posible, las zapatas de medianería serán de planta rectangular, preferentemente con una mayor dimensión paralela a la medianería.
- Será conveniente en zapatas fuertemente excéntricas, como las de medianería o equina, la disposición de vigas centradoras a otras zapatas para redistribuir cargas y presiones sobre el terreno. Para cumplir este objetivo se pueden disponer otras múltiples posibilidades de diseño como la contribución de forjados, tirantes etc..
- Para las vigas centradoras hormigonadas directamente sobre el terreno, se deberán considerar los posibles esfuerzos derivados del asiento previsto en las zapatas unidas por ellas. Se deberá tener en cuenta especialmente en el caso de terrenos metaestables.

Zapatas combinadas:

- Recomendadas para terrenos de pequeña o moderada capacidad portante, soportes muy próximos o cargas elevadas. También recomendable para evitar asientos diferenciales, o para situaciones con fuertes momentos en soportes.
- Establece como forma habitual las zapatas de forma rectangular, aunque puede resultar conveniente en algunos casos forma trapecial.

Pozos de cimentación:

- Se aportan dos soluciones, relleno de la excavación con hormigón pobre situando la zapata sobre el relleno o disponer la zapata a cota de terreno competente para lo que se suele necesitar un plinto de gran rigidez para evitar problemas de pandeo.

- El documento aporta todos los criterios de diseño de estos elementos salvo los relativos al diseño estructural del elemento de hormigón armado.

### Criterios de Análisis y dimensionado:

La transmisión de cargas del soporte de un edificio al terreno, es un problema complejo en el que intervienen el comportamiento de tres elementos, el edificio, el cimiento y el terreno de apoyo.

Los parámetros influyentes de cada elemento son:

- Características mecánicas y de rigidez del estrato o estratos afectados por las presiones transmitidas.
- Características geométricas, mecánicas y de rigidez del cimiento
- Características de rigidez de la estructura.

Los fenómenos de interacción suelo-cimiento-estructura que tiene lugar, incrementan notablemente la complejidad de los modelos matemáticos a utilizar, por lo que habitualmente no se tienen en cuenta algunas de las interacciones o se emplean métodos simplificados.

En la siguiente figura incluida en CTE [17], se muestra el caso de una zapata cargada y supuesta infinitamente flexible apoyada sobre un terreno horizontal. Al ser infinitamente flexible la zapata no es capaz de soportar momentos flectores y por tanto las presiones en el terreno serán idénticas a la distribución uniforme de presiones de la zapata.

Caso de que la zapata fuera infinitamente rígida, el asiento de la zapata sería también uniforme. Para casos intermedios la distribución de tensiones estará condicionada por la rigidez del cimiento.

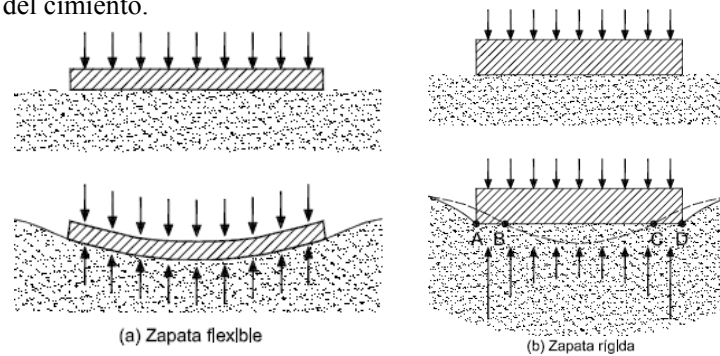


Figura 1.52. Interacción suelo-cimiento-estructura. CTE [17].

Por otro lado, la distribución de tensiones también dependerá de la rigidez del terreno de apoyo. Si el terreno se considera elástico y de resistencia indefinida, la presión bajo

los bordes A y D de la zapata rígida serían infinitos. Dado que la resistencia del terreno es limitada, dichas presión son en realidad elevadas. En el caso de estratos de arcillas, la distribución de presiones será en general semejante a la teórica de la figura anterior si bien al ser el terreno de resistencia limitada se producirán plastificaciones en los extremos del cimiento, redistribuyéndose las presiones hacia el centro de la zapata, tal y como se muestra en la siguiente figura. En el caso de arenas, dada la falta de confinamiento en el borde la zapata, supuesta en superficie, no permitirá el desarrollo de presiones elevadas en los bordes, tomando la distribución una forma parabólica como se indica en la siguiente figura:

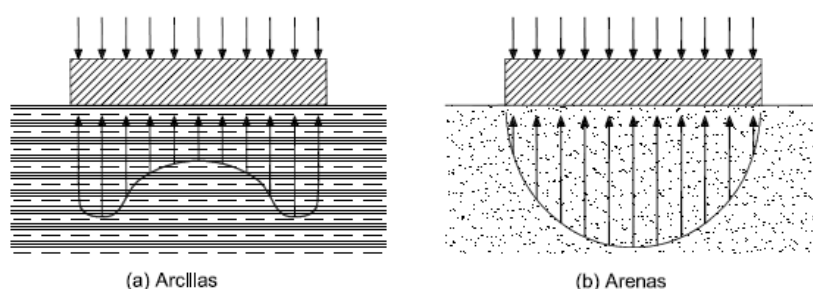


Figura 1.53. Distribución tensiones en suelos arcillosos o arenosos. CTE [17].

Para el caso de cimiento rígido sobre suelo sin cohesión, la presión en el centro de cimiento es mayor que en los bordes, puesto que en los bordes el suelo es capaz de fluir relajando su presión.

En la práctica habitual se suele adoptar una distribución uniforme de presiones, que presenta un razonable parecido a la realidad, salvo para el caso de zapata flexible apoyada en suelos sin cohesión.

#### Modelos de interacción:

El CTE establece para el caso de suelos homogéneos y edificaciones sencillas la posibilidad de emplear métodos basados en el modelado del terreno por medio de coeficientes de balasto, sistema que cuenta con una amplia experiencia práctica.

Para el caso de suelos heterogéneos en sentido horizontal o edificaciones complejas se recomienda emplear modelos más avanzados.

#### Estimación de las condiciones de Rigidez relativa terreno-estructura

Tal y como se indica en el punto E.2 de CTE [17], la rigidez relativa de la estructura con respecto al terreno se podrá evaluar con la siguiente expresión:

$$K_r = \frac{E_E \cdot I_B}{E_S \cdot B^3}$$

Siendo:



- $E_E$ : El módulo de deformación global representativo de los materiales empleados en la estructura.
- $I_B$ : El momento de inercia de la estructura, por metro de ancho.
- $E_S$ : El módulo de deformación del terreno.
- $B$ : El ancho de la cimentación.

Se considerará que la estructura es rígida en relación con el terreno cuando  $K_r > 0,5$ . Si  $K_r < 0,5$ , se considerará flexible.

Estimación de las condiciones de Rigidez de cimentaciones:

Los criterios establecidos en CTE para la estimación de un cimiento como rígido son:

Zapatas aisladas:

$$v \leq \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot k_{sB}}}$$

Siendo:

- $v$ : Es el vuelo de la zapata en una dirección cualquiera.
- $E_c$ : Es el módulo de deformación del material de la zapata, (usualmente hormigón armado) representativo del tipo de carga y su duración.
- $I_c$ : Es el momento de inercia de la sección de la zapata perpendicular a la dirección del vuelo considerado respecto a la horizontal que pasa por su centro de gravedad.
- $B$ : Es el ancho de la zapata en dirección perpendicular al vuelo considerado.
- $k_{sB}$ : Es el módulo de balasto de cálculo, representativo de las dimensiones del cimiento.

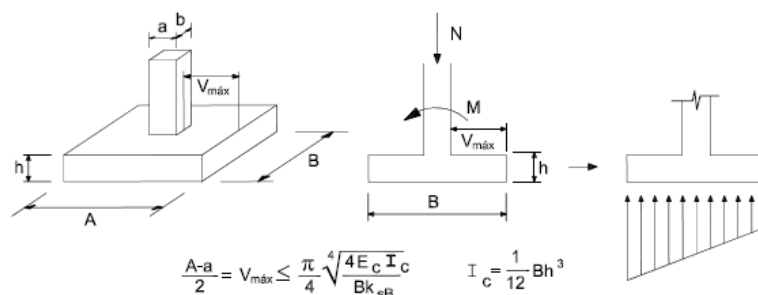


Figura 1.54. Modelo de cálculo para zapatas aisladas. CTE [17].

En el caso de no cumplirse estas limitaciones, la zapata aislada se considerará flexible, y la distribución de presiones sobre el terreno y sus esfuerzos se obtendrán a partir de modelos de cálculo que consideran la interacción suelo-estructura.

Caso de cumplirse las limitaciones, se podrá considerar una distribución lineal de presiones sobre el terreno.

Para zapatas combinadas:

Se considerará que una zapata combinada o corrida es rígida cuando a efectos de cálculo la distribución de presiones a que da lugar sobre el terreno pueda considerarse lineal. A efectos prácticos, se considerará aceptable la hipótesis de rigidez relativa cuando:

$$l \leq \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot k_{sB}}} \quad v \leq \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot k_{sB}}}$$

Siendo:

- l: Es la luz del vano que separa, bien los dos pilares de una zapata combinada, bien dos pilares cualesquiera de una zapata corrida.
- v: Es la luz de cualquier voladizo en la dirección longitudinal.
- E<sub>c</sub>: Es el módulo de deformación del material de la zapata, (usualmente hormigón armado) representativo del tipo de carga y su duración.
- I<sub>c</sub>: Es el momento de inercia de la sección de la zapata perpendicular a la dirección del vuelo considerado respecto a la horizontal que pasa por su centro de gravedad.
- B: Es el ancho de la zapata (dirección transversal).
- k<sub>sB</sub>: Es el módulo de balasto de cálculo, representativo de las dimensiones del cimiento.

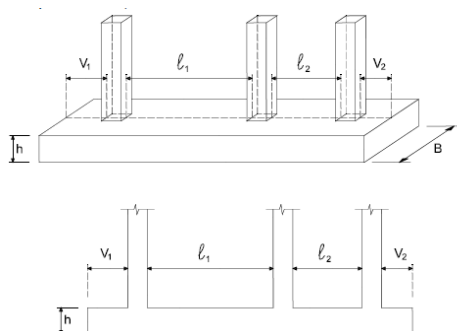


Figura 1.55. Criterio Rigidez para zapatas combinadas. CTE [17].

A efectos de cálculo y para los cantos habituales, las zapatas combinadas, se diseñarán mediante el empleo de modelos de cálculo que tengan en cuenta la interacción suelo-estructura. No obstante, se considerará que estos elementos son rígidos y que la distribución de presiones en el suelo es lineal, cuando se cumplan simultáneamente las condiciones de rigidez descritas anteriormente, así como las limitaciones incluidas en el apartado de interacción terreno-estructura.

Verificaciones:

Para el dimensionamiento de los cimientos, se seguirán en general los requisitos establecidas por CTE [17], ampliándose en algunos casos en los cuales se incluirá la procedencia de la nueva verificación. Las comprobaciones para verificar estos requisitos se basarán en el método de los estados límites. Los estados a verificar serán;

Estados límites últimos:

- Hundimiento
- Deslizamiento
- Vuelco
- Estabilidad global
- Capacidad estructural del cimiento.

Estados límites de servicio:

- Asientos
- Distorsión angular

Aclarar, que en el presente estudio no se verificará el ELU de hundimiento descrito en CTE [17], entendiéndose que el parámetro ‘tensión admisible’ ya ha sido determinado de forma que se cumple implícitamente esta restricción, aspecto habitual en la práctica real.

Como conclusión, se puede indicar que en la práctica totalidad de la bibliografía consultada se han incluido desde un inicio, como un tipo de cimentación especial, la relativa a los soportes ubicados en medianerías. Dada la dificultad de disponer en estos casos de cimentaciones mediante zapatas aisladas, debido a los fuertes momentos generados por la excentricidad de la carga, se han aportado diversos modelos de cálculo alternativos para su resolución, entre los que destacan:

- Modelo de zapata combinada de ancho constante.
- Modelo de zapata combinada trapezoidal.
- Modelo de zapata combinada asimétrica.
- Modelo de zapata excéntrica con viga riostra.
- Modelo de zapata excéntrica sobre pozo.

Sin embargo, a pesar del amplio abanico de posibles modelos de solución distintos aportados, no se han localizado criterios para la elección entre ellos del más óptimo en cada caso.

### **1.3 Criterios de diseño para optimización de cimientos.**

Se incluye a continuación un listado con las recomendaciones localizadas en las distintas publicaciones descritas anteriormente, en relación a los criterios de diseño a adoptar para cada una de las tipologías para cimentaciones de medianería que se considerarán en el presente estudio y que tienen relación con su optimización.

**Lahuerta [9]**, 1948, artículo *Dos propuestas sobre la cimentación en medianeras*. En él, se analizan las soluciones mediante zapatas aisladas excéntricas para la cimentación de soportes en medianera, proponiendo como soluciones alternativas para reducir las superficies del cimiento, el disponer el cimiento a más profundidad o como solución más ventajosa la de centrar la carga mediante la generación de un momento flector contrario a la excentricidad geométrica existente. Esta última, es la opción que indica más ventajosa desde el punto de vista económico y constructivamente.

**Bowles [13]**, 1968, en su libro *Foundation Analysis And Design*, desarrolla una solución mediante la disposición de dos zapatas aisladas unidas mediante una viga. Esta solución se propone cuando la distancia entre soportes es elevada, y una solución mediante zapata combinada daría como resultado momentos elevados, o cuando la posición del centro de gravedad de la sección se sitúa por debajo de 1/3 de la Longitud de la zapata. En la resolución de la medianería con zapata aislada, indica que la influencia de la excentricidad del soporte en el área de solución del cimiento es grande, resultando más económico la disposición de zapatas rectangulares, con mayor dimensión en dirección de la medianería.

**Calavera [15]**, 1982, en su libro, *Estructuras de cimentación* Edición 4, indica, para la solución de zapatas aisladas:

- Siempre son más económicas las zapatas cuanto más flexibles (menores cantos).
- Zapatas aisladas. Salvo grandes zapatas, conviene disponer canto constante.
- Se recomienda el uso de diámetros mínimos de 10 mm para las armaduras con calidad B400 o superior.

**Calavera et al. [18]**, en su publicación, 1992 “*Manual de Ferralla*”, Ed Anifer, En su Capítulo 12 establece unos condicionantes para la racionalización de la ferralla, como única forma de conseguir un armado fácil, económico y seguro. Las recomendaciones incluidas son:

- Emplear acero del mayor límite elástico posible ya que el límite elástico crece más rápidamente que el coste por kg.
- Emplear el menor número de barras posible de mayor diámetro lo que favorece que todas las barras estén bien rodeadas de hormigón.
- Emplear el menor número de diámetros posibles. Esto reduce el almacenamiento, facilita la elaboración y la soldadura, reduce el tipo de separadores a emplear y simplifica el control.
- Optimizar el armado, basándose en la repetición de pocas formas sencillas.
- Optimizar es reducir el coste, no el número de kilos.

**CTE [17]**, establece los siguientes criterios de selección para distintos tipos de cimentaciones:

Zapatas aisladas:

- Recomendables para terrenos firmes, con tensiones de terreno medio altas. Provocan asientos pequeños o moderados.
- Si es posible, las zapatas de medianería serán de planta rectangular, preferentemente con una mayor dimensión paralela a la medianería.
- Será conveniente en zapatas fuertemente excéntricas, como las de medianería o equina, la disposición de vigas centradoras a otras zapatas para redistribuir cargas y presiones sobre el terreno. Para cumplir este objetivo se pueden disponer otras múltiples posibilidades de diseño como la contribución de forjados, tirantes etc..
- Para las vigas centradoras hormigonadas directamente sobre el terreno, se deberán considerar los posibles esfuerzos derivados del asiento previsto en las zapatas unidas por ellas. Se deberá tener en cuenta especialmente en el caso de terrenos metaestables.

Zapatas combinadas:

- Recomendadas para terrenos de pequeña o moderada capacidad portante, soportes muy próximos o cargas elevadas. También recomendable para evitar asientos diferenciales, o para situaciones con fuertes momentos en soportes.
- Establece como forma habitual las zapatas de forma rectangular, aunque puede resultar conveniente en algunos casos forma trapecial.

El **Ministerio de Fomento [19]**, publica en 2014 en la ***Guía de aplicación de la instrucción EHE***, un ejemplo de resolución de zapata excéntrica con viga riostra donde se describe un criterio económico para el diseño de la zapata de medianería. Así, se indica, “Una proporción de las dimensiones de la zapata que facilita un resultado más

económico, es la resultante de igualar los vuelos respecto del eje del pilar en las dos direcciones. Esto se consigue aproximadamente con la siguiente expresión”:

$$v = \sqrt{\frac{Area}{2}}$$

Como  $v=B/2$ ;

$$\frac{B}{2} = \sqrt{\frac{A \cdot B}{2}} \rightarrow B = 2 \cdot A$$

#### 1.4 Estructura del trabajo.

Se incluye a continuación una descripción sobre la estructuración seguida para la realización del presente trabajo.

En el **Capítulo 1**, se hace una breve introducción al problema en estudio, describiéndose la evolución histórica en el tratamiento estructural para la solución de las cimentaciones en medianería.

En el **Capítulo 2**, se describen los objetivos del trabajo.

En el **Capítulo 3** se estudiará el problema de optimización concreto a abordar en el trabajo. Se procederá a la descripción de todos los parámetros y variables que configuran el problema y se hará una descripción de las restricciones a las que está sometido cada uno de los modelos de cimentación adoptados. Se describirán por separado todos los modelos de cimiento propuestos para la resolución del problema. Por otro lado, se describirán cada una de las funciones objetivo contempladas en el estudio, divididas en funciones de tipo económico, medioambiental y de ‘constructibilidad’.

En el **Capítulo 4** se incluye un resumen del estado del arte en relación a los estudios realizados hasta la fecha con distintos métodos de optimización sobre problemas estructurales.

En el **Capítulo 5** se describirán las técnicas heurísticas que se utilizarán en el presente estudio para la optimización de las funciones objetivo establecidas. Se analizarán las heurísticas de Estrategia de Saltos Múltiples (DLS) y la de Cristalización Simulada (SA), dentro de la búsqueda mono-objetivo, y la misma técnica de Cristalización Simulada se aplicará para la búsqueda multi-objetivo (MOSA).

En el **Capítulo 6** se procede al ajuste de los parámetros que configuran los distintos algoritmos de optimización descritos en el capítulo anterior, Estrategia de Saltos Múltiples (DLS) y Cristalización Simulada mono-objetivo (SA) y multi-objetivo (MOSA). Se establece un ejemplo de aplicación, en base a una situación habitual en un edificio residencial de pequeña entidad. Inicialmente se realizará una Búsqueda aleatoria de

Soluciones al problema, para obtener información del espacio de soluciones y disponer de soluciones iniciales necesarias posteriormente para la aplicación de los métodos heurísticos. Posteriormente, se aplicarán las técnicas Heurísticas (DLS y SA), realizándose un análisis de sensibilidad de los resultados en función de la variación de los parámetros de configuración de cada algoritmo. Con los resultados obtenidos se establecen los parámetros de configuración óptimos en cada caso. Tras ello, se estudiarán los resultados obtenidos para cada una de las funciones objetivo y se compararán los resultados obtenidos mediante las distintas técnicas, detectando posibles relaciones y dependencias. Finalmente, se aplicará al mismo ejemplo la heurística multi-objetivo, MOSA, analizando y comparando los resultados.

En los **Capítulos 7** se aplicará el algoritmo de optimización de Simulated Annealing (SA) sobre un ejemplo recogido de la publicación de Calavera [2], *Cálculo de Cimentaciones*, aplicando la misma metodología descrita en el **Capítulo 6**. Del mismo modo, se evaluarán las funciones objetivo definidas en el Capítulo 3 para la solución aportada en la misma publicación y se calculará el mismo ejemplo con el software de cálculo estructural CYPECAD [20], de habitual uso en la práctica. Posteriormente se compararán los resultados obtenidos y se determinarán las conclusiones que permitan establecer los modelos de cimiento más óptimos en cada caso. Finalmente, se realizará un análisis de sensibilidad sobre distintos parámetros del problema en estudio, de forma que se pueda determinar los parámetros cuyos valores inciden con mayor repercusión sobre los valores de las funciones objetivo analizadas.

El **Capítulo 8** incluirá un estudio de parametrización del problema en estudio. El estudio abarcará la mayoría de casos que se pueden dar en la práctica habitual para el dimensionado de estos elementos, aplicando en todos ellos el algoritmo de optimización de Simulated Annealing (SA). El estudio abarcará el conjunto de problemas determinado por la variación de los parámetros de longitud entre soportes, tensión admisible del terreno, módulo de balasto y cargas en cada uno de los soportes.

Finalmente en el **Capítulo 9** se incluirán el resumen de conclusiones del estudio así como las líneas de investigación futuras.

## 1.5 Referencias bibliográficas.

- [1]. Jiménez Salas J. A. (1980). *Geotecnia y Cimientos*. Volumen III. Primera edición. Editorial Rueda.
- [2]. J. Calavera. (2000). *Cálculo de estructuras de Cimentación*. Edición 4. Instituto Tecnico de Materiales de Construcción.
- [3]. Marco Vitruvio Polion, (27 y 23 a.C.). *De Architectura*
- [4]. Henry T. Eddy, C. E. & C.A.P. Turner, C.E. (1914). *Concrete-Steel construction*. Minneapolis.

- [5]. Joseph E. Bowles. (1977). *Foundation Analysis and Design*. Mc Graw-Hil Kogakusha LTD.
- [6]. Hans F. Winterkorn & Hsai-Yang Fang (1975). *Foundation Engineering Handbook*. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [7]. Calrence W. Dunham. (1962). *Cimentaciones de estructuras*. Segunda edicion. McGraw-Hill Book Company.
- [8]. Wayne C. Teng. (1962). *Foundation Design*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- [9]. Clement C. Williams, C.E. (1922). *The design of masonry structures and foundations*. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York.
- [10]. A.W. Buel & C. S. Hill. (1904). *Reinforced concrete*. The Engineering news publishing company. New York.
- [11]. E. Dobson, C.E. (1872). *Foundations and Concrete works*. Lockwood & Co, 7 Stationers Hall Court,
- [12]. Javier Lahuerta. (1948). *Dos propuestas sobre la cimentacion en medianerías*. Revista Nacional de Arquitectura.
- [13]. A. Guerrin (1952) *Traite de beton arme.Tome III. Les Foundations*. Dunod Paris.
- [14]. Ralph B. Peck & Walter E. Hanson & Thomas H. Thornburn. (1974). *Foundation Engineering*. Segunda edicion. ISBN: 978-0-471-67585-3.
- [15]. J. Calavera & E. Gonzalez Valle & J. Fernandez Gomez & F. Valenciano. (1997). *Manual de Ferralla*. Anifer. Asociacion Nacional de Industriales de ferralla.
- [16]. Decreto 2987/1968. *Instrucción para el proyecto y la ejecucion de obras de hormigon en masa o armado*. BOE 290 de 3 Diciembre 1968.
- [17]. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. (1974), *Instrucción EHE-73. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado*.
- [18]. Ministerio de la Vivienda, (2006). *Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación, Parte II: Documento Básico: DB SE Seguridad Estructural*. Boletín oficial del estado.
- [19]. Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Real Decreto 1247/2008.
- [20]. Software para arquitectura, Ingenieria y Construcción. CYPE Ingenieros S.A. ©CYPECAD ver 2014.



# Capítulo 2

## Objetivos del trabajo.

### 2.1 Introducción.

El objetivo fundamental del trabajo, será la aplicación de varias técnicas heurísticas de optimización sobre el problema estructural relativo a la obtención de una cimentación correspondiente a dos soportes confrontados, cuando uno de ellos dispone de una limitación en la dimensión del vuelo en una dirección del cimiento, por lo habitual motivada por situarse este en la medianería con otro edificio.

Este caso particular de cimentación se encuentra en la gran mayoría de obras de edificación, y se suele corresponder con las cimentación correspondientes a soportes medianeros con otras edificaciones, existiendo como alternativas de solución varios modelos de cimentación posible, por lo que el objetivo será analizar tanto los posibles modelos más adecuados para cada situación, como dentro de cada modelo, las configuraciones más óptimas del mismo.

Por otro lado, se aplicarán dos modelos de comportamiento estructural diferente para la transmisión de las presiones del cimiento sobre el terreno. Por un lado, se aplicará el modelo tradicionalmente utilizado en la práctica profesional, que supone un comportamiento rígido de los cimientos y que coincide con el modelo utilizado en todos los estudios de optimización localizados sobre elementos de cimentación que se describirán en el capítulo 4. Adicionalmente, se evaluará un segundo modelo de comportamiento estructural, que supondrá que la deformación del terreno es proporcional a la

presión transmitida por los soportes y al que denominaremos ‘modelo elástico simplificado’.

El modelo está basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimiento al suelo y el asiento en este mismo punto. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga, pero sin estar coaccionado por otros a través del cimiento. Se modelizará el comportamiento del suelo mediante la teoría del coeficiente de balasto de winkler, suponiendo que la presión que ejerce el terreno sobre el elemento es directamente proporcional al asiento a través de la constante de proporcionalidad, “Coeficiente de balasto K”. Entre los objetivos del presente estudio estará el de evaluar los resultados obtenidos en cada uno de los modelos descritos anteriormente, estableciendo las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

Otro de los objetivos del trabajo, es el de aportar criterios de valoración de las soluciones obtenidas, tanto desde el punto de vista económico, que es el tradicionalmente utilizado en toda la bibliografía de referencia, como desde puntos de vista que valoren la facilidad constructiva de la solución o su comportamiento en relación al medioambiente. Así pues, se analizarán funciones objetivo de los siguientes tipos:

- Funciones objetivo económicas:
- Funciones objetivo medioambientales:
- Funciones objetivo de constructibilidad.

Por otro lado, con el objeto de poder contrastar los resultados obtenidos, se procederá a la aplicación de los métodos de optimización sobre un ejemplo tratado en la bibliografía de referencia, comparando los resultados obtenidos con los alcanzados mediante el uso de un software de cálculo estructural ampliamente utilizado en la práctica.

Finalmente, se realizará un análisis de sensibilidad sobre las soluciones óptimas alcanzadas, con objeto de poder determinar la sensibilidad de las mismas ante la variación de los parámetros más significativos del problema.

Como objetivo final, se plantea la realización de un estudio paramétrico que recoja las situaciones de diseño más habituales en la práctica y que permita a los ingenieros calculistas, poder disponer de un prediseño de este tipo de cimentaciones desde el punto de vista económico.

# Capítulo 3

## Definición del problema de Optimización.

### 3.1 Introducción.

Antes de definir el problema concreto que se pretende optimizar en el presente estudio, se procederá a una definición general de un problema de optimización. Así, todo problema de optimización estará compuesto por:

Unos **parámetros**,  $P(p_1, \dots, p_k)$ , del problema, que se identifican con aquellos valores que permanecerán constantes en el proceso de optimización y que definen el problema.

Unas **variables**,  $X(x_1, \dots, x_i)$ , del problema, cuyo valor podrá modificarse durante el proceso de optimización hasta alcanzar el valor final y que junto con los parámetros definirán el problema. Distinguiremos a su vez entre variables de primer orden, como aquellas variables cuyo valor es totalmente independiente y variables de segundo orden, como aquellas variables cuyo valor dependerá del valor obtenido en las variables de primer orden.

Un conjunto de **Restricciones**, que definen aquellas condiciones cuyo cumplimiento ha de asegurarse por parte de la solución evaluada. Entre ellas podremos distinguir entre:

- **Restricción de Tipo Constructivo:** Entre las que se incluirán.
  - Patrones de armado. Restricción implícita.
  - Dominio de las variables de diseño.  $x_{i,\min} < x_i < x_{i,\max}$

- **Restricciones de Comportamiento Mecánico**, ( $G_j(x_i) \leq 0$ ): Entre las que se incluirán.
  - Seguridad Estructural
  - Aptitud al servicio.
  - Durabilidad

Un conjunto de **Funciones objetivo**,  $F=f(x_i)$ , que serán las funciones a evaluar y cuyo valor se pretende optimizar. La función objetivo habitual en el caso de optimización de estructuras se corresponde con la obtención del mínimo coste económico, si bien es cada vez más habitual incorporar otro tipo de funciones objetivos. En el caso del presente estudio las funciones a evaluar se dividirán en:

- Funciones económicas. En este caso el objetivo será obtener la solución al problema que implique un mínimo coste económico.
- Funciones Medioambientales. Cada vez más importante en nuestra sociedad, en este grupo se incluirán aquellas funciones cuyos objetivos minimicen :
  - Emisión de CO2 (kg).
  - Energía Consumida (MJ).
  - Peso (kg).
  - Consumo de Agua (kg).
- Funciones de ‘constructibilidad’. Este tipo de funciones intentan evaluar la facilidad constructiva de la solución. Los índices a evaluar serán:
  - Número de barras de armadura.
  - Número de Tipos distintos de barras de armadura.
  - Relación Área / perímetro.
  - Diámetro medio de la armadura.
  - Uniformidad de armado.

Con estas definiciones, el problema de optimización se definirá como la búsqueda del conjunto de variables del vector  $X$ , que cumplan:

$$\mathbf{f}(X) \rightarrow \text{Min o Max}$$

$$X \in D$$

Condicionado por:

$$G_j(x_i) \leq 0 \quad j=1, \dots, m$$
$$x_{i,\min} < x < x_{i,\max} \quad i=1, \dots, n$$

### 3.2 Descripción del problema en estudio. Modelos de cálculo.

El problema planteado en este estudio pretende optimizar las posibles soluciones de la cimentación correspondiente a dos soportes enfrentados. Adicionalmente, se impondrá como condición geométrica la limitación del vuelo en una dirección de la zapata correspondiente al soporte 1, (al que denominaremos soporte de medianera), correspondiéndose el problema de estudio del caso habitual de zapatas en medianerías.

De todas las soluciones recogidas en la bibliografía consultada y descrita en el Capítulo 1, se han escogido para el estudio aquellas que se han considerado de uso más habitual en la práctica y que se describen a continuación:

#### 3.2.1 Modelo 1: Zapatas Aisladas.

Este modelo de solución incluirá el dimensionamiento de una zapata por cada soporte sin ninguna relación entre ambas. El dimensionado de las mismas seguirá los criterios especificados en las actuales normativas Españolas, **EHE-08 [1]** y **CTE [2]**.

#### 3.2.2 Modelo 2: Zapata Excéntrica con viga centradora de ancho constante.

Este modelo se compondrá de una zapata aislada bajo cada soporte, disponiéndose además, una viga de ancho constante que sirva de enlace de las dos zapatas. La función de esta viga será la de rigidizar el conjunto, centrando las reacciones del suelo en ambas zapatas y provocando por tanto tensiones constantes en este.

El dimensionado de este elemento seguirá las directrices fijadas por las instrucciones de Hormigón estructural **EHE-08 [1]** y **CTE [2]** y por los criterios recogidos en **Calavera [3]**. La descripción completa se incluye en el apartado 3.6.3.

#### 3.2.3 Modelos 3, 4 y 5: Zapata Combinada.

Esta solución incluirá la disposición de una única zapata que abarque los dos soportes en estudio. En función de la geometría de la misma, se definirán 3 posibles modelos:

##### 3.2.3.1 Modelo 3: (Configuración 1): Zapata combinada asimétrica.

Esta solución incluirá la disposición de una única zapata que abarque los dos soportes en estudio, con la característica de presentar dos anchos distintos de cimiento para cada soporte. En esta solución, el ancho correspondiente al soporte 2 será mayor al del soporte 1.

### 3.2.3.2 Modelo 4: (Configuración 2): Zapata combinada asimétrica.

Esta solución incluirá la disposición de una única zapata que abarque los dos soportes en estudio, con la característica de presentar dos anchos distintos de cimiento para cada soporte. En esta solución el ancho correspondiente al soporte 1 será mayor al del soporte 2.

### 3.2.3.3 Modelo 5: Zapata combinada de ancho constante.

Este tipo de solución incorporará la disposición de una única zapata que abarque los dos soportes en estudio, con la condición de mantener su ancho constante a lo largo de todo el cimiento.

El dimensionado de estos modelos seguirá las directrices fijadas por la instrucción de Hormigón estructural **EHE-08 [1]**, el Código Técnico en la edificación **CTE [2]** y por los criterios recogidos en **Calavera [3]**.

## 3.3 Parámetros de partida.

Definiremos como parámetros de partida, aquellos datos necesarios para la definición del problema y cuyo valor se mantendrá constante a lo largo del proceso de optimización. Distinguiremos entre:

### 3.3.1 Parámetros Geométricos.

Se describen en la siguiente tabla los parámetros para la definición de la geometría del problema.

**Tabla 3.1. Parámetros Geométricos**

	<b>Designación</b>
Distancia entre ejes de soportes	$l$ (mm)
Dimensión en dirección x del soporte 1	$a_{1p}$ (mm)
Dimensión en dirección y del soporte 1	$b_{1p}$ (mm)
Dimensión en dirección x del soporte 2	$a_{2p}$ (mm)
Dimensión en dirección y del soporte 2	$b_{2p}$ (mm)
Excentricidad en dirección 'x' de zapata 1:	$e_1$ (mm)
Distancia desde eje de soporte 1 a borde de zapata	
Recubrimiento inferior en zapatas	$r_{inf}$ (mm)
Recubrimiento lateral en zapatas	$r_{lateral}$ (mm)

En relación a los parámetros referentes a los recubrimientos, indicar que estos vendrán condicionados fundamentalmente por motivos de durabilidad, tal y como se describirá posteriormente en el apartado 3.5.1.

### 3.3.2 Parámetros del terreno.

Como parámetros definitorios de las características del terreno se incluirán

Tabla 3.2. Parámetros del terreno

	Designación
Tensión admisible del terreno.	$\sigma_{\text{admisible}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$
Módulo de Balasto para placa de 30 x 30 cm	$K_{30} \text{ (N/mm}^2\text{)}$

Estos parámetros definirán el comportamiento del terreno ante los esfuerzos actuantes y transmitidos por el cimiento. La presente tesis incluirá dos modos de comportamiento posible. Un primer modelo, al que denominaremos, ‘Modelo de Cimiento Rígido’, que impondrá un comportamiento como elemento rígido al cimiento y consecuentemente generará una distribución de tensiones en el terreno lineal y un segundo modelo, al que se denominará, ‘Modelo Elástico Simplificado’, donde se asumirá que el cimiento no es infinitivamente rígido y el comportamiento del terreno se asemeja a un número infinito de resortes, cuyo comportamiento es independiente uno de otro. Los resortes funcionarán a compresión mediante una ley proporcional entre presión y desplazamiento a través de la constante K del resorte, denominada ‘Módulo de Balasto’.

### 3.3.3 Parámetros relativos a los esfuerzos actuantes.

Las acciones consideradas en el cálculo se dividirán en:

**Acciones permanentes (G).** Acciones que actúan en todo instante. En este apartado incluiremos las debidas a los pesos propios y cargas muertas.

**Acciones variables (Q).** Aquellas que pueden o no actuar. En este apartado consideraremos las sobrecargas debidas al uso, viento, nieve, etc...

Los modelos de cálculo que posteriormente se describirán, permitirán el análisis ante la acción de los esfuerzos (Axiles, Cortantes y Momentos) actuantes en el plano xz.

Así pues, se considerará como  $M_x$  al momento alrededor del eje y, momento en el plano xz, y será positivo si tiene el sentido de movimiento de las agujas de un reloj. Los modelos considerados no contemplarán esfuerzos cortantes o momentos en la otra dirección

El criterio de signos adoptado para los esfuerzos se describe en la siguiente figura.

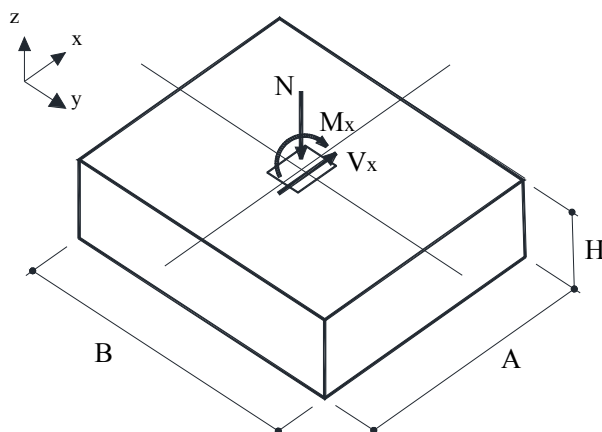


Figura 3.1. Criterios de signos adoptado

En la siguiente tabla se muestran las cargas consideradas en el análisis de las soluciones.

Tabla 3.3. Acciones consideradas sobre los cimientos

	Designación
<b>SOPORTE 1 (Medianería)</b>	
Axil característico debido a cargas permanentes sobre soporte 1	$N_{1,ep,k}$ (N)
Axil característico debido a sobrecargas sobre soporte 1	$N_{1,sc,k}$ (N)
Momento característico en dirección x debido a cargas permanentes en soporte 1	$M_{1,x,ep,k}$ (N mm)
Momento característico en dirección x debido a sobrecargas en soporte 1	$M_{1,x,sc,k}$ (N mm)
Cortante característico en dirección x debido a cargas permanentes en soporte 1	$V_{1,x,ep,k}$ (N)
Cortante característico en dirección x debido a sobrecargas en soporte 1	$V_{1,x,sc,k}$ (N)
<b>SOPORTE 2 (Interior)</b>	
Axil característico debido a cargas permanentes sobre soporte 2	$N_{2,ep,k}$ (N)
Axil característico debido a sobrecargas sobre soporte 2	$N_{2,sc,k}$ (N)
Momento característico en dirección x debido a cargas permanentes en soporte 2	$M_{2,x,ep,k}$ (N mm)
Momento característico en dirección x debido a sobrecargas en soporte 2	$M_{2,x,sc,k}$ (N mm)
Cortante característico en dirección x debido a cargas permanentes en soporte 2	$V_{2,x,ep,k}$ (N)
Cortante característico en dirección x debido a sobrecargas en soporte 2	$V_{2,x,sc,k}$ (N)

### 3.3.4 Combinaciones de las acciones.

Las combinaciones de acciones consideradas, seguirán lo indicado en el artículo 13 de la actual instrucción de Hormigón Española, **EHE-08** [1].

Así para la evaluación de los Estados límites últimos ante situaciones permanentes o transitorias se adoptará:

$$\sum_{j>1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$



Donde:

$G_{k,j}$  Valor característico de las acciones permanentes.

$Q_{k,1}$  Valor característico de la acción variable predominante.

$\gamma_{G,j}, \gamma_{Q,1}$  Coeficientes parciales de seguridad para las acciones permanentes y variables.

$\Psi_{0,l}, Q_{k,l}$  Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes.

Adoptando los siguientes valores

$$\gamma_G = 1,35 \text{ (acciones desfavorables)}$$

$$\gamma_Q = 1,50 \text{ (acciones desfavorables)}$$

Para la evaluación de los estados límites de servicio en combinación característica, se adoptará la siguiente combinación:

$$\sum_{j>1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$$

Los coeficientes parciales de seguridad, presentarán en este caso los valores:

$$\gamma_G = 1,00 \text{ (acciones desfavorables)}$$

$$\gamma_Q = 1,00 \text{ (acciones desfavorables)}$$

Las combinaciones consideradas, conforme a lo indicado por **EHE-08** [1], son coincidentes con las recogidas en el **DB SE AE**, Acciones en la edificación de **CTE** [2].

En el siguiente cuadro se reflejan los parámetros finalmente adoptados en relación a los coeficientes de mayoración de acciones:

**Tabla 3.4. Coeficientes de mayoración de acciones**

	<b>E.L.U.</b>	<b>E.L.S.</b>
$\gamma_G$	1,35	1,00
$\gamma_Q$	1,50	1,00

### 3.3.5 Costes unitarios.

Para la estimación de las distintas funciones objetivo analizadas en el presente estudio y que se describirán en el punto 3.5, se tendrán en cuenta los siguientes costes unitarios extraídos de la Base de Datos **BEDEC** [4], publicada por el **ITeC**, Institut de Tecnologia de la Construcción de Catalunya, actualizada a fecha 2015.

En la siguiente tabla se muestran los valores adoptados.

**Tabla 3.5. Costes unitarios adoptados. BEDEC [4].**

Concepto	Coste Económico (€/m <sup>3</sup> o €/m <sup>2</sup> )	Peso Total (kg/m <sup>3</sup> o kg/m <sup>2</sup> ) (*)	Peso Agua (kg/m <sup>3</sup> o kg/m <sup>2</sup> ) (*)	Coste Energético (MJ/m <sup>3</sup> o MJ/m <sup>2</sup> )	Emisión CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> o kg/m <sup>2</sup> )
(Ex) Excavación (m3)	7,15	--	--	61,79	16,14
(En) Encofrado (m2)	19,62	5,01	--	25,13	1,67
(H) Hormigón					
Limpieza 10 cm	10,02	263,64	10,24	95,21	15,02
HA-25/B/20/IIa	79,73	2.659,44	181,50	1.470,25	269,44
HA-30/B/20/IIa	83,38	2.659,44	181,50	1.470,25	269,44
HA-35/B/20/IIa	105,72	2.685,02	173,25	1.774,59	337,77
(A) Acero Corrugado					
Ø6 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø8 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø10 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø12 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø16 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø20 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø25 B400S	1,05	1,07	--	37,4	3,01
Ø6 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
Ø8 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
Ø10 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
Ø12 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
Ø16 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
Ø20 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
Ø25 B500S	1,07	1,07	--	37,4	3,01
(R) Relleno de zanja	11,83	2.420,00	--	32,26	8,53

(\*) Los valores correspondientes a Peso total y peso de agua, no aparecen reflejadas en la Base de datos BEDEC [4] del año 2015, por lo que se han incluido los valores que si aportaba la misma base de datos en el año 2012.

### 3.4 Variables del problema.

Se denominarán variables del problema, a todos aquellos datos necesarios para la caracterización de la solución del problema y cuyos valores podrán modificarse a lo largo del proceso de optimización a realizar.

Entre ellas, distinguiremos dos categorías, las variables de primer orden y las variables de segundo orden, para distinguir aquellas variables cuyo valor será totalmente independiente y aquellas cuyo valor será dependiente del valor de otras variables.

#### 3.4.1 Variables de Primer Orden:

En esta categoría incluiremos aquellas variables cuyo valor se adoptará de forma totalmente independiente al valor de otra variable. Entre ellas distinguiremos:

##### 3.4.1.1 Variables Geométricas:

El valor de estas variables, fijará la geometría de la solución. Se listan a continuación las variables geométricas utilizadas en el estudio, si bien cada tipología de cimiento podrá incluir todas o solo algunas de las incluidas en la siguiente tabla:

**Tabla 3.6. Variables geométricas.**

	<b>Designación</b>
<b>Zapatas</b>	
Zapata 1: Dimensión en dirección x	$A_1$
Zapata 1: Dimensión en dirección y	$B_1$
Zapata 1: Canto de la zapata	$H_1$
Zapata 2: Dimensión en dirección x	$A_2$
Zapata 2: Dimensión en dirección y	$B_2$
Zapata 2: Canto de la zapata	$H_2$
<b>Viga Riostra</b>	
Viga Riostra: Dimensión en dirección y	$B_3$
Viga Riostra: Canto de la VR	$H_3$

Se describen a continuación, tanto la geometría como sus variables asociadas para cada uno de los modelos de cimiento analizados en el presente estudio. Como se mostrará a continuación, no en todos los modelos de cimentación analizados se utilizarán todas las variables descritas en la tabla anterior.

Modelo 1: Zapatas Aisladas:

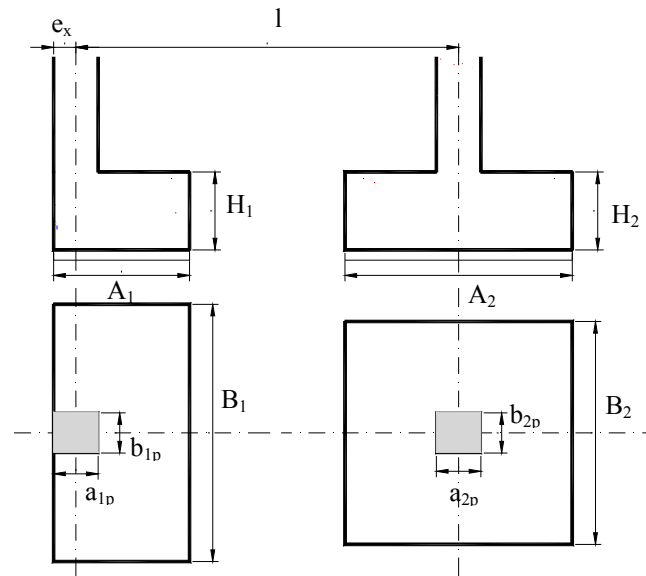


Figura 3.2. Modelo Geométrico, Zapatas Aisladas.

Modelo 2: Zapata Excéntrica con Viga centradora de Ancho Constante:

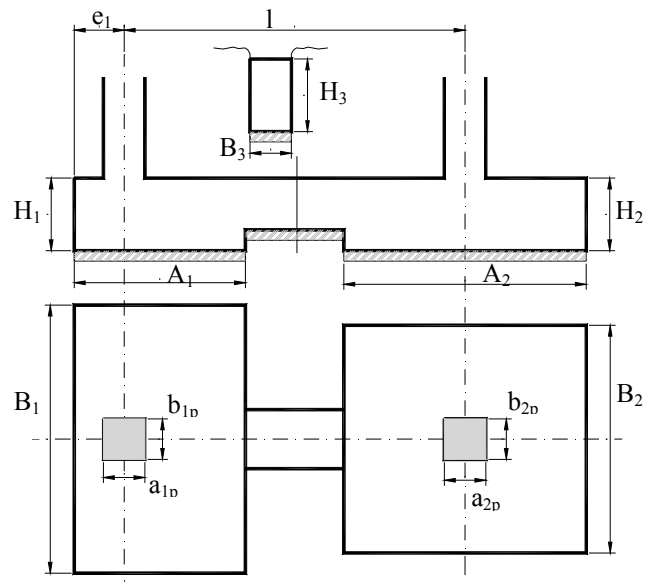


Figura 3.3. Modelo Geométrico. Zapata Excéntrica con viga riostra

Modelo 5: Zapata Combinada de Ancho constante:

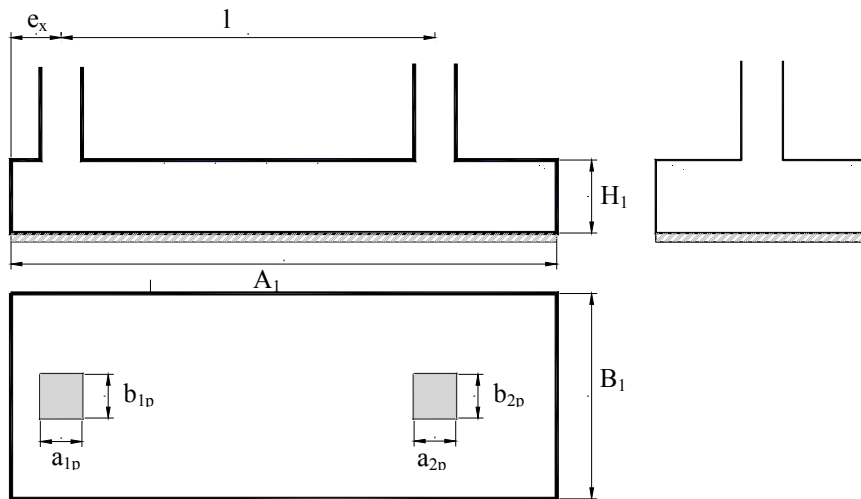


Figura 3.4. Modelo Geométrico. Zapata Combinada de ancho constante

Modelo 4: Zapata Combinada Asimétrica (Configuración 1):

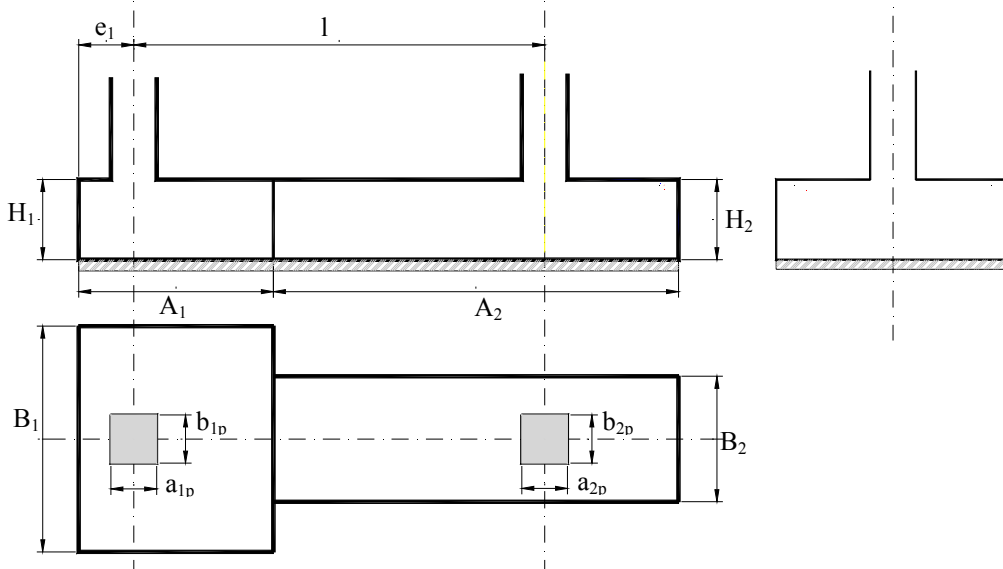


Figura 3.5. Modelo Geométrico. Zapata Combinada asimétrica (Conf-1)

Modelo 3: Zapata Combinada asimétrica (Configuración 2):

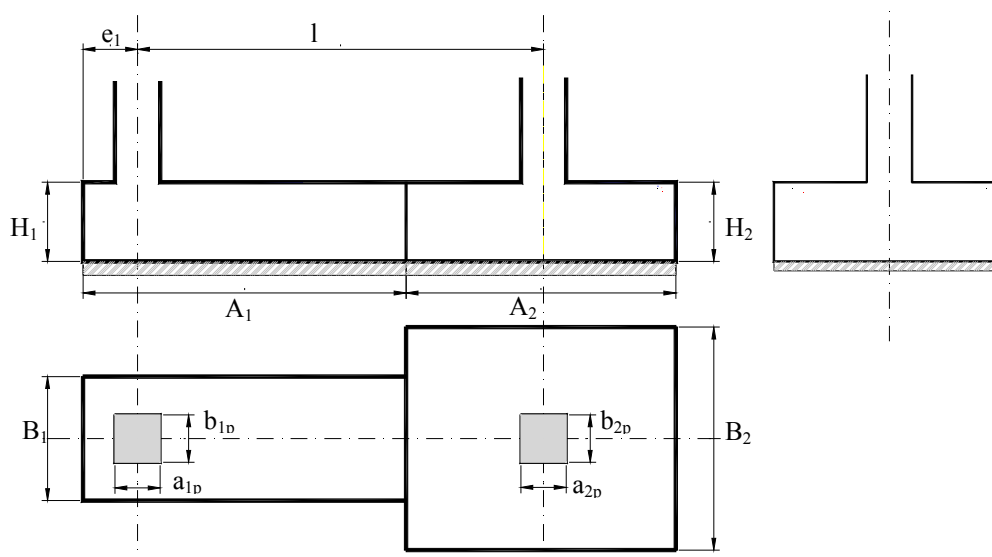


Figura 3.6. Modelo Geométrico. Zapata Combinada asimétrica (Conf-2).

3.4.2 Variables relativas a los materiales:

Este tipo de variables definirán las características de los materiales constituyentes de la solución (acero y hormigón). La designación de los mismos, así como el rango de valores que es posible adoptar, se describen en la siguiente tabla.

Tabla 3.7. Variables de materiales.

Variables de Materiales		
	Designación	Rango de Valores
Hormigones	$f_{ck}$	$f_{ck} = 25 / 30 / 35$ (N/mm <sup>2</sup> )
Aceros	$f_{yk}$	$f_{yk} = 400 / 500$ (N/mm <sup>2</sup> )

3.4.3 Variables de Armado:

Respecto a las variables que definen el armado de cada solución de cimentación, distinguiremos entre variables de primer orden y variables de segundo orden. Para las variables de primer orden, su valor será totalmente independiente del valor de otras variables, mientras que las de segundo orden si tendrán algún tipo de dependencia con las variables de primer orden.

3.4.3.1 Variables de armado de primer orden.

Entre las variables de primer orden, estarán las relativas a los distintos diámetros de las armaduras que componen los modelos de armado.

En la siguiente tabla se describen, para cada uno de los modelos de cimentación incluidos en el estudio, las variables de armado que se utilizarán. Posteriormente, en el punto 3.5.2. se mostrará gráficamente sobre cada modelo la asignación de estas variables.

**Tabla 3.8. Variables de Armado I. (Primer orden).**

<b>MODELO 1: ZAPATAS AISLADAS</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{1xinf}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{1yinf}$
<b>Zapata 2</b>	
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{2xinf}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{2yinf}$

**Tabla 3.9. Variables de Armado II. (Primer orden).**

<b>MODELO 2: ZAPATAS MEDIANERA CON VIGA RIOSTRA</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{1xinf}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{1yinf}$
<b>Zapata 2</b>	
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{2xinf}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{2yinf}$
<b>Viga Riostra</b>	
Armado superior longitudinal de la viga riostra	$D_{3xinf}$
Armado transversal de cortante de la viga riostra	$D_{3,cercos}$

**Tabla 3.10. Variables de Armado III. (Primer orden).**

<b>MODELO 5: ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CONSTANTE</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{1xinf}$
Diámetro Armado superior en dirección 'x'	$D_{1xsup}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{1yinf}$
Diámetro Armado superior en dirección 'y'	$D_{1ysup}$
Diámetro Armado inferior de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 1	$D_{1yinf\_r1}$
Diámetro Armado inferior de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 2	$D_{1yinf\_r2}$
Diámetro Armado transversal de cortante	$D_{3,cercos1}$

**Tabla 3.11. Variables de Armado IV. (Primer orden).**

<b>MODELOS 4 y 5: ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{1xinf}$
Diámetro Armado superior en dirección 'x'	$D_{1xsup}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{1yinf}$
Diámetro Armado superior en dirección 'y'	$D_{1ysup}$
Diámetro Armado inferior de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 1	$D_{1yinf\_r1}$
Diámetro Armado transversal de cortante en tramo 1	$D_{3\_cerco1}$
<b>Zapata 2</b>	
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{2xinf}$
Diámetro Armado superior en dirección 'x'	$D_{2xsup}$
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{2yinf}$
Diámetro Armado superior en dirección 'y'	$D_{2ysup}$
Diámetro Armado inferior de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 2	$D_{1yinf\_r2}$
Diámetro Armado transversal de cortante en tramo 2	$D_{3\_cerco2}$

### 3.4.3.2 Variables de armado de segundo orden:

Además de las variables de armado de primer orden definidas en el apartado anterior y que correspondían con los valores de "Diámetro" de las armaduras, los modelos se completarán definiendo el número de barras asignado a cada armado. Esta última variable se define como de segundo orden, puesto que su valor depende del valor de una variable de primer orden. En este caso, una vez determinado el valor del diámetro de cada barra, se calculará el número mínimo y máximo de barras de ese diámetro que cumplen con todas las restricciones impuestas, asignando a posteriori de forma aleatoria, un valor para el número de barras en el intervalo,  $[n_{max}, n_{min}]$ . De esta forma, se amplía la factibilidad en la búsqueda de soluciones, a la vez que se tiene en cuenta el posible efecto pasador.

En la siguiente tabla se describen para cada uno de los modelos de zapata adoptados, las variables de segundo orden existentes.

**Tabla 3.12. Variables de Armado de segundo orden. Modelo 1.**

<b>Modelo 1 : ZAPATAS AISLADAS</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
N <sup>a</sup> de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 1	$n_{1xinf}$
N <sup>a</sup> de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 1	$n_{1yinf}$
<b>Zapata 2</b>	
N <sup>a</sup> de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 2	$n_{2xinf}$
N <sup>a</sup> de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 2	$n_{2yinf}$



Tabla 3.13. Variables de Armado de segundo orden. Modelo 2.

<b>Modelo 2: ZAPATA DE MEDIANERIA CON VIGA RIOSTRA</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 1	n <sub>1xinf</sub>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 1	n <sub>1yinf</sub>
<b>Zapata 2</b>	
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 2	n <sub>2xinf</sub>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 2	n <sub>2yinf</sub>
<b>Viga Riostra</b>	
Nº de redondos del Armado superior longitudinal de la viga riostra	n <sub>3sup</sub>
Nº de cercos de armado transversal de la viga riostra	n <sub>3cerco1</sub>
Nº de ramas por cerco de armado transversal de la viga riostra	n <sub>3_ramascercos1</sub>
Diámetro de armadura de piel de viga riostra	D <sub>3,Piel</sub>
Nº de redondos del armado de piel de viga riostra.	n <sub>3,Piel</sub>
Diámetro de armadura inferior de viga riostra	D <sub>3,Inf</sub>
Nº de redondos del armado inferior de viga riostra	n <sub>3,Inf</sub>

Tabla 3.14. Variables de Armado de segundo orden. Modelo 5.

<b>Modelo 5: ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CONSTANTE</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata	n <sub>1xinf</sub>
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'x' de la zapata	n <sub>1xsup</sub>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata	n <sub>1yinf</sub>
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'y' de la zapata	n <sub>1ysup</sub>
Nº de redondos del Armado inferior de ref dirección 'y' bajo soporte 1	n <sub>1yinf_r1</sub>
Nº de redondos del Armado inferior de ref dirección 'y' bajo soporte 2	n <sub>1yinf_r2</sub>
Nº de cercos de armado transversal	n <sub>3cerco1</sub>
Nº de ramas por cerco de armado transversal	n <sub>3_ramascercos1</sub>

Tabla 3.15. Variables de Armado de segundo orden. Modelos 3 y 4.

<b>Modelos 3 y 4: ZAPATA COMBINADA DE ANCHO NO CONSTANTE</b>	
<b>Zapata 1</b>	<b>Designación</b>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 1	n <sub>1xinf</sub>
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'x' de la zapata 1	n <sub>1xsup</sub>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 1	n <sub>1yinf</sub>
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'y' de la zapata 1	n <sub>1ysup</sub>
Nº de redondos del Armado inferior de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 1	n <sub>1yinf_r1</sub>
Nº de cercos de armado transversal en ancho A1	n <sub>3cerco1</sub>
Nº de ramas por cerco de armado transversal en ancho A1	n <sub>3_ramascercos1</sub>
<b>Zapata 2 (interior)</b>	
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 2	n <sub>2xinf</sub>
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'x' de la zapata 2	n <sub>2xsup</sub>
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 2	n <sub>2yinf</sub>
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'y' de la zapata 2	n <sub>2ysup</sub>
Nº de redondos del Armado inferior de refuerzo dirección 'y' bajo soporte 2	n <sub>1yinf_r2</sub>
Nº de cercos de armado transversal en ancho A2	n <sub>3cerco2</sub>
Nº de ramas por cerco de armado transversal en ancho A2	n <sub>3_ramascercos2</sub>

### 3.5 Funciones Objetivo.

Como funciones objetivo, definiremos aquellos valores que son característicos de cada solución de cimentación analizada, y cuyo valor se pretende optimizar.

En el ámbito del cálculo estructural, la función objetivo habitualmente evaluada ha sido la relativa al peso de la solución y/o al coste económico de la misma, si bien en los últimos años se ha ido dando cada vez más importancia a la función objetivo relativa al coste medioambiental.

En el siguiente estudio se evaluarán funciones objetivo de tipo Económico, Medioambiental y de ‘constructibilidad’, describiéndose a continuación las funciones y sus índices de control:

- Función Económica: Índice de control el mínimo coste económico en euros.
- Funciones Medioambientales: Mínimo coste medioambiental, donde se evaluarán tanto la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida, en kg, como la Energía consumida, en MJ, para la elaboración de todos los materiales empleados en la solución de cimentación.
- Funciones de ‘constructibilidad’ : Máxima Constructibilidad, entendida como la obtención de aquellas soluciones que presenten mayor facilidad de construcción, para lo que se analizarán, el peso existente de los materiales, en kg, de la solución de cimentación, el número de barras de armado empleadas en la solución, el número de diámetros de armado distintos utilizados, la relación Área / Perímetro, el Diámetro medio definido por Calavera [5] y la Uniformidad de Armado definida por [Koumouis[6]. La función objetivo “Peso”, se ha incluido en este epígrafe si bien también podría haberse incluido dentro de las funciones de coste medioambiental con la que claramente se relaciona.

Se analiza a continuación cada una de las Funciones objetivo definidas anteriormente.

#### 3.5.1 Función de Evaluación del ‘Coste Económico’.

Esta función determinará el coste económico de cada una de las soluciones evaluadas.

Atendiendo a lo reflejado por **Sarma [7]**, la función general de evaluación de coste de una viga de hormigón viene recogida por la ecuación:

$$C = C_{cb} + C_{sb} + C_{pb} + C_{fb} + C_{shb} + C_{fib}$$

Donde:

C<sub>cb</sub>: Es el coste económico asociado al volumen de hormigón de la viga.

C<sub>sb</sub>: Es el coste económico asociado al acero de refuerzo de la viga

C<sub>pb</sub>: es el coste económico asociado al acero pretensado dispuesto

$C_{fb}$ : Es el coste económico asociado a los encofrados dispuestos.

$C_{shb}$ : Es el coste económico asociado con el refuerzo a cortante dispuesto

$C_{fib}$ : Es el coste económico asociado con las fibras dispuestas.

Considerando que en los modelos de cimentación propuestos en este estudio no se dispondrán ni armadura de pretensado, ni fibras en el hormigón, el modelo de evaluación del coste económico de la solución de cimentación adoptará la siguiente expresión:

$$C = C_{cb} + C_{sb} + C_{fb} + C_{shb}$$

Donde:

$C_{cb}$ : Es el coste económico asociado al volumen de hormigón del cimiento, incluido el correspondiente al hormigón de limpieza y en su caso de la viga riostra, caso de disponerse. Destacar que en todos los casos se dispondrá una capa de 10 cm de hormigón de limpieza bajo toda la superficie del cimiento.

$$C_{cb} = V_{hormigon} \cdot c_c + A_c \cdot 0,1 \cdot c_{cl}$$

Siendo :

$C_c$ , es el coste del Hormigón por  $m^3$ , valor que se adoptará de la Base de datos **BEDEC [4]** publicada por el **IteC** para el año 2015 y descrito en puntos anteriores.

$V_{hormigon}$ , es el volumen de hormigón del cimiento.

$A_c$ : es el área en planta ocupada por el cimiento

$C_{cl}$ : es el coste relativo a una capa de 10 cm de Hormigón de limpieza

$C_{sb}$ : Es el coste económico asociado al acero de refuerzo del cimiento y en su caso de la Viga riostra, caso de disponerse.

$$C_{sb} = P_{armadura} \cdot c_s$$

Siendo :

$C_s$ , es el coste del acero de armadura por kg, valor que se adoptará de la Base de datos **BEDEC [4]**, publicada por el **ITeC** y actualizada a fecha 2015, (ver punto 3.2.5.)

$P_{armadura}$ , es el peso en kg, del armado dispuesto.

$C_{fb}$ : Es el coste económico asociado a los encofrados dispuestos, necesarios para configurar el perímetro del cimiento y cuyo valor será.

$$C_{fb} = A_{\text{encofrado}} \cdot c_{en}$$

Siendo:

$c_{en}$  es el coste del encofrado por  $m^2$ .

$A_{\text{encofrado}}$ , el área de encofrado, entendida como el perímetro del cimiento por su altura.

$C_{shb}$ : Es el coste económico asociado al acero de refuerzo a cortante del cimiento y en su caso de la Viga riostra, caso de disponerse y su valor será:

$$C_{shb} = P_{\text{armadura\_cercos}} \cdot c_{sh}$$

Siendo:

$c_{sh}$  es el coste del acero a cortante de armadura por kg, valor que se adoptará de la Base de datos BEDEC [4] publicada por el ITeC y actualizada al año 2015, (ver punto 3.2.5.). El presente estudio no establecerá diferencias de coste entre los armados relativos al refuerzo a cortante y al resto de armados.

$P_{\text{armadura-cercos}}$ , el peso en kg del armado dispuesto a cortante.

Por otro lado, atendiendo a lo indicado por **Bledsoe [8]**, **Mean [9]** y **Wang [10]**, a la anterior función, se habrá de incluir para el caso concreto de un cimiento los parámetros relativos a la excavación y al relleno compactado.

Así pues la función definitiva quedará como:

$$C = C_{cb} + C_{sb} + C_{fb} + C_{shb} + C_{ex} + C_r$$

Donde:

$C_{ex}$ : Será el coste económico asociado a la excavación del terreno y su valor será:

$$C_{ex} = |V_{ex} + V_{\text{sobre\_ex}}| \cdot c_{ex}$$

Siendo

$c_{ex}$  es el coste relativo a la excavación del terreno por  $m^3$ .

$V_{ex}$ : Es el volumen de excavación, que coincidirá con el Volumen de Hormigón dispuesto (incluyendo el relativo al Hormigón de limpieza).

$V_{sobre\_ex}$ : Es el volumen de sobreexcavación considerado. Atendiendo a lo indicado por **Bledsoe [8]**, se adoptará una sobreexcavación consistente en una banda de 30 cm alrededor del cimiento con un talud a 45°.

Finalmente;

$C_r$ : Será el coste económico asociado al relleno de la zona excavada, descontando el valor de volumen del cimiento, y su valor será:

$$C_r = V_{sobre\_ex} \cdot c_r$$

Siendo

$c_r$  es el coste relativo al relleno por  $m^3$ .

$V_{sobre\_ex}$ : Es el volumen de sobreexcavación definido anteriormente.

La función objetivo de coste económico quedará de la siguiente forma:

$$C = V_{hormigon} \cdot c_c + A_c \cdot 0,1 \cdot c_{cl} + P_{armadura} \cdot c_s + A_{encofrado} \cdot c_{en} + P_{armadura\_cer\ cos} \cdot c_{sh} + \\ + |V_{ex} + V_{sobre\_ex}| \cdot c_{ex} + V_{sobre\_ex} \cdot c_r$$

### 3.5.2 Funciones de Evaluación del 'Coste Medioambiental'.

Los indicadores propuestos en este apartado, pretenden evaluar el Coste desde el punto de vista medioambiental que presenta cada solución de cimiento. Para ello, los índices propuestos serán:

- **Kg de Emisión de partículas de CO<sub>2</sub>**, correspondientes a la elaboración y colocación de cada uno de los materiales constituyentes de la solución. La optimización de este índice implicará la búsqueda de su valor mínimo.
- **Energía, en MJ**, necesaria para la elaboración y colocación de los materiales constituyentes de la solución. La optimización de este índice implicará la búsqueda de su valor mínimo.
- **Peso, en Kg**, de los distintos elementos constituyentes de la solución. La optimización de este índice implicará la búsqueda de su valor mínimo, entendiéndose que soluciones de menor peso, implicarán un menor consumo de recursos y por tanto, darán soluciones más sostenibles.

- **Consumo de agua (kg).** Se evaluará el valor de consumo de agua, en Kg, que ha sido necesaria para la elaboración de los distintos componentes integrantes del cimientado (hormigón en este caso).

Se describen a continuación en detalle, cada una de las funciones objetivo descritas anteriormente.

### 3.5.2.1 Función Objetivo ‘Emisión de CO<sub>2</sub> (kg)’:

Como primer evaluador del coste medioambiental generado por una solución de cimentación, se incluye el relativo a los kg de CO<sub>2</sub> emitidos, para la elaboración y colocación de los materiales constituyentes de la solución del cimientado. El objetivo será por tanto el minimizar esta emisión.

Así pues, la función objetivo ‘Emisión de CO<sub>2</sub>’, estará compuesta por:

$$E_{CO_2}(kg) = E_c + E_s + E_f + E_{sh} + E_{ex} + E_r$$

Donde:

$E_c$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en la elaboración y colocación del hormigón dispuesto en el cimientado.

$E_s$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en la elaboración y colocación del acero de refuerzo dispuestos en el cimientado.

$E_f$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en la elaboración y colocación de los materiales de encofrado necesarios para el cimientado.

$E_{sh}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en la elaboración y colocación del acero de refuerzo a cortante dispuestos en el cimientado.

$E_{ex}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en la ejecución de la excavación necesaria para el cimientado.

$E_r$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en la ejecución del relleno de la excavación no ocupada por el cimientado.

El valor de cada uno de los parámetros se corresponderá con lo indicado en el apartado anterior para los costes económicos, sustituyendo los parámetros asociados al coste económico por los relativos a la emisión de CO<sub>2</sub>, descritos en la tabla 3.5, quedando por tanto.

$$E_{CO_2}(kg) = V_{hormigon} \cdot e_{CO_2,c} + A_c \cdot 0,1 \cdot e_{CO_2,cl} + P_{armadura} \cdot c_{CO_2,s} + A_{encofrado} \cdot e_{CO_2,en} + P_{armadura\_cercos} \cdot e_{CO_2,sh} + |V_{ex} + V_{sobre\_ex}| \cdot e_{CO_2,ex} + V_{sobre\_ex} \cdot e_{CO_2,r}$$

Donde:

$e_{CO_2,c}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la elaboración y colocación de un m<sup>3</sup> hormigón dispuestos.

$e_{CO_2,cl}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la elaboración y colocación de una capa de 10 cm de hormigón de limpieza.

$e_{CO_2,s}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la elaboración y colocación de un kg de acero de refuerzo.

$e_{CO_2,en}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la elaboración y colocación de 1 metro cuadrado de encofrado.

$e_{CO_2,sh}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la elaboración y colocación de un kg de acero de refuerzo a cortante.

$e_{CO_2,ex}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la ejecución de un m<sup>3</sup> de excavación.

$e_{CO_2,r}$ : Se corresponde con la emisión de CO<sub>2</sub> en kg, para la ejecución de un m<sup>3</sup> de relleno.

Para la valoración de estos parámetros se adoptarán los valores recogidos en la base de datos **BEDEC** [4] de 2015 y cuyos valores se incluyen en el punto 3.2.5.

### 3.5.2.2 Función Objetivo 'Energía Consumida, (MJ)':

El segundo estimador adoptado para la evaluación del coste medioambiental, será el correspondiente a la Energía Consumida, en MJ, en la fabricación y colocación de los materiales constituyentes de la solución constructiva. El objetivo será por tanto minimizar esta Energía consumida.

Su valoración será similar a la Función Objetivo anterior,

$$C_{En}(MJ) = C_{En,c} + C_{En,s} + C_{En,f} + C_{En,sh} + C_{En,ex} + C_{En,r}$$

Donde:

$C_{En,c}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, en la elaboración y colocación del hormigón dispuesto en el cimiento.

$C_{En,s}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, en la elaboración y colocación del acero de refuerzo dispuestos en el cimiento.

$C_{En,f}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, en la elaboración y colocación de los materiales de encofrado necesarios para el cimiento

$C_{shb}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, en la elaboración y colocación del acero de refuerzo a cortante dispuestos en el cimiento.

$C_{En,ex}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, en la ejecución de la excavación necesaria para el cimiento

$C_{En,r}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, en la ejecución del relleno de la excavación no ocupada por el cimiento.

El valor de cada uno de los parámetros se corresponderá con lo indicado en el apartado anterior para los costes económicos, sustituyendo los parámetros asociados al coste económico por los relativos a la energía consumida, descritos en la tabla 3.5, quedando por tanto.

$$C = V_{hormigon} \cdot c_{En,c} + A_c \cdot 0,1 \cdot c_{En,cl} + P_{armadura} \cdot c_{En,s} + A_{encofrado} \cdot c_{En,en} + P_{armadura\_cerros} \cdot c_{En,sh} + |V_{ex} + V_{sobre\_ex}| \cdot c_{En,ex} + V_{sobre\_ex} \cdot c_{En,r}$$

Donde:

$c_{En,c}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la elaboración y colocación de un m<sup>3</sup> hormigón dispuestos.

$c_{En,cl}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la elaboración y colocación de una capa de 10 cm de hormigón de limpieza.

$c_{En,e}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la elaboración y colocación de un m<sup>3</sup> hormigón dispuestos.

$c_{En,s}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la elaboración y colocación de un kg de acero de refuerzo.

$c_{En,en}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la elaboración y colocación de 1 metro cuadrado de encofrado.

$c_{En,sh}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la elaboración y colocación de un kg de acero de refuerzo a cortante.

$c_{En,ex}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la ejecución de un m<sup>3</sup> de excavación.

$c_{En,r}$ : Se corresponde con la energía consumida en MJ, para la ejecución de un m<sup>3</sup> de relleno.

Para la valoración de estos parámetros se adoptarán los valores recogidos en la base de datos **BEDEC** [4] de 2015 y que se incluyen en el punto 3.2.5.

### 3.5.2.3 Función Objetivo 'Peso de la Solución, (kg)'

Como otro indicador del Coste Medioambiental, se propone el relativo al peso de los materiales de la solución. Este es el indicador más ampliamente utilizado por la bibliografía consultada, tal y como se describen en el punto 2.1. Se estimará que un mayor peso de los materiales constituyentes del cimiento, implica un consumo mayor de re-



cursos y por tanto, una solución menos sostenible. Por ello, el objetivo de búsqueda será el relativo a minimizar este parámetro.

Dado que no se conoce a priori la dependencia mayor o menor del peso de cada uno de los materiales, se propondrán varias sub-funciones que se describen a continuación:

- ‘Peso de Armadura Total’. Corresponderá con el peso, en kg, relativo únicamente al armado de la solución, incluyendo tanto el armado longitudinal como el armado de refuerzo a cortante. Su valor será:

$$P_{Total}(Kg) = P_s + P_{sh}$$

Donde:

$P_s$ : Se corresponde con el Peso en kg del armado longitudinal dispuesto.

$P_b$ : Se corresponde con el Peso en kg del armado a cortante dispuesto.

El valor de cada uno de los parámetros será.

$$P_{Total}(kg) = V_{armadura} \cdot p_s + V_{armadura\_cer\ cos} \cdot P_{sh}$$

Donde:

$p_s$ : Se corresponde con el peso correspondiente a la armadura longitudinal en kg.

$p_{sh}$ : Se corresponde con el peso de la armadura de cortante en kg.

- ‘Peso de la Armadura Longitudinal’. Corresponderá con el peso en kg, relativo únicamente al armado longitudinal de la solución, sin incluir el armado de refuerzo a cortante. Su valor será:

$$P_{Total}(Kg) = P_s$$

Donde:

$P_s$ : Se corresponde con el Peso en kg del armado longitudinal dispuesto.

El valor de cada uno de los parámetros será.

$$P_{Total}(kg) = V_{armadura} \cdot p_s$$

Donde:

$p_s$ : Se corresponde con el peso correspondiente a la armadura longitudinal en kg.

- ‘Peso Total’. Corresponderá con el peso en kg, relativo a todos los materiales dispuestos en la solución. Su valor será:

$$P_{Total}(Kg) = P_c + P_s + P_f + P_{sh} + P_r$$

Donde:

$P_c$ : Se corresponde con el peso en kg del hormigón dispuesto en el cimiento.

$P_s$ : Se corresponde con el Peso en kg del armado dispuesto.

$P_f$ : Se corresponde con el Peso en kg del encofrado

$P_b$ : Se corresponde con el Peso en kg del armado a cortante dispuesto.

$P_r$ : Se corresponde con el Peso en kg del relleno dispuesto.

El valor de cada uno de los parámetros se corresponderá con lo indicado en el apartado anterior para los costes económicos, sustituyendo los parámetros asociados al coste económico por los relativos al peso de cada componente, conforme a la tabla 3.5, quedando por tanto.

$$P_{Total}(kg) = V_{hormigon} \cdot p_c + A_c \cdot 0,1 \cdot p_{cl} + V_{armadura} \cdot p_s + A_{encofrado} \cdot p_{en} \\ + V_{armadura\_cercos} \cdot p_{sh} + V_{sobre\_ex} \cdot p_r$$

Donde:

$p_c$ : Se corresponde con el peso de los materiales constitutivos del hormigón.

$p_{cl}$ : Se corresponde con el peso de los materiales constitutivos del hormigón de limpieza.

$p_s$ : Se corresponde con el peso correspondiente a la armadura en kg.

$p_{en}$ : Se corresponde con el peso de los materiales de encofrado.

$p_{sh}$ : Se corresponde con el peso de la armadura de cortante en kg.

$p_r$ : Se corresponde con el peso de los materiales de relleno dispuestos.

Para la valoración de estos parámetros se adoptarán los valores recogidos en la base de datos **BEDEC** [4] de 2015 y que se incluyen en el punto 3.2.5.

#### 3.5.2.4 Función Objetivo ‘Consumo de agua (kg)’:

Como último indicador del Coste Medioambiental, se propone el relativo al peso de agua de los componentes constitutivos de los materiales de la solución. Se estimará que un mayor peso en agua de los componentes constituyentes del cemento, implica un consumo mayor de recursos y por tanto una solución menos sostenible. Por ello, el objetivo de búsqueda será el relativo a minimizar este parámetro. Su valor será:

$$P_{Agua\_Total}(Kg) = P_{Agua\_c}$$

Donde:

$P_{agua\_c}$ : Se corresponde con el peso en kg de agua contenida en el hormigón dispuesto en el cemento.

Por lo que:

$$P_{Agua\_Total}(kg) = V_{hormigon} \cdot P_{Agua\_c}$$

Donde:

$p_{Agua\_c}$ : Se corresponde con el peso de agua del hormigón dispuesto en la solución.

Para la valoración de estos parámetros se adoptarán los valores recogidos en la base de datos **BEDEC** [4] de 2015 y que se incluyen en el punto 3.2.5.

#### 3.5.3 Funciones de Evaluación de la ‘Constructibilidad’.

Por último, se describen los indicadores que pretenden evaluar la ‘facilidad constructiva’ de una solución de cimentación. Para ello, se proponen los siguientes índices:

- **Relación Perímetro / Área de la solución:** Adoptando este parámetro utilizado en el campo de la termodinámica, para definir la eficiencia en la disipación de Energía de los disipadores, se plantea la utilización de este índice, para la estimación de la facilidad constructiva de una solución de cimentación. A igual área de las soluciones, aquellas que presenten perímetros menores se corresponderán con soluciones más fácilmente ejecutables, por el menor requerimiento de encofrado.
- **Número de Barras de armado de la solución.** La obtención de soluciones con menor número de barras de armado, implicarán una mayor rapidez constructiva, buscándose por tanto minimizar este parámetro.
- **Número de Tipos de Barras distintos de la solución.** La obtención de soluciones con menores tipos de barras distintos, implicarán una mayor rapidez constructiva y reducción de los posibles errores de armado, buscándose por tanto minimizar este parámetro

- **Diámetro medio de la solución.** Se evaluará este parámetro aportado por **Callavera et al [5]**, en base a uno estudios realizados en Holanda, donde se pondera cada diámetro de armado dispuesto, con el peso aportado por el mismo, de forma que el parámetro presenta un valor máximo, correspondiente a la disposición de todo el armado de la solución con el diámetro más elevado permitido. Se tratará por tanto de maximizar este parámetro ya que en el estudio realizado se estimaba que valores altos de este parámetro arrojaban óptimos tanto económicos como de ‘facilidad de ejecución’.
- **Uniformidad de Armado:** Este índice utilizado por **Koutmosis [6]** en su estudio relativo a la optimización de pórticos de hormigón, tiene por objeto establecer como soluciones más fácilmente construibles, aquellas que presentan un menor número de diámetros distintos en su armado, las cuales generan un valor de uniformidad elevado. Se buscará por tanto maximizar esta función, con objeto de maximizar la ‘constructibilidad’ de la solución.

Por último indicar que las funciones, “Peso de la solución”, descritas en el apartado de funciones de Coste medioambiental, también podrían considerarse dentro de este apartado, puesto que soluciones de menor peso también indicarían soluciones más fácilmente ejecutables.

A continuación se describen cada uno de los índices indicados anteriormente:

#### 3.5.3.1 Función Objetivo ‘Relación Perímetro / Área, ( $mm^{-1}$ )’.

Se adopta como índice de constructibilidad la relación entre el perímetro y el área de la solución, a semejanza del índice utilizado en el campo de la termodinámica para la determinación de la máxima eficiencia en los disipadores. Se trata de identificar en soluciones de igual área, aquellas que presenten menores perímetros, interpretando que en estos casos se facilitará la ejecución de estos cimientos, al disponer de menor perímetro a encofrar.

#### 3.5.3.2 Función Objetivo ‘Número de Barras’.

En este caso, se evaluará el número total de barras de armado que componen la solución en cada caso. De cara a poder determinar la importancia de cada tipo de armado dispuesto, se diferenciarán dos funciones:

- “Número de Barras Longitudinales” que solo incluirá el número de armaduras longitudinales dispuestas en la solución, sin incluir la posible armadura de refuerzo a cortante dispuesta.
- “Número de Barras Total” que incluirá tanto el armado longitudinal como las posibles barras verticales que conforman los armados a cortante en algunos de los modelos de solución propuestos.

En todos los casos, un menor número de barras supondrá una mayor facilidad para la ‘constructibilidad’ del cimiento.

### 3.5.3.3 Función Objetivo ‘Número de Tipos de Barras distintos’.

Esta función evaluará el número de barras de diámetro distinto que compone la solución de armado. Se estimará que un menor contenido de barras diferentes, supone una mayor facilidad de construcción de la cimentación, dificultando a su vez la aparición de errores durante la colocación del armado, por lo que el objetivo de optimización será el de minimizar este índice.

### 3.5.3.4 Función Objetivo ‘Diámetro Medio Equivalente’.

Este índice, se describe en **Calavera et al [5]** en la publicación, **Manual de Ferralla**, publicado por Anifer. En él, se hace referencia a estudios realizados en Holanda y recogidos en el informe CUR-E2 que establecieron como conclusiones que el coste de kg de armadura colocada se podía descomponer en:

- Coste Oficina Técnica 8 %
- Coste del acero 52 %
- Coste del corte, doblado y colocación 40 %.

En el mismo estudio se establece el índice ‘Diámetro Medio’ como la relación:

$$\phi_{med} = \sqrt{\frac{P_{\phi_1} + P_{\phi_2} + \dots + P_{\phi_n}}{\frac{P_{\phi_1}}{\phi_1^2} + \frac{P_{\phi_2}}{\phi_2^2} + \dots + \frac{P_{\phi_n}}{\phi_n^2}}}$$

Donde

- $P_{\phi_i}$  es el peso total de armaduras de diámetro  $\phi_i$  en toneladas y los diámetros se expresan en mm.

Del mismo modo se aporta el siguiente gráfico donde se muestra la relación del tiempo necesario para colocar una tonelada de  $\phi_{med}$ , en % de tiempo para colocar 1 tonelada de diámetro 6 mm, así como las Horas-Hombre / tonelada de colocación necesarias.

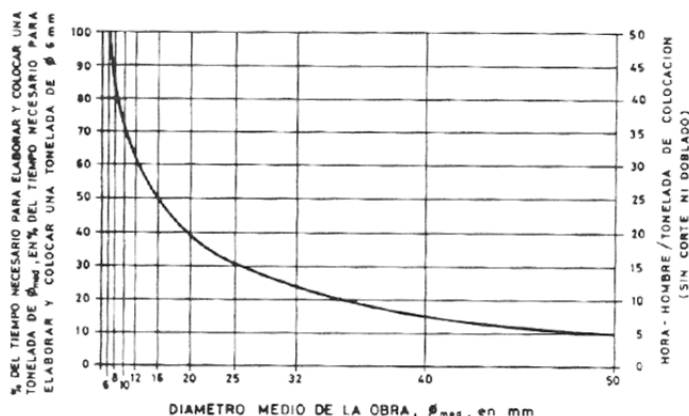


Figura 3.7. Índice Diámetro Medio- Calavera et al. [5].

Como se puede apreciar, valores altos del índice  $\phi_{med}$ , asociados al empleo de diámetros de armadura elevados, implican menor número de Horas – Hombre de colocación, por lo que se tratará por tanto de maximizar este índice para optimizar el tiempo de colocación, mejorando por tanto la rapidez de ejecución de la solución. Esta función objetivo, debería ser coincidente con la función objetivo ‘Número de barras’, descrita anteriormente, puesto que un menor número de barras, implicará el uso de diámetros mayores.

En este caso, si se conoce inicialmente el valor óptimo absoluto, que se corresponderá con la disposición de todo el armado del cimiento con la armadura de mayor diámetro permitido. En nuestro caso, al ser este diámetro de 25 mm, el valor máximo alcanzable para este parámetro será  $DM = 25$  mm.

### 3.5.3.5 Función Objetivo ‘Uniformidad de Armado’.

Este índice, que trata de valorar la ‘constructibilidad’ de la solución, fue empleado por Koumouis [6], en su estudio relativo a la optimización de pórticos de hormigón, desde el punto de vista de la constructibilidad. Para ello, propone tres funciones objetivos distintos, ‘Mínimo Peso’, ‘Mínimo número de barras’ y ‘Máxima Uniformidad’. Para determinar este último objetivo, establece el índice de Uniformidad de Armado definido como:

$$U = 100 - (N - 1) \cdot (100 / ND)$$

Donde:

- N es el número de diámetros distintos utilizados
- ND es el número total de diámetros distintos existentes

Dado que existen dos tipologías de armado claramente diferenciadas, se aportaran dos índices distintos, estableciéndose por tanto los índices:

- Uniformidad de Armado Longitudinal.
- Uniformidad de Armado Total.

El índice, sin embargo, presenta el inconveniente de valorar de igual manera la presencia de diámetros con muy distintas cuantías.

### **3.6 Restricciones. Comprobaciones estructurales.**

Tal y como se indicó anteriormente, las restricciones definirán todos aquellos condicionantes cuyo cumplimiento ha de asegurarse para validar una solución.

Dentro de las restricciones, diferenciaremos entre **Restricciones de Tipo Constructivo** y **Restricciones de comportamiento mecánico**, pudiendo ser estas distintas en función del modelo de cimentación analizado. Se describe a continuación de manera general cada una de ellas:

- **Restricción de Tipo Constructivo:** Este tipo de restricciones nos limitarán aspectos relativos a la geometría y armado de la solución. Distinguiremos entre:
  - Dominio de las variables de diseño. Acotarán los límites de existencia de las variables del problema, tanto las relativas a la geometría de la solución, como al armado de la misma. Ver punto 3.3
  - Patrones de armado. Estas restricciones definirán los distintos patrones de armado posibles para cada uno de los modelos de cimentación adoptados. En los puntos 3.5.2 a 3.5.5 se describirán los adoptados en este estudio.
- **Restricciones de Comportamiento Mecánico:** Estas restricciones incluyen aquellas limitaciones que de ser superadas, implican que la estructura no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectada. Estas restricciones vendrán impuesta en la mayoría de los casos por la normativa vigente, que en el caso del presente trabajo se corresponderá con la normativa Española (**EHE-08 [1]** y **CTE [2]**), más algún condicionante adicional recogido de la bibliografía de referencia y que se describirá posteriormente en cada caso concreto. Podremos distinguir entre:
  - Seguridad Estructural. Definidas como aquellas restricciones que garantizan que no se produce un fallo en el cimiento por pérdida de equilibrio, colapso o rotura del mismo.
  - Aptitud al servicio. Definidas como aquellas restricciones que garantizan que se cumplen los requisitos de funcionalidad o comodidad.

- Durabilidad. Se engloban aquí las restricciones que limitan las acciones físicas y químicas, diferentes a las cargas y acciones del análisis estructural, que pueden degradar las características de los materiales, hormigón o acero, de la solución.

A continuación, se describen de manera sucinta, las restricciones de comportamiento mecánico impuestas por las normativas contempladas en el presente estudio para el dimensionado de las distintas soluciones de cimentación analizadas.

### 3.6.1 Restricciones de comportamiento mecánico según CTE [2] y EHE-08 [1].

Siguiendo las indicaciones reflejadas en el Código Técnico de la Edificación, CTE [2] DB SE-C, el comportamiento de la cimentación debe verificarse respecto a la capacidad portante (Resistencia y Estabilidad) y la aptitud al servicio. Del mismo modo, se seguirán las indicaciones reflejadas en la actual instrucción de Hormigón Estructural Española, EHE-08 [1], para el dimensionado y comprobación de los elementos de hormigón armado de las cimentaciones.

Así pues, para el dimensionado y comprobación de los elementos de cimentación se recurrirá al método de los estados límites, descrito en ambas normativas, empleando el articulado de la EHE [1] en relación con las comprobaciones relativas a la capacidad resistente del elemento de hormigón, mientras que se recurrirá al articulado del CTE [2] en relación al resto de comprobaciones, (Estabilidad al vuelco, deslizamiento, capacidad portante del terreno, etc..).

#### 3.6.1.1 Estados Límites.

Siguiendo la definiciones recogidas en el CTE [2] DB SE Bases de cálculo, se denominará como estados limite, a aquellas situaciones para las que de ser superadas, puede considerarse que el cimienta no cumple alguno de los requisitos estructurales para los que ha sido concebido.

Así pues, los estados límites a comprobar serán:

- Estados Limite de Servicio: Son los que de ser superados, afectan al confort y bienestar de usuarios o terceras personas, al correcto funcionamiento, o a la apariencia. Así distinguiremos entre.
  - Estado Límite de Servicio de Deformación Excesiva. Las limitaciones del mismo se recogen en el art 2.4.3. de DB SE-C de CTE [2], imponiéndose limitaciones relativas a la máxima distorsión angular vertical y horizontal admisible.
  - Se limitarán los valores de tensión media transmitida al terreno. Adicionalmente y atendiendo a lo reflejado en la anterior normativa Española de acciones, NBE AE-88 [11], se permitirá una tensión máxima puntual, que exceda un 25% la tensión máxima admisible.



- Estado Límite de Servicio de Vibraciones. Al igual que el caso anterior, el DB SE-C de CTE [2], impone valores límite máximos de los componentes del vector velocidad del terreno y de la cimentación. En el presente trabajo no se contemplan estas comprobaciones, suponiendo que este aspecto no es limitativo.
- Estados Límites Últimos: Son los que, de ser superados constituyen un riesgo para las personas.
  - Verificaciones de Estabilidad.
    - Estado Límite Último de Estabilidad al vuelco. Se verificará el equilibrio de la cimentación ante la acción de los distintos efectos estabilizantes y desestabilizantes actuantes, de acuerdo a lo indicado en el DB SE-C de CTE [2] artículo 2.4.2.2. Se producirá este modo de rotura en cimentación que hayan de soportar cargas horizontales y momentos importantes.
    - Estado Límite Último de Estabilidad frente a la subpresión. El presente trabajo no incluye los efectos de niveles freáticos por encima de la cota de apoyo de los elementos de cimentación, por lo que no se verificará este estado.
    - Estado Límite Último de Estabilidad Global. Se producirá este modo de fallo cuando se forme una superficie de rotura continua que englobe una parte o toda la cimentación y en la que los esfuerzos de corte alcancen el valor de la resistencia al corte del terreno. Es típico en cimientos próximos a coronación de taludes de excavación o relleno. El presente trabajo no incluye la posibilidad de apoyo del cimiento en las proximidades de taludes, por lo que no se verificará este estado.
  - Verificaciones de Resistencia del terreno.
    - Estado Límite Último de Hundimiento. El hundimiento se alcanzará cuando la presión actuante (total bruta) sobre el terreno bajo la cimentación, supere la resistencia característica del terreno frente a este modo de rotura. En el presente estudio, se supondrá que el valor del parámetro, *Tensión admisible del terreno*, ya se ha determinado verificando las limitaciones impuestas, en relación al ELU de Hundimiento com.
    - Estado Límite Último de Deslizamiento. Este estado permitirá asegurar la resistencia local del terreno ante el deslizamiento. Dado que se supondrá en todos los casos evaluados en este estudio, que el terreno de apoyo presenta una superficie sensiblemente horizontal, este estado

vendrá condicionado por la existencia de esfuerzos horizontales en la base de la cimentación. En todo caso, se seguirá lo dispuesto en el artículo 2.4.2.2 del DB SE-C de CTE [2]. Se podrá producir este modo de rotura cuando, en elementos que hayan de soportar cargas horizontales, las tensiones de corte en el contacto de la cimentación con el terreno superen la resistencia de este contacto.

- Verificación de la capacidad estructural de la cimentación.
  - En este caso, atendiendo a lo reflejado en el artículo 2.4.2.4 de DB SE-C de CTE [2], este aspecto se verificará de acuerdo a la instrucción EHE-08. Así los estados a verificar serán:
    - Estado límite último. Agotamiento frente a sollicitaciones normales. Flexión.
    - Estado límite último de agotamiento frente a cortante
    - Estado límite último de agotamiento frente a punzonamiento

Todos los estados límite enumerados se describirán, para cada modelo de cimentación, en los siguientes apartados.

- Durabilidad. Mediante su comprobación se confirma que la influencia de las acciones químicas, físicas o biológicas a las que está sometido el cemento, no comprometen su capacidad portante. Para ello, se tendrán en cuenta estas acciones mediante el método implícito recogido en la instrucción EHE-08 [1], a través de medidas preventivas relacionadas con las características de los materiales, detalles constructivos y sistemas de protección. Estas medidas dependerán entre otras de las condiciones de exposición. Para el presente trabajo se partirá de los siguientes supuestos:

- Ambiente de exposición IIa,
- Vida útil del proyecto 50 años.
- Resistencia característica del hormigón inferior a  $40 \text{ N/mm}^2$ .
- Tipo de cemento distinto a CEM1 o empleo de adiciones al hormigón.

Las exigencias recogidas en EHE-08 [1] para asegurar el E.L.S. de durabilidad, bajo estos supuestos, serán según art 37.2.5 las siguientes:

- Recubrimiento nominal de las armaduras  $r_{\text{nom}}=30 \text{ mm}$ . Se establece en todos los casos la disposición de una capa de hormigón de limpieza de 10cm.
- Caso de piezas hormigonadas contra el terreno  $r_{\text{nom}}=80 \text{ mm}$ . Este será el valor adoptado para los laterales del cimiento.
- Máxima relación agua/cemento = 0.6.
- Mínimo Contenido en cemento  $275 \text{ kg/m}^3$ .
- Recomendándose al menos un hormigón de  $25 \text{ N/mm}^2$ .

Dado que siempre se impondrán inicialmente estas condiciones, no será necesaria la comprobación de esta restricción de durabilidad.

Se incluyen a continuación una descripción detallada de las distintas restricciones existentes para cada uno de los modelos de cimentación propuestos.

### 3.6.2 Zapatas Aisladas (Modelo 1).

Definiremos como zapata aislada, como aquella sobre la que actúan las cargas de un solo pilar, no disponiendo de conexión mecánica con ningún otro elemento de cimentación ni estructural. En el presente estudio solo se analizarán zapatas rectangulares o cuadradas y en todos los casos se dispondrá un canto constante.

Para el dimensionamiento de estos elementos se seguirán las prescripciones contenidas en la actual instrucción de Hormigón Estructural Española, EHE-08 [1], en su artículo 58 y el Documento Básico DB SE-C de CTE [2],

#### 3.6.2.1 Dominio de las variables de diseño.

Se incluye a continuación la descripción de las variables de diseño, así como sus rangos de variación.

- Variables de Primer Orden: Variables Geométricas:

En la siguiente tabla se muestran las variables geométricas, así como sus valores máximos, mínimos y rangos de variación.

**Tabla 3.16. Variables Geométricas Zapatas aisladas.**

<b>MODELO 1: ZAPATAS AISLADAS</b>				
	<b>Designación</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Incremento (mm)</b>
Zapata 1: Dimensión en dirección x	$A_1$	5.000	1.000	$\pm 100$
Zapata 1: Dimensión en dirección y	$B_1$	5.000	1.000	$\pm 100$
Zapata 1: Canto de la zapata	$H_1$	2.000	250	$\pm 50$
Zapata 2: Dimensión en dirección x	$A_2$	5.000	1.000	$\pm 100$
Zapata 2: Dimensión en dirección y	$B_2$	5.000	1.000	$\pm 100$
Zapata 2: Canto de la zapata	$H_2$	2.000	250	$\pm 50$

Normativamente, la instrucción EHE-08 [1] art 58.8, impone un canto mínimo de 25 cm, aspecto que viene condicionado principalmente para lograr una suficiente longitud de anclaje para las armaduras longitudinales del soporte que la acometen.

Para las dimensiones en planta, se adoptará como criterio la disposición de unos valores mínimos de 1.00 x 1.00 m en el caso de zapatas aisladas.

Adicionalmente, se incluirá una restricción geométrica relativa a la máxima relación permitida entre lados de zapatas, que atendiendo a la práctica habitual se situara en un valor de  $B_1/A_1 < 2$ .

– Variables de Primer Orden: Variables relativas a los Materiales:

Este tipo de variables definirán las características de los materiales constituyentes del cimiento, (acero corrugado y hormigón a utilizar). La designación de los mismos, así como el rango de valores que es posible adoptar, se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 3.17. Variables de Materiales, Zapatas aisladas.**

Variables de Materiales		
	Designación	Rango de Valores
Hormigones	$f_{ck}$	$f_{ck} = 25 / 30 / 35$ (N/mm <sup>2</sup> )
Aceros	$f_{yk}$	$f_{yk} = 400 / 500$ (N/mm <sup>2</sup> )

El rango de valores adoptados para estas variables será el mismo para todos los modelos de cimentación incluidos en el presente estudio.

– Variables de Primer Orden: Variables de Armado:

En relación a las variables de armado de primer orden definidas en 3.3.1, se incluye en la siguiente tabla sus valores discretos posibles, acorde con los valores de diámetro existente y habitualmente utilizados. Como valor mínimo de diámetro, se adoptará el valor de 12 mm, establecido como recomendación en los comentarios del artículo 58.8.2 de EHE-08 [1].

**Tabla 3.18. Variables de Armado, Zapatas aisladas.**

MODELO 1: ZAPATAS AISLADAS			
	Designación	Valores (mm)	
<b>Zapata 1</b>			
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{1xinf}$	12,16,20,25	
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{1yinf}$	12,16,20,25	
<b>Zapata 2</b>			
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	$D_{2xinf}$	12,16,20,25	
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	$D_{2yinf}$	12,16,20,25	

– Variables de Segundo Orden: Variables de Armado:

Como variables de segundo orden, estarán las relativas al número de barras de acero corrugado de los distintos armados dispuestos. Se incluye en la siguiente tabla sus valores máximos y mínimos así como sus posibles incrementos.

**Tabla 3.19. Variables de Armado (2° orden), Zapatas aisladas.**

<b>MODELO 1: ZAPATAS AISLADAS</b>				
	<b>Designación</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Incremento</b>
<b>Zapata 1</b>				
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 1	$n_{1x\text{inf}}$	(*)	2 (**)	±1
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 1	$n_{1y\text{inf}}$	(*)	2 (**)	±1
<b>Zapata 2</b>				
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' de la zapata 2	$n_{2x\text{inf}}$	(*)	2 (**)	±1
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' de la zapata 2	$n_{2y\text{inf}}$	(*)	2 (**)	±1

(\*) y (\*\*). Los valores relativos al máximo y mínimo número de redondos de armado vendrán condicionados además por los siguientes criterios.

#### Cuantía geométrica mínima.

Las cuantías de armado mínimas a disponer, serán las reflejadas por la instrucción EHE-08 [1] en su artículo 42.3.5. Así:

**Tabla 3.20. Cuantías de armado, Zapatas aisladas.**

	<b>Acero <math>f_y=400</math> N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Acero <math>f_y=500</math> N/mm<sup>2</sup></b>	<b>Referencia</b>
Armaduras Longitudinales			EHE-08 [1]
Losas (1)	2.0	1.8	Art 42.3.5

Indicándose en el articulado, que para el caso de zapatas armadas, se adoptarán la mitad de estas cuantías en cada dirección, dispuestas en la cara inferior.

#### Distancias mínimas/máximas entre barras de armado longitudinal.

En relación a las limitaciones relativas a la separación entre barras de armado se seguirá lo indicado en la instrucción EHE-08 [1] art 58.8.2. Así:

**Tabla 3.21. Distancias mínimas/máximas, Zapatas aisladas.**

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
Separación máxima entre armaduras longitudinales	30 cm	EHE.08 [1] art 58.8.2
Separación mínima entre armaduras	10 cm	Calavera [3]

### 3.6.2.2 Patrones de armado.

Se muestra en la siguiente figura el modelo adoptado para la distribución de armado de las soluciones correspondientes al modelo de zapatas aisladas.

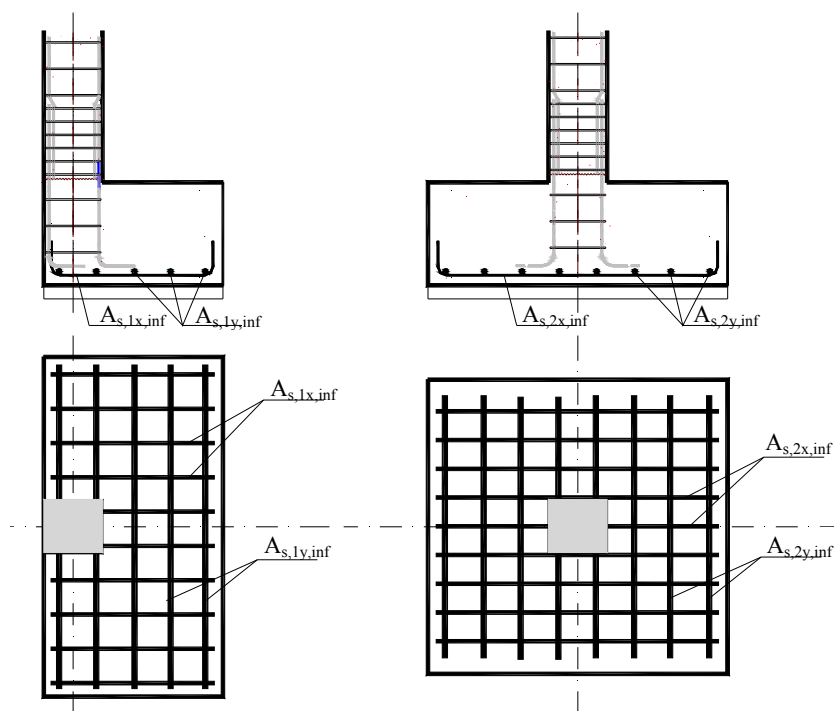


Figura 3.8. Patrón de armado para zapatas aisladas.

El modelo de armado que se propone garantiza que las distintas soluciones propuestas sean construibles, debiéndose garantizar a su vez las limitaciones geométricas, (ya descritas en el punto 3.5.2.1.) , y los campos de existencia de las variables de armado, definidos anteriormente.

### 3.6.2.3 Modelos de distribución de tensiones en el terreno.

Tal y como se describió anteriormente, la transmisión de cargas del soporte de un edificio al terreno es un problema complejo en el que intervienen el comportamiento de tres elementos, el edificio, el cimiento y el terreno de apoyo.

Los parámetros influyentes son:

- Características mecánicas y de rigidez del estrato o estratos de terreno afectados por las presiones transmitidas.
- Características geométricas, mecánicas y de rigidez del cimiento

- Características de rigidez de la estructura.

Los fenómenos de interacción suelo-cimiento-estructura que tiene lugar, incrementan notablemente la complejidad de los modelos matemáticos a utilizar, por lo que habitualmente no se tienen en cuenta algunas de las interacciones o se emplean métodos simplificados.

En la práctica habitual, se suele adoptar una distribución uniforme de presiones, que presenta un razonable parecido a la realidad, salvo para el caso de zapata flexible apoyada en suelos sin cohesión.

CTE [2] establece para el caso de suelos homogéneos y edificaciones sencillas, la posibilidad de emplear métodos basados en el modelado del terreno por medio de coeficientes de balasto, sistema que cuenta con una amplia experiencia práctica.

Para el caso de suelos heterogéneos en sentido horizontal o edificaciones complejas se recomienda emplear modelos más avanzados.

En el presente estudio se evaluarán dos modelos de interacción, cuyas características se describen a continuación:

#### Modelo I: Método convencional o Método de cimiento rígido

El primer modelo de interacción es el más comúnmente considerado para el dimensionado de cimientos actualmente, siendo además el que menos complejidad de cálculo presenta.

Se supondrá que la cimentación es infinitamente rígida y por tanto la deformación de la misma no influye en la distribución de presiones en el terreno. La presión del terreno sigue una distribución lineal, de tal forma que el centroide de las presiones, coincide con la resultante de las fuerzas actuantes.

El modelo supondrá un comportamiento rígido para el Cimiento (Indeformable). El terreno no situado bajo el cimiento no experimenta deformaciones.

Se considerará que una zapata es rígida cuando a efectos de cálculo la distribución de presiones a que da lugar sobre el terreno pueda considerarse lineal. Las condiciones de rigidez a verificar serán las recogidas en CTE [2] y ya comentadas en puntos anteriores:

Zapatas aisladas:

$$v \leq \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot k_{SB}}}$$

Siendo:

v: Es el vuelo de la zapata en una dirección cualquiera.

- $E_c$ : Es el módulo de deformación del material de la zapata, (usualmente hormigón armado) representativo del tipo de carga y su duración.
- $I_c$ : Es el momento de inercia de la sección de la zapata perpendicular a la dirección del vuelo considerado respecto a la horizontal que pasa por su centro de gravedad.
- $B$ : Es el ancho de la zapata en dirección perpendicular al vuelo considerado.
- $k_{sB}$ : Es el módulo de balasto de cálculo, representativo de las dimensiones del cimiento.

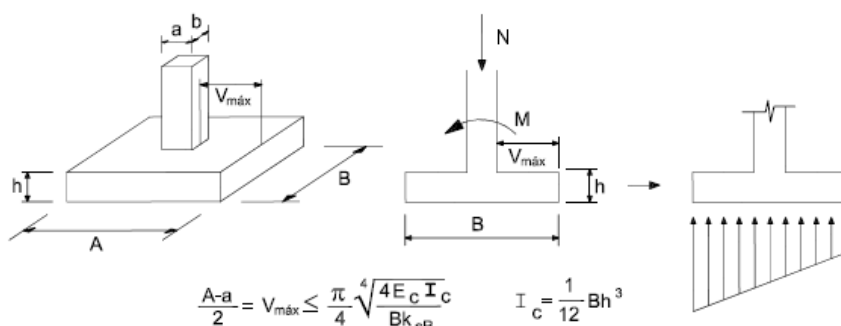


Figura 3.9. Condiciones rigidez para zapatas aisladas. CTE [2],

El valor de  $K_{sB}$  se obtendrá a partir del módulo de balasto para placa de 30x30 cm y para cada tipo de terreno según las siguientes relaciones.

Para suelos granulares y zapata cuadrada de valor :

$$K_{sB} = K_{sp30} \cdot \left( \frac{B+30}{2 \cdot B} \right)^2$$

Para suelos cohesivos:

$$K_{sB} = K_{sp30} \cdot \frac{30}{B}$$

En caso de zapatas no cuadradas, se aplicará sobre este valor la relación.

$$K_{sBL} = K_{sB} \cdot \left( 1 + \frac{B}{2 \cdot L} \right)$$

Si se verifican las condiciones anteriores, se establece como hipótesis inicial el hecho de que la zapata sea rígida.



Modelo II. Método elástico simplificado,

Este modelo asumirá que el cimiento no es infinitivamente rígido y el comportamiento del terreno se asemeja a un número infinito de resortes, cuyo comportamiento es independiente uno de otro. Los resortes funcionarán a compresión mediante una ley proporcional entre presión y desplazamiento a través de la constante K del resorte

En este segundo modelo de interacción, no se impondrán condiciones de rigidez al cimiento, que podrá presentar comportamiento rígido o flexible.

En cuanto a la modelización del comportamiento del suelo de apoyo se supone una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes. El terreno no situado bajo el cimiento no experimenta deformaciones. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga, pero sin estar coaccionado por otros a través del cimiento.

Basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimiento al suelo y el asiento en este mismo punto.

$$y = \sigma / K$$

Donde K es el Módulo de Balasto del terreno

Partiendo de la ecuación de la curvatura en piezas lineales flectadas:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

Como:

$$\frac{dM}{dx} = -V \quad \text{y} \quad \frac{dV}{dx} = q \cdot b - \sigma \cdot b$$

Siendo b el ancho del cimiento

Operando suponiendo que EI es cte:

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{d^2 M}{dx^2} = q \cdot b - \sigma \cdot b = b(q - K \cdot y)$$

Siendo K el Módulo de balasto del terreno

Con lo que:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4}$$

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + K \cdot b \cdot y - q \cdot b = 0$$

La integración de la ecuación de diferencias, dará como resultado la ecuación de la deformada.  $y=f(x)$ . A partir de ella, se obtendrá la ley de presiones sobre el terreno:

$$\sigma = K \cdot f(x)$$

Y a partir de ella, la ley de momentos actuantes:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$$

#### 3.6.2.4 Aptitud al Servicio. E.L.S. de Tensiones en el Terreno.

Esta comprobación verificará que los valores medios de tensión transmitida por la zapata al terreno de apoyo, no sobrepasan los valores límites que puede soportar el terreno y que vienen fijados por el parámetro  $\sigma_{adm}$ .

Como criterio adicional y siguiendo las indicaciones recogidas en la normativa española (ya derogada), **NBE-AE-88 [11]** “**Acciones en la edificación**”, en su apartado 8.6. “*Cuando la actuación de cargas sobre el cimiento produzca por su excentricidad presiones no uniformes sobre el terreno, se admitirá en los bordes un aumento del 25 por 100 en la presión admisible, siempre que la presión en el centro de gravedad de la superficie de apoyo no exceda de la presión admisible.*”

Por tanto se deberán verificar las siguientes condiciones:

- Condición 1:  $\sigma_{media} \leq \sigma_{admisibile}$
- Condición 2:  $\sigma_{maxima} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisibile}$

Se describe a continuación el proceso de verificación del ELS Tensiones en el terreno en función del modelo de interacción adoptado.

#### Modelo I. Cimiento Rígido:

Como se indicó enteramente, para la adopción de este modelo se han debido de verificar primero unas condiciones que permiten definir el comportamiento del cimiento como rígido, lo que implicará una distribución de presiones sobre el terreno lineal a lo largo de la zapata.

El primer paso, será la traslación de los esfuerzos aplicados en los soportes a la base de la zapata. Los esfuerzos considerados en los soportes serán aquellos obtenidos a través de la combinación de acciones incluidas en el Estado Límite de Servicio ya definidas en el punto 3.3.4.

Considerando el caso más general, una zapata sometida a un axil ( $N_k$ ), su propio peso, un momento actuante en el plano xz ( $M_{kx}$ ) y un cortante en el mismo plano ( $V_{kx}$ ), y con pilar excéntrico respecto al centro geométrico de la zapata, este se puede reducir a un sistema formado por un Axil un cortante y un Momento refiriendo los esfuerzos a la base de la zapata, de forma que el nuevo sistema estará sometido a los esfuerzos:

$$N_{Total,k} = N_k + P_{Pesozapata}$$

$$M_{Total,x,k} = M_k + V_k \cdot H - N_k \cdot e_x$$

Donde definiremos:

$$e_x = \frac{M_{Total,k}}{N_{Total,k}}$$

Que definiremos como excentricidad de la carga en direcciones x.

Así pues, el problema inicial queda reducido a la solución de una zapata sometida a una excentricidad  $e_x$ , referida a un sistema de referencia ortogonal, con origen en el centro geométrico de la zapata. El parámetro  $e_x$  puede tomar claramente valores negativos ya que esto dependerá del sentido de los momentos actuantes.

Los diferentes bloques de presiones que se distinguirán según la zona donde se posicione el parámetro  $e_x$ , serán los siguientes:

Caso 1: Toda la zapata transmite tensiones.

Este primer caso corresponde a posiciones del termino  $e_x$ , que provoca que toda la zapata se encuentre en compresión, es decir la resultante se situará sobre el núcleo central de inercia.

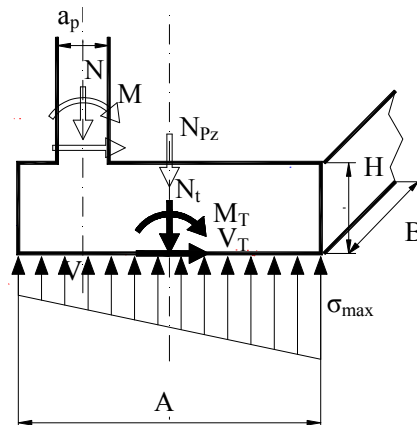


Figura 3.10. Zapata Aislada. Modelo lineal de tensiones (Caso 1).

El campo de existencia de esta zona vendrá impuesto por los valores que hagan positiva las tensiones en esquina de la zapata, calculadas a través de la ecuación de Navier.

$$\sigma_2 = \frac{N_{Total}}{A \cdot B} \cdot \left(1 \pm \frac{6 \cdot e_x}{A}\right) = 0$$

Por lo que el campo de existencia vendrá determinado por:

$$\frac{e_x}{A} < \frac{1}{6}$$

Denominando:

$$\varepsilon_x = \frac{e_x}{A}$$

Queda finalmente:

$$0 \leq \varepsilon_x \leq \frac{1}{6}$$

Esta última ecuación establece los límites de validez de la ecuación de Navier, que se corresponden con la posición de un rombo con centro en el centro geométrico de la zapata y que se denomina núcleo central de inercia.

Sustituyendo en la ecuación de Navier.

$$\sigma = \frac{N_{Total}}{A \cdot B} \pm \frac{M_{Total} \cdot x}{I_x}$$

donde:

- $N_{Total}$  y  $M_{Total,x}$ , se definieron en el apartado 2.3.1.
- A y B son las dimensiones de la zapata
- $I_x$  es el momento de inercia respecto al eje x.
- x, es la distancia del centro de gravedad a la fibra más alejada.

Para el caso de zapatas rectangulares, sustituyendo en la ecuación anterior los valores de los momentos de inercia y distancia a las fibras más alejadas:

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot B \cdot A^3 \quad \text{y} \quad x = \frac{A}{2}$$

$$\sigma = \frac{N_{Total}}{A \cdot B} \pm \frac{6 \cdot M_{Total,x}}{A^2 \cdot B}$$

Sustituyendo en la ecuación los valores de los esfuerzos totales, se obtiene la ecuación:

$$\sigma = \frac{N_k + P_{\text{Pesozapata}}}{A \cdot B} \pm \frac{6 \cdot (M_{x,k} + V_{x,k} \cdot H - N_k \cdot e_x)}{A^2 \cdot B}$$

donde:

$$P_{\text{Pesozapata}} = A \cdot B \cdot P_h \cdot H$$

Con  $P_h$ : Peso específico del hormigón armado = 2.5 t/m<sup>3</sup>.

Por tanto las condiciones a verificar serán:

- Condición 1:  $\sigma_{\text{media}} \leq \sigma_{\text{admisible}}$
- Condición 2:  $\sigma_{\text{maxima}} \leq 1.25 \cdot \sigma_{\text{admisible}}$

$$\sigma_{\text{media}} = \frac{N_k + A \cdot B \cdot P_h \cdot H}{A \cdot B} \leq \sigma_{\text{admisible}}$$

$$\sigma_{\text{maxima}} = \frac{N_k + A \cdot B \cdot P_h \cdot H}{A \cdot B} \pm \frac{6 \cdot (M_{x,k} + V_{x,k} \cdot H - N \cdot e_x)}{A^2 \cdot B} \leq 1.25 \cdot \sigma_{\text{admisible}}$$

### Caso 2. Zonas de zapata no transmiten tensión al terreno.

El segundo caso, se dará cuando empiezan a aparecer esquinas del cimiento que no transmiten tensiones al terreno, es decir el cimiento dispone de zonas en despegue.

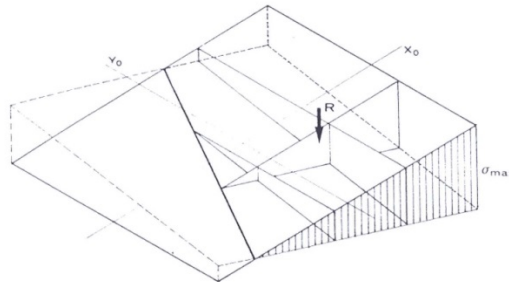


Figura 3.11. Zapata Aislada. Modelo lineal de tensiones (Caso II).

El campo de existencia de esta solución, vendrá dado por:

$$e_x > \frac{1}{6} \cdot A$$

Tal y como se describió anteriormente, en estos casos no es posible la utilización de la formulación de Navier, ya que ello implicaría la suposición de que existen zonas de la zapata que transmitirían tracciones al terreno.

Para la solución del sistema, se aplicarán las condiciones de equilibrio, obteniéndose:

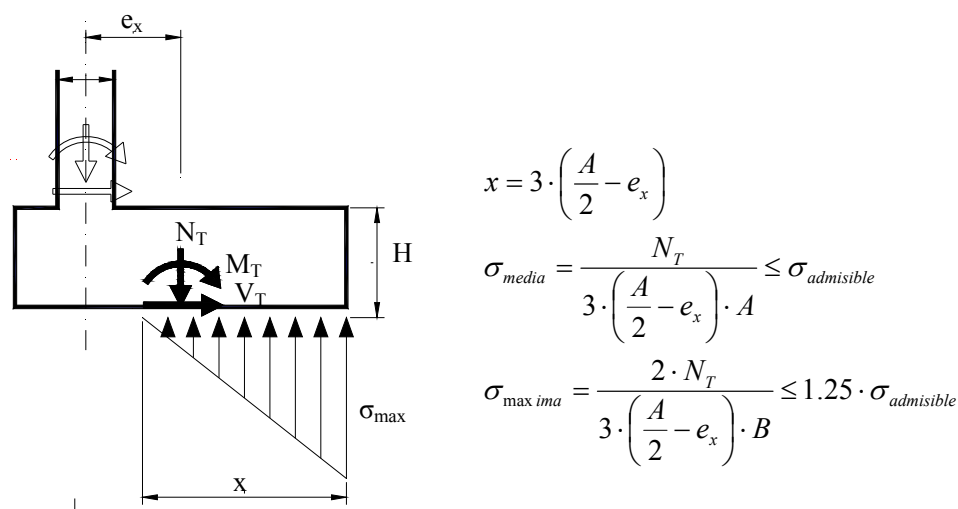


Figura 3.12. Zapata Aislada. Modelo lineal de tensiones (Caso II). Equilibrio

#### Modelo II: Método elástico simplificado.

Al contrario que en el caso anterior, con este modelo se permitirán comportamientos flexibles de los cimientos. Para la modelización del comportamiento del suelo, se supondrá una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes.

El modelo está basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimiento al suelo y el asiento en este mismo punto. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga, pero sin estar coaccionado por otros a través del cimiento.

Se modelizará el suelo mediante la teoría del coeficiente de balasto de winkler, suponiendo que la presión que ejerce el terreno sobre el elemento es directamente proporcional al asiento a través de la constante de proporcionalidad, "Coeficiente de balasto K", mediante la expresión.

$$y = \sigma / K$$

Donde K es el Módulo de Balasto del terreno

Partiendo de la ecuación de la curvatura en piezas lineales flectadas:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

Como:

$$\frac{dM}{dx} = -V \quad \text{y} \quad \frac{dV}{dx} = q \cdot b - \sigma \cdot b$$

Siendo  $b$  el ancho del cimientto

Operando suponiendo que  $EI$  es cte:

$$\frac{dV}{dx} = -\frac{d^2 M}{dx^2} = q \cdot b - \sigma \cdot b = b(q - K \cdot y)$$

Siendo  $K$  el Módulo de balasto del terreno

Con lo que:

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4}$$
$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + K \cdot b \cdot y - q \cdot b = 0$$

Se trata de una ecuación diferencial lineal homogénea de cuarto orden. La solución real de dicha ecuación es:

$$w(x) = C_1 \cdot \cosh\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{Le}\right) + C_2 \cdot \cosh\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \text{seno}\left(\frac{x}{Le}\right) +$$
$$C_3 \cdot \text{senoh}\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{Le}\right) + C_4 \cdot \text{senoh}\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \text{seno}\left(\frac{x}{Le}\right)$$

Donde:

$Le$ : Es la longitud elástica, definida como:

$$Le = \left(\frac{4 \cdot E \cdot I}{B \cdot K}\right)^{1/4}$$

La integración de la ecuación diferencias, dará como resultado la ecuación de la deformada.  $y=f(x)$ . A partir de ella se obtendrá la ley de presiones sobre el terreno:

$$\sigma = K \cdot f(x)$$

Y a partir de ella, la ley de momentos actuantes:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$$

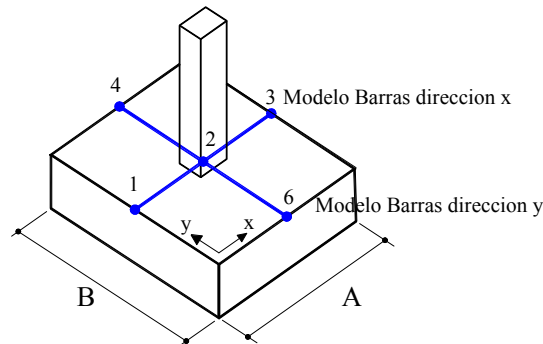
$$M(x) = -E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh \left[ \frac{x}{Le} \right] \cdot \left( D \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] - C \cdot \text{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) + \left( B \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] - A \cdot \text{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) \cdot \text{senoh} \left[ \frac{x}{Le} \right]}{Le^2} \right)$$

Así como la ley de cortantes actuantes:

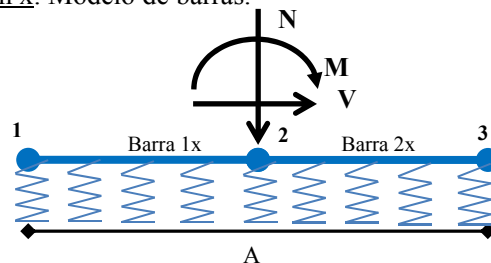
$$Q(x) = E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dx^3}$$

$$Q(x) = E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh \left[ \frac{x}{Le} \right] \cdot \left( (B - C) \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] - (A + D) \cdot \text{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) - \left( (A - D) \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] + (B + C) \cdot \text{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) \cdot \text{senoh} \left[ \frac{x}{Le} \right]}{Le^3} \right)$$

Operativamente se plantean dos modelos, uno para la dirección 'x' y otro para la dirección 'y', compuestos cada uno de ellos por dos vigas apoyadas en el terreno y cuyo punto central de unión será el punto de aplicación de las cargas.



Dirección x: Modelo de barras.





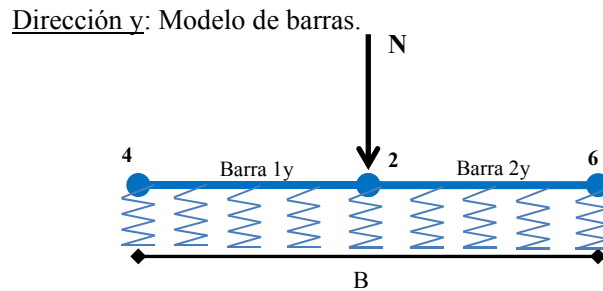


Figura 3.13. Zapata Aislada. Modelo elástico de tensiones. Equilibrio

Las hipótesis de partida serán:

- Todos los materiales presentarán un comportamiento lineal.
- Se estará en el ámbito de pequeños desplazamientos.
- No se consideran efectos locales, como cambios bruscos de sección
- No se considera el efecto de cortante en la flexión.
- Las vigas son de sección constante.
- La presión en cada punto depende del asiento en el mismo, siendo independiente del resto de puntos.
- No existe interacción entre elementos de terreno contiguos, por lo que no se tiene en cuenta el efecto de cortante del terreno. Por ello, se infravalora la resistencia del mismo, obteniéndose asientos superiores a los reales.
- El modelo no permite asientos positivos, es decir despegues de ningún punto en la cimentación.

Para la resolución del modelo se recurrirá al método matricial de estructuras.

Las ecuaciones que expresan el equilibrio global de la estructura podrían representarse matricialmente mediante la expresión:

$$(P) = [K] \cdot (D)$$

Donde:

{P}: Es el vector de fuerzas externas aplicadas en los nudos.

[K]: Es la matriz de rigidez global de la estructura

{D}: Es el vector de desplazamientos en nudos.

Análogamente, el equilibrio de cada una de las vigas en globales, puede expresarse mediante:

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} D_i \\ D_j \end{pmatrix}$$

Donde:

$P_i, P_j$ : Es el vector de fuerzas externas aplicadas en los nudos i o j de la viga flotante.

$[K]$ : Es la matriz de rigidez global de la viga

$D_i, D_j$ : Es el vector de desplazamientos en nudos i o j de la viga flotante.

La definición en el sistema local de la barra la designaremos como:

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} \\ k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d_i \\ d_j \end{pmatrix}$$

En nuestro problema, el vector desplazamientos estará compuesto por:

$$d_k = \begin{pmatrix} w_k \\ \theta_{kx} \\ \theta_{ky} \end{pmatrix}$$

Donde:

$w_k$ : Es el asiento vertical sufrido por el nudo k en el eje "Z".

$\theta_{kx}$ : Es el giro sufrido por el nudo k en el plano "XZ".

$\theta_{ky}$ : Es el giro sufrido por el nudo k en el plano "YZ".

Del mismo modo el vector de fuerzas externas estará asociado en cada nudo a :

$$P_k = \begin{pmatrix} N_k \\ M_{kx} \\ M_{ky} \end{pmatrix}$$

Donde:

$N_k$ : Es la carga vertical aplicada en el nudo k, coincidente con el eje "Z".

$M_{kx}$ : Es el Momento aplicado en el nudo k, sobre el eje XZ.

$M_{ky}$ : Es el Momento aplicado en el nudo k, sobre el eje YZ.

La matriz de rigidez de cada una de las vigas flotantes apoyada en el terreno será:

$$K = \begin{pmatrix} \frac{12 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_1 & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_2 & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_4 & 0 & \frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_5 \\ 0 & \frac{G \cdot J}{Le} & 0 & 0 & -\frac{G \cdot J}{Le} & 0 \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_2 & 0 & \frac{4 \cdot E \cdot I}{Le} \cdot F_3 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_5 & 0 & \frac{2 \cdot E \cdot I}{Le} \cdot F_6 \\ -\frac{12 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_4 & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_5 & \frac{12 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_1 & 0 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_2 \\ 0 & -\frac{G \cdot J}{Le} & 0 & 0 & \frac{G \cdot J}{Le} & 0 \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_5 & 0 & \frac{2 \cdot E \cdot I}{Le} \cdot F_6 & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{Le^3} \cdot F_2 & 0 & \frac{4 \cdot E \cdot I}{Le} \cdot F_3 \end{pmatrix}$$

Donde:

$$F_1 = \frac{\chi^3}{3} \cdot \frac{\operatorname{senoh} \chi \cdot \cosh \chi + \operatorname{seno} \chi \cdot \cos \chi}{\operatorname{senoh}^2 \chi - \operatorname{seno}^2 \chi}$$

$$F_2 = \frac{\chi^2}{3} \cdot \frac{\operatorname{senoh}^2 \chi + \operatorname{seno}^2 \chi}{\operatorname{senoh}^2 \chi - \operatorname{seno}^2 \chi}$$

$$F_3 = \frac{\chi}{2} \cdot \frac{\operatorname{senoh} \chi \cdot \cosh \chi - \operatorname{seno} \chi \cdot \cos \chi}{\operatorname{senoh}^2 \chi - \operatorname{seno}^2 \chi}$$

$$F_4 = \frac{\chi^3}{3} \cdot \frac{\operatorname{senoh} \chi \cdot \cosh \chi + \operatorname{seno} \chi \cdot \cosh \chi}{\operatorname{senoh}^2 \chi - \operatorname{seno}^2 \chi}$$

$$F_5 = 2 \cdot \frac{\chi^2}{3} \cdot \frac{\operatorname{senoh} \chi + \operatorname{seno} \chi}{\operatorname{senoh}^2 \chi - \operatorname{seno}^2 \chi}$$

$$F_6 = \chi \cdot \frac{-\operatorname{senoh} \chi \cdot \cosh \chi + \operatorname{seno} \chi \cdot \cosh \chi}{\operatorname{senoh}^2 \chi - \operatorname{seno}^2 \chi}$$

Con:

$$\chi = \frac{x}{L_e}$$

La matriz de rigidez del sistema global de vigas será:

$$\begin{bmatrix} K_{I,I}^1 & K_{I,II}^1 & 0 \\ K_{II,I}^1 & K_{II,II}^1 + K_{I,I}^2 & K_{I,II}^2 \\ 0 & K_{II,I}^2 & K_{II,II}^2 \end{bmatrix}$$

Con la resolución del sistema de ecuaciones:

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_j \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{ii} & K_{ij} \\ K_{ji} & K_{jj} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} D_i \\ D_j \end{pmatrix}$$

Se obtendrán los valores de los desplazamientos y giros del sistema en coordenadas globales, en cada uno de los extremos de barras, y a partir de estos valores se podrán completar las leyes de deformaciones y esfuerzos a lo largo de la barra.

### 3.6.2.5 Aptitud al Servicio: Estado Límite de Fisuración.

Para la comprobación de este estado límite, se seguirán las indicaciones recogidas en el art 49 de **EHE-08 [1]**.

Este estado límite, tratará de limitar la abertura máxima de las fisuras que se producirán en el hormigón, de forma que esta sea compatible con las exigencias de durabilidad, funcionalidad, estanquidad y apariencia.

Las fisuras tratadas serán las correspondientes a aquellas producidas por acciones directas o deformación impuestas, no incluyendo las fisuras debidas a retracción plástica, asentamiento plástico o las producidas por reacción químicas expansivas en el hormigón endurecido.

La comprobación se realizará despreciando la capacidad resistente del hormigón traccionado y ante la combinación de acciones cuasipermanente.

Las comprobaciones descritas para la Fisuración por solicitaciones normales serán:

- a) Aparición de fisuras por compresión.

En todas las situaciones persistentes y en las situaciones transitorias bajo la combinación más desfavorable de acciones correspondientes a la fase en estudio, las tensiones de compresión en el hormigón deberán cumplir:

$$\sigma_c \leq 0.60 \cdot f_{ck,j}$$

Donde:

- $\sigma_c$ : Tensión de compresión del hormigón en la situación de comprobación.

- $f_{ckj}$ : Valor supuesto en el proyecto para la resistencia característica a j-días (edad del hormigón en la fase considerada). Para estructuras ‘in situ’ en las que la condición más desfavorable se produce para la combinación poco frecuente, deben tenerse en cuenta las condiciones de construcción de la estructura para poder considerar la resistencia real del hormigón en el momento de la comprobación. Para estructuras de edificación, simplificada-mente, puede considerarse que esta condición se produce cuando el hormigón tiene 120 días de edad.
- b) Estado límite de descompresión.

Consistirá, en la comprobación de que bajo la combinación de acciones co-rrespondiente a la fase en estudio, no se alcanza la descompresión del hormi-gón en ninguna fibra de la sección.

- c) Fisuración por tracción.

La comprobación a satisfacer será:

$$w_k \leq w_{\max}$$

Donde:

- $w_k$ : Es la abertura característica de fisura a determinar.
- $w_{\max}$ : Es la abertura máxima de fisura permitida definida en la siguiente tabla:

**Tabla 3.22. Abertura máxima de fisura. EHE [1].**

Clase de Exposición	$w_{\max}$ (mm)	
	Hormigón Armado (combinación cuasipermanente de acciones)	Hormigón pretensado (combinación frecuente de acciones)
I	0,4	0,2
IIa, IIb, H	0,3	0,2 (1)
IIIa, IIIb, IV, F, Qa (2)	0,2	Descompresión
IIIc, Qb (2), Qc (2)	0,1	Descompresión

(1) Adicionalmente deberá comprobarse que las armaduras activas se encuentran en la zona comprimida de la sección, bajo la combinación cuasipermanente de acciones.

(2) La limitación relativa a la clase Q, solo será de aplicación en el caso de que el ataque químico pueda afectar a la armadura. En otros casos se aplicará la limitación correspondiente a la clase general correspondiente.

Tal y como se estableció en apartados anteriores, se supondrá en todos los casos la existencia de un ambiente de exposición IIa, por lo que para el presente estudio, la abertura máxima de fisura adoptará el valor de:

$$w_k = 0.3$$

La abertura característica de fisura vendrá determinada por:

$$w_k = \beta \cdot S_m \cdot \varepsilon_{sm}$$

Donde:

$\beta$ : Coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico y vale 1,3 para fisuración producida por acciones indirectas solamente y 1,7 para el resto de casos.

$S_m$ : Separación media de fisuras, expresadas en mm.

$$s_m = 2 \cdot c + 0,2 \cdot s + 0,4 \cdot k_1 \cdot \frac{\phi \cdot A_{c.eficaz}}{A_s}$$

$\varepsilon_{sm}$ : Alargamiento medio de las armaduras, teniendo en cuenta la colaboración del hormigón entre fisuras:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[ 1 - k_2 \cdot \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0,4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$c$ : Recubrimiento de las armaduras traccionadas.

$s$ : Distancia entre barras longitudinales. Si  $s > 15\phi$  se tomará  $s = 15\phi$ . En caso de vigas armadas con  $n$  barras, se tomará  $s = b/n$  siendo  $b$  el ancho de la viga.

$k_1$ : Coeficiente que representa la influencia del diagrama de tracciones en la sección, de valor.

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{8 \cdot \varepsilon_1}$$

Donde  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  son las deformaciones máxima y mínima calculadas en sección fisurada, en los límites de la zona traccionada.

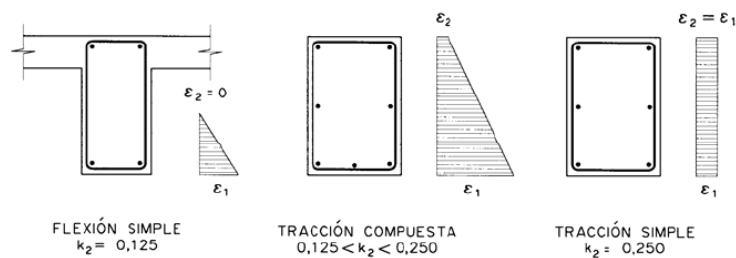


Figura 3.14. E.L.S. de Fisuración. Parámetro  $\varepsilon$ . EHE [1].

$\phi$ : Diámetro de la barra traccionada más gruesa o diámetro equivalente en el caso de grupos de barras.

$A_{x,eficaz}$ : Área de hormigón de la zona de recubrimiento. Para el caso de piezas hormigonadas contra el terreno, podrá adoptarse para el cálculo del ancho de fisura, el recubrimiento nominal correspondiente a la clase de exposición.

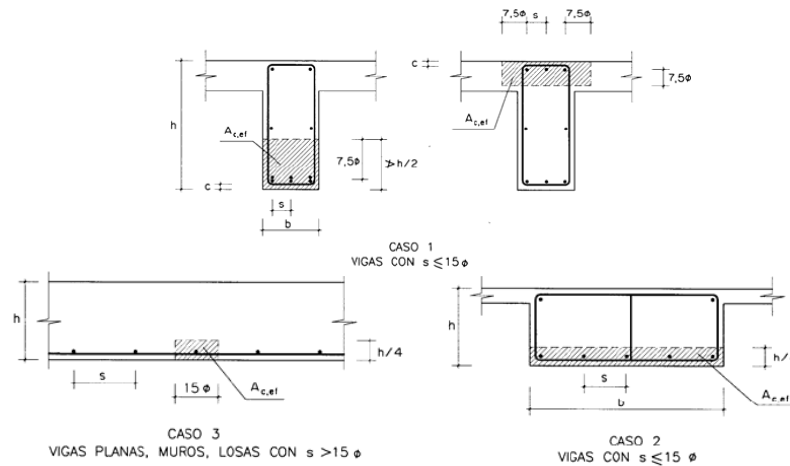


Figura 3.15. E.L.S. de Fisuración. Parámetro  $A_{x,eficaz}$ , EHE [1].

Donde:

$A_s$ : Sección total de las armaduras situadas en el área  $A_{s,eficaz}$ .

$\sigma_s$ : Tensión de servicio de la armadura pasiva en la hipótesis de sección fisurada.

$E_s$ : Módulo de deformación longitudinal del acero.

$K_2$ : Coeficiente de valor 1,0 para los casos de carga instantánea no repetida y 0,5 para los restantes.

$\sigma_{sr}$ : Tensión de la armadura en la sección fisurada en el instante en que se fisura el hormigón, lo cual se supone que ocurre cuando la tensión de tracción en la fibra más traccionada de hormigón alcanza el valor  $f_{ctm,fl}$ .

$$f_{ct,m,fl} = \max \left[ \left( 1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ct,m}; f_{ct,m} \right]$$

Con:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \longrightarrow f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ct,m} = 0,58 \cdot f_{ck}^{1/2} \longrightarrow f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$$

### 3.6.2.6 Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al Vuelco.

Se podrá producir este modo de rotura cuando sobre el cimiento actúen esfuerzos horizontales o momentos importantes, produciéndose un giro de la cimentación. Siguiendo las indicaciones recogidas en CTE [2], el equilibrio de la cimentación al vuelco quedará verificado si se cumple:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$$

$E_{d,dst}$ : es el valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras.

$E_{d,stab}$ : es el valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

De donde, según 2.4.2.5 de DB SE-C de CTE [2].

$$\gamma_E \cdot E_{dst} \cdot \gamma_F \leq \gamma_E \cdot E_{stab} \cdot \gamma_F$$

Adoptando los coeficientes de seguridad parciales recogidos en CTE [2] tabla 2.1:

$$1.8 \cdot E_{dst} \leq 0.9 \cdot E_{stab}, \text{ es decir, } \frac{E_{stab}}{E_{dst}} \geq 2.0$$

La evaluación de las distintas acciones estabilizantes y desestabilizantes, dará como resultado:

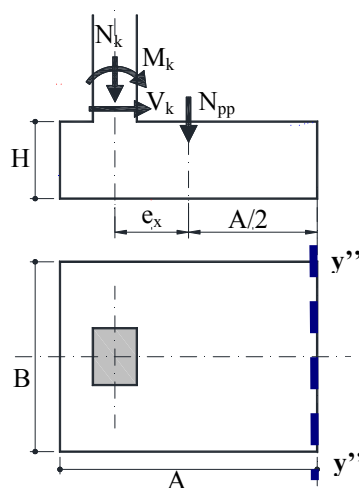


Figura 3.16. E.L.U. de Estabilidad al vuelco.



Los momentos estabilizantes serán los producidos por el esfuerzo axial y el peso propio de la zapata.

$$E_{stb} = N_k \cdot \left( e_x + \frac{A}{2} \right) + N_{pp} \cdot \frac{A}{2} =$$
$$N_k \cdot \left( e_x + \frac{A}{2} \right) + \left( A^2 \cdot K \cdot N_{pp} \cdot H_{zapata} \right) \cdot \frac{A}{2}$$

Los momentos desestabilizantes serán:

$$E_{dst} = M_k + V_k \cdot H_{zapata}$$

y la condición final a verificar será.:

$$\frac{N_d \cdot \left( e_x + \frac{A}{2} \right) + \left( A^2 \cdot K \cdot N_{pp} \cdot H_{zapata} \right) \cdot \frac{A}{2}}{M_d + V_d \cdot H_{zapata}} \geq \gamma = 2.0$$

### 3.6.2.7 Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al Deslizamiento.

Este modo de rotura se producirá en aquellos cimientos sometidos a esfuerzos horizontales, cuando las tensiones de corte en el contacto de la cimentación con el terreno, superen la resistencia de ese contacto

Criterio Código Técnico en la Edificación, CTE [2]:

$$E_d \geq R_d$$

Donde:

$E_d$ : es el valor de cálculo del efecto de las acciones.

$R_d$ : el valor de cálculo de la resistencia del terreno.

Así pues:

$$E_d = \gamma_E \cdot \gamma_F \cdot F_{repr}$$

Donde:

$F_{repr}$ , es el valor representativo de las acciones que intervienen en la situación de dimensionado considerada.

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot \frac{X_K}{\gamma_M} ;$$

Donde  $X_k$  es el valor característico de resistencia del terreno

Por lo que:

$$E_d \geq R_d \longrightarrow \gamma_E \cdot \gamma_F \cdot F_{repr} \geq \frac{1}{\gamma_R} \cdot \frac{X_K}{\gamma_M}$$

Así pues, adoptando los valores recogidos en este caso para los coeficientes de seguridad parcial (Tabla 2.1 CTE SE-C [2]), obtenemos:

$$F_{repr} \geq \frac{1}{1.5} \cdot X_K$$

Donde:

$F_{repr}$ , es el valor de esfuerzo cortante actuante en el cimiento,  $V_{kx}$ , mientras que  $X_k$  es el esfuerzo de rozamiento generado por el axil vertical en la sección.

Así, pues sustituyendo valores, se obtiene finalmente la condición a verificar de la restricción:

$$V_T \geq \frac{1}{1.5} \cdot N_T \operatorname{tg} \phi_d \rightarrow \frac{N_T \operatorname{tg} \phi_d}{V_T} \geq 1.5$$

### 3.6.2.8 Seguridad Estructural: E.L.U. Agotamiento solicitaciones normales. Flexión.

El proceso de análisis de este Estado Limite Ultimo, seguirá lo descrito en la actual instrucción de Hormigón Estructural **EHE-08 [1]**.

La instrucción **EHE-08 [1]**, establece una distinción entre zapatas rígidas, aquellas cuyo vuelo en la dirección principal, de mayor vuelo, es inferior a 2 veces el canto y zapatas flexibles, cuyo vuelo es mayor a 2 veces el canto.

Para las cimentaciones rígidas, la distribución de deformaciones es no lineal a nivel de sección, por lo que se propone como método de análisis el de bielas y tirantes, mientras que para las zapatas flexibles, esta distribución puede considerarse lineal y es de aplicación la teoría general de flexión.

Para unificar los métodos de cálculo, y dado que en los comentarios del artículo 58.4.1.1 de la misma instrucción EHE[1], permiten adoptar como modelo de cálculo

para las zapatas rígidas la teoría general de flexión, se adoptará finalmente este, como método a aplicar en ambos casos.

Cálculo de Esfuerzos en secciones de referencia:

La armadura inferior necesaria en ambas direcciones, se calculará para resistir el esfuerzo de flexión existente en la sección de referencia  $S_1$ , definida como la sección paralela a la cara del soporte y situada detrás de dicha cara a una distancia igual a  $0,15a$ , siendo 'a' la dimensión del soporte. El momento actuante en la sección de referencia se calculará en función del modelo de cálculo adoptado.

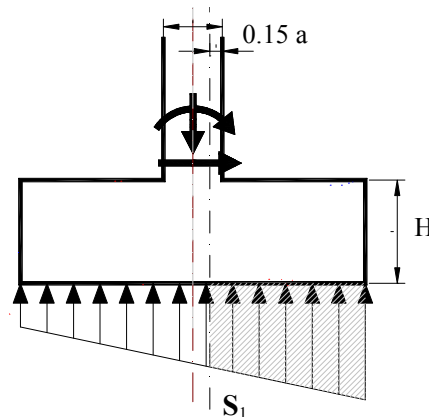


Figura 3.17. E.LU. de Flexión. Sección de referencia para cálculo esfuerzos de flexión.

Una vez determinado el esfuerzo de flexión en la sección de referencia  $M_{S1}$ , se procederá del siguiente modo para la determinación del armado de la sección.

Inicialmente se estimará de forma aleatoria el diámetro de armado correspondiente, de acuerdo a los rangos impuestos y descritos en 3.6.2.1. Se determinará el número mínimo de redondos de armado del diámetro escogido, que son capaces de soportar el momento actuante en la sección de referencia  $S_1$ , descrito anteriormente,  $n_{\min, mec}$ .

$$\mu = \frac{M_{S1}}{B \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \leq 0.252$$

$$\omega = \mu \cdot (1 + \mu) \geq 0.04$$

$$A_{s, mec} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$n_{\min, mec} = \frac{A_{s, mec}}{\pi \cdot 0.25 \cdot \phi^2}$$

Se determinará el número máximo y mínimo de redondos de armado que cumplen con las restricciones de cuantías geométricas y distancias entre barras, recogidas en 3.6.2.1.  $n_{\min,sep}$ ,  $n_{\max,sep}$  y  $n_{\min,geo}$ .

Finalmente se determinará de forma aleatoria, el número de redondos entre los valores de  $[n_{\min}, n_{\max}]$ , determinados anteriormente.

Este criterio se mantendrá para la elección de todas las armaduras existentes en los distintos modelos de cimentación propuestos, salvo los correspondientes a armaduras de piel, o aquellas que no tengan función resistente, y pretende poder evaluar cuando se apliquen los métodos heurísticos de búsqueda de objetivos, la interacción Momento - Cortante. Esta armadura se dispondrá a lo largo de toda la longitud de la zapata, anclándose según los criterios establecidos en el artículo 69 de la instrucción y descritos en el apartado 3.5.2.9. El proceso se repetirá a cada lado del soporte, dimensionando el armado para la situación más desfavorable. Del mismo modo, el proceso se repetirá en ambas direcciones para determinar los armados en dirección x e y.

### 3.6.2.9 Seguridad Estructural: E.L.U. Agotamiento frente a Cortante.

Las verificaciones a realizar para el E.L.U. de cortante se recogen en el artículo 44.2. de la instrucción de hormigón **EHE-08 [1]**.

En ella, se establece como sección de referencia para las comprobaciones la sección S2, sección situada a una distancia igual al canto útil contado a partir de la cara del soporte.

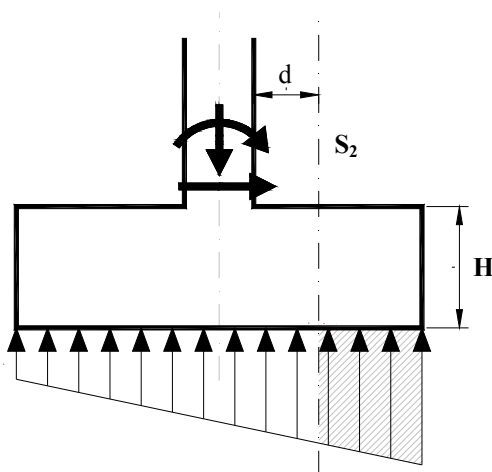


Figura 3.18. E.L.U. de Cortante. Sección de referencia.

Se analizarán las secciones de referencia a ambas caras del soporte, y en ambas direcciones, comprobándose las limitaciones en ambos casos.

El valor del canto útil vendrá dado por:

$$\text{Dirección x : } d_x = H - r_{\text{recubrimiento inferior}} - \frac{\phi_x}{2}$$

$$\text{Dirección y : } d_y = H - r_{\text{recubrimiento inferior}} - \phi_x - \frac{\phi_y}{2}$$

Según lo indicado en la instrucción EHE [1] art 44.2.3 las verificaciones a realizar serán:

- A. Agotamiento por compresión oblicua en el alma,  $V_{rd} \leq V_{u1}$
- B. Agotamiento por tracción en el alma,  $V_{rd} \leq V_{u2}$

- A. Agotamiento por compresión oblicua del alma. Se deberá verificar la siguiente restricción:

$$V_d \leq V_{u1}$$

Donde:

$$V_{u1} = k \cdot f_{1cd} \cdot B_0 \cdot d \cdot \frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta}$$

$k$ , coeficiente de reducción por esfuerzo axial, que en el caso en estudio presenta un valor igual a 1, al no existir pretensados o esfuerzos de compresión.

$f_{1cd}$ , resistencia a la compresión del hormigón.

$$f_{1cd} = 0.6 f_{cd}$$

$B_0$ , anchura mínima neta del elemento

$\theta$ , Angulo de las bielas de compresión con el eje de la pieza.

$\alpha$  : Angulo de las armaduras con el eje de la pieza (en cercos verticales  $\cot g\alpha = 0$ ).

$$\frac{\cot g\theta + \cot g\alpha}{1 + \cot g^2\theta} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$$

Para los casos en estudio, se adoptará un ángulo  $\alpha = 90^\circ$  y como ángulo de las bielas de compresión  $\theta = 45^\circ$ . La expresión del esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma quedará de la forma:

$$V_{u1} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot b_0 \cdot d$$

B. Agotamiento por tracciones en el alma.

$$V_d \leq V_{u2}$$

Se distinguirán dos casos

(I).-Para piezas sin armadura de cortante en regiones no fisuradas: ( $M_d \leq M_{fis,d}$ )

$$V_{u2} = \frac{I \cdot B_0}{S} \cdot \sqrt{(f_{ct,d})^2 + \alpha_1 \cdot \alpha_{cd}' \cdot f_{ct,d}}$$

Eliminando el término relativo a armaduras pretensadas, sin aplicación en este estudio.

$$V_{u2} = \frac{I \cdot B_0}{S} \cdot f_{ct,d}$$

Donde:

I: Momento de inercia de la sección transversal. Para zapatas rectangulares:  $I = B_0 \cdot H^3 / 12$ .

S: Momento estático de la sección transversal. Para zapatas rectangulares:  $S = 0,5 \cdot B_0 \cdot H^2$ .

$B_0$ : Ancho del alma

$f_{ct,t}$ : Resistencia de cálculo a tracción del hormigón

$M_{fis}$ : Momento de fisuración de la sección, calculado con  $f_{ct,d} = f_{ct,k} / \gamma_c$

Según art 39.4 EHE-08 [1], se considerará como resistencia de cálculo a tracción del hormigón el valor:

$$f_{ct,d} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ct,k}}{\gamma_c}$$

Donde:

$\alpha_{vt}$ : Factor que tiene en cuenta el cansancio del hormigón cuando está sometido a altos niveles de tensión de tracción debido a cargas de larga duración. A falta de justificación experimental específica, en EHE 08 [1], se adopta un valor de 1.

$f_{ct,k}$ : Resistencia características a tracción.

$\gamma_c$ : Coeficiente parcial de seguridad que adopta los valores indicados en el artículo 15 EHE-08 [1].

**Tabla 3.23. Coeficientes de seguridad materiales.**

Situación de proyecto	Hormigón $\gamma_c$	Acero $\gamma_s$
Persistente o transitoria	1,5	1,15
Accidental	1,3	1,00

Por lo que:

$$f_{ct,d} = 1 \cdot \frac{f_{ct,k}}{1.5}$$

Donde

$$f_{ct,k} = 0.7 \cdot f_{ct,m}$$

Y:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \xrightarrow{\text{para}} f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{ct,m} = 0,58 \cdot f_{ck}^{1/2} \xrightarrow{\text{para}} f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$$

Por lo que:

$$f_{ct,d} = 0.14 \cdot f_{ck}^{2/3}$$

Y sustituyendo finalmente:

$$V_{u2} = \frac{I \cdot B_0}{S} \cdot f_{ct,d} = 0.0233 \cdot B_0 \cdot H \cdot f_{ck}^{2/3}$$

Para el cálculo de  $M_{fis}$ .

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,k}}{\gamma_c} \cdot W$$

Siendo W el Módulo resistente de la sección de valor.

$$W = \frac{I}{H/2} = \frac{1}{6} \cdot B_0 \cdot H^2$$

Por lo que:

$$M_{fis} = 0.02333 \cdot f_{ck}^{2/3} \cdot B_0 \cdot H^2$$

(II).-Para piezas sin armadura de cortante en regiones fisuradas: ( $M_d > M_{fis,d}$ )

$$V_{cu} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot \left(100 \cdot \rho \cdot f_{cv} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd}\right)^{1/3} \cdot B_0 \cdot d$$
$$\geq \left[ \frac{0.075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{cv}^{1/2} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd} \right] \cdot B_0 \cdot d$$

Donde:

d: Canto útil

$f_{cv}$ : Resistencia efectiva del hormigón a cortante en  $N/mm^2$  de valor  $f_{ck}$ , con  $f_{cv}$  no mayor que  $15 N/mm^2$  en el caso de control indirecto de la resistencia del hormigón, siendo  $f_{ck}$  la resistencia a compresión del hormigón, que a efectos de este apartado no se considerará superior a  $60 N/mm^2$ .

$\rho$ : Cuantía geométrica de armadura longitudinal principal de tracción anclada a una distancia igual o mayor que el canto útil, 'd'.

$$\rho = \frac{A_s}{B_0 \cdot d} \leq 0.02$$

$\xi$ : Donde,

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ con } d \text{ en mm}$$

Para el presente estudio, el modelo de armado previsto para las zapatas aisladas no prevé la disposición de armado de cortante, por lo que la verificación a ELU de Cortante se realizará para los casos descritos de piezas sin armadura de cortante. Caso de no cumplirse las verificaciones impuestas se establecerá la configuración analizada como no válida.

### 3.6.2.10 Seguridad Estructural: Estado Límite Último de Punzonamiento.

La comprobación a ELU de Punzonamiento se realizará siguiendo las indicaciones del artículo 46 de la instrucción EHE-08 [1].

La superficie o área crítica de verificación, se dispondrá a una distancia de "2d" desde el perímetro del soporte, siendo 'd' el canto útil de la sección. La determinación del perímetro crítico se realizará según las siguientes figuras.



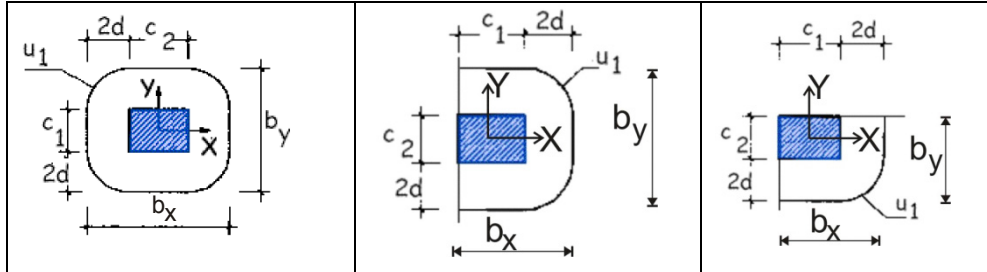


Figura 3.19. E.L.U. de Punzonamiento. Perímetro crítico,  $u_1$ . EHE [1].

La condición para comprobar la necesidad o no de armadura de punzonamiento será:

$$\tau_{sd} \leq \tau_{rd}$$

Donde:

- $\tau_{sd}$ : Tensión tangencial de cálculo en el perímetro crítico.

$$\tau_{sd} = \frac{F_{sd,ef}}{u_1 \cdot d}$$

- $F_{sd,ef}$ : Esfuerzo efectivo de punzonamiento de cálculo, teniendo en cuenta el efecto del momento transferido entre losa y soporte.

$$F_{sd,ef} = \beta \cdot F_{sd}$$

- $\beta$ : Coeficiente que tiene en cuenta los efectos de excentricidad de la carga. Cuando no existen momentos transferidos su valor es 1,00. Simplificadamente cuando existan momentos transferidos puede tomarse: 1.15 en soportes interiores, 1.40 en soportes de borde y 1.5 en soportes de esquina.
- $F_{sd}$ : Esfuerzo de punzonamiento de cálculo.
- $u_1$ : Perímetro crítico definido en figura 3.19.
- $d$ : Canto útil
- $\tau_{rd}$ : Tensión máxima resistente en el perímetro crítico, con  $f_{ck}$  en  $N/mm^2$ .

$$\tau_{rd} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_i \cdot f_{cv})^{1/3} \text{ no inferior a } = \frac{0.075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{cv}^{1/2}$$

- $\rho_i$ : Cuantía geométrica de armadura longitudinal de la losa a tracción, calculada como:

$$\rho_i = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$$

Siendo  $\rho_x$  y  $\rho_y$  las cuantías traccionadas en las dos direcciones perpendiculares. En cada dirección, la cuantía a considerar es la existente en un ancho igual la dimensión del soporte más  $3d$  a cada lado del soporte o hasta el borde de la losa, si se trata de un soporte de borde o esquina.

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, \text{ con } d \text{ en mm}$$

Adicionalmente, se deberá comprobar que el esfuerzo máximo de punzonamiento cumple:

$$\frac{F_{sd,ef}}{u_o \cdot d} \leq 0.5 \cdot f_{1cd}$$

Donde:

$f_{1cd}$ , es la resistencia a compresión del hormigón.

$$f_{1cd} = 0.60 \cdot f_{cd} \longrightarrow \text{para } f_{ck} \leq 60 \cdot N / mm^2$$

$$f_{1cd} = (0.90 - f_{ck} / 200) \cdot f_{cd} \longrightarrow \text{para } f_{ck} > 60 \cdot N / mm^2$$

$u_o$ , es el perímetro de comprobación (figura 3.20). En soportes interiores,  $u_o$  es el perímetro de la sección transversal del soporte. Para soportes de borde:

$$u_o = c_1 + 3 \cdot d \leq c_1 + 2 \cdot c_2$$

Donde  $c_1$  y  $c_2$  son las dimensiones del soporte. Para soportes de esquina:

$$u_o = 3 \cdot d \leq c_1 + c_2$$

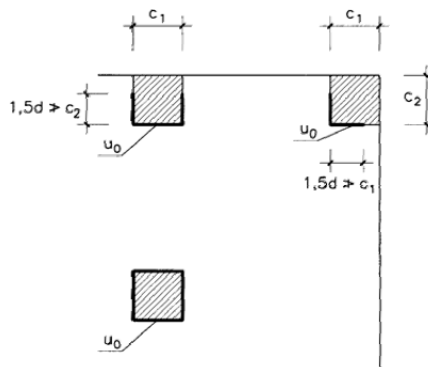


Figura 3.20. E.L.U. de Punzonamiento. Perímetro crítico  $u_o$ . EHE [1].

Para el presente estudio, el modelo de armado previsto para las zapatas aisladas no prevé la disposición de armado de refuerzo a punzonamiento, por lo que la verificación a ELU de punzonamiento se realizará para los casos descritos de piezas sin armadura de Punzonamiento. Caso de no cumplirse las verificaciones impuestas, se establecerá la configuración analizada como no válida.

### 3.6.2.11 Seguridad Estructural: Estado Límite Último de Anclaje.

Las condiciones generales para el anclaje y empalme de armaduras se describen en el artículo 69.5 de La norma **EHE-08** [1].

Se diferenciará entre dos posiciones de la armadura, atendiendo a la posición que ocupe la barra en la pieza, Así, se define:

- **Posición I**, de buena adherencia, para las armaduras que durante el hormigonado forman un ángulo entre 45 y 90° con la horizontal o en el caso de formar ángulos inferiores a 45°, están situadas en la mitad inferior de la sección.
- **Posición II**, de adherencia deficiente, para las armaduras que durante el hormigonado no se encuentran en los casos anteriores.

Las longitudes básicas de anclaje para las dos posiciones son:

$$\text{Posición I: } l_{bl} = m \cdot \phi^2 \geq \frac{f_{yk}}{20} \cdot \phi$$

$$\text{Posición II: } l_{bII} = 1.4 \cdot m \cdot \phi^2 \geq \frac{f_{yk}}{14} \cdot \phi$$

El valor del coeficiente “m” depende del tipo de acero y hormigón utilizado y se describe en la siguiente tabla:

**Tabla 3.24. Anclaje. Parámetro “m”. EHE [1].**

Resistencia característica del hormigón (N/mm <sup>2</sup> )	m	
	B-400S	B-500S
25	1,2	1,5
30	1,0	1,3
35	0,9	1,2
40	0,8	1,1
45	0,7	1,0
50	0,7	1,0

Finalmente la longitud neta de anclaje se define como:

$$l_{b,neto} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s,real}}$$

Donde  $\beta$  es el factor de reducción definido en la siguiente tabla.

Tabla 3.25. Anclaje. Parámetro “β”. EHE [1].

Tipo de anclaje	Tracción	Compresión
Prolongación recta	-1	1
Patilla, gancho y gancho en U	0.7 (*)	1
Barra transversal soldada	0.7	0.7

(\*) Si el recubrimiento de hormigón perpendicular al plano de doblado es superior a 3 diámetros. En caso contrario el valor sería 1.

En el artículo 69.5.1.1 de la **EHE-08 [1]** se establece que el valor de la longitud neta de anclaje, no adoptará valores inferiores al mayor de los valores siguientes.

- $10 \phi$
- 15 cm
- la tercera parte de la longitud básica de anclaje en barras traccionadas y los dos tercios para barras comprimidas.

Las condiciones específicas para anclaje de armaduras de cimentación se recogen en el artículo 58.4.2.1. de la instrucción **EHE-08 [1]**.

Así, se establece que la armadura deberá estar anclada según el más desfavorable de los criterios siguientes:

Criterio 1:

La armadura estará anclada desde una sección  $S_2$  situada a un canto útil de la sección de referencia  $S_1$ .

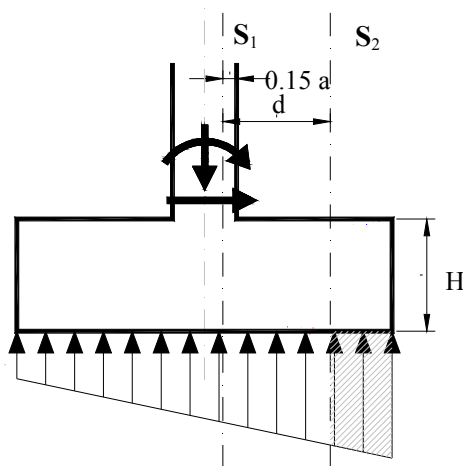


Figura 3.21. E.L.U. de Anclaje. Sección de cálculo  $S_2$ .

Esto conduce a tres posibles situaciones:

- $l_{b,n} + r < v - d + 0.15 a_p \Rightarrow$  Disponer en Prolongación Recta

- $0.7 l_{b,n} + r < v - d + 0.15 a_p < l_{b,n} + r \Rightarrow$  Disponer Patilla normalizada
- $0.7 l_{b,n} > v - d + 0.15 a_p \Rightarrow$  Disponer patilla con prolongación vertical.

Donde:

r: Es el recubrimiento lateral dispuesto.

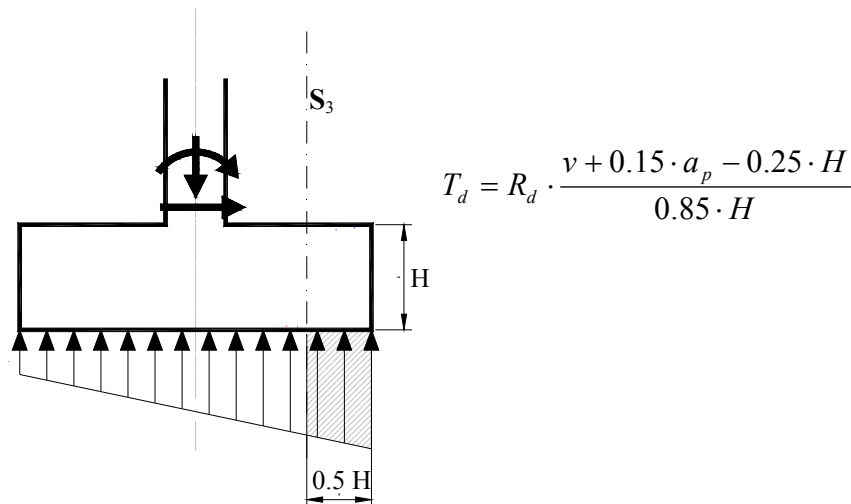
v: Es el vuelo de la zapata en la dirección considerada, definido como la distancia desde cara de soporte a extremo del cimiento.

En el último caso la distancia a prolongar verticalmente será:

$$L = 0.7 l_{b,n} - v - d + 0.15 a_p, \text{ que será mayor a } 2 \phi.$$

**Criterio 2:**

La armadura se anclará a partir de la sección  $S_3$  definida en la figura 3.22, para una fuerza,  $T_d$ :



**Figura 3.22. E.LU. de Anclaje. Sección de cálculo  $S_3$ .**

Estableciendo el equilibrio entre el momento producido por la resultante del bloque de presiones de ancho  $0.5H$  y el momento originado por la tracción de las armaduras se obtiene:

$$T_d \cdot (0.85 \cdot d) = R_d \cdot (v + 0.15 \cdot a_p - 0.25 \cdot H)$$

de Donde se obtiene la tracción que necesita poder absorber la armadura:

$$T_d = \frac{R_d \cdot (v + 0.15 \cdot a_p - 0.25 \cdot H)}{(0.85 \cdot d)}$$

El área de acero necesaria será por tanto:

$$A_{acero} = \frac{T_d}{f_{yd}}$$

y la longitud neta de anclaje será:

$$L_n = L_b \cdot \frac{A_{acero}}{A_{real}}$$

Esto conduce a tres posibles situaciones:

- $l_{b,n} + r < 0.5 h \Rightarrow$  Disponer Prolongación Recta
- $0.7 l_{b,n} + r < 0.5 h < l_n + r \Rightarrow$  Disponer Patilla normalizada
- $0.7 l_{b,n} > 0.5 H \Rightarrow$  Disponer Patilla con Prolongación vertical.

En el último caso la distancia a prolongar verticalmente será:

$$l = 0.7 l_{b,n} - 0.5 H, \text{ que será mayor a } 2 \phi.$$

### 3.6.3 Zapata Excéntrica con Viga Centradora de Ancho Constante (Modelo 2).

Tal y como se describió en el punto 3.1, este modelo es uno de los más ampliamente utilizados para la solución de situaciones en medianería. El modelo se compone de dos zapatas aisladas unidas mediante una viga, ‘centradora’, cuya función es la de centrar la carga sobre la zapata de medianera, de forma que se pueda transmitir una tensión uniforme en el terreno. Para verificar esta condición se debe considerar un comportamiento rígido del cimiento en la dirección perpendicular a la medianera.

Al igual que en el caso de las zapatas aisladas, se propondrán dos posibles modelos de cálculo.

- El primer modelo, al que denominaremos ‘Modelo de cimiento Rígido’, es el habitualmente utilizado en la práctica. El modelo de cálculo propuesto consiste en disponer un elemento de unión entre las zapatas, que se encargará de transmitir el momento de la zapata de medianería. Se impondrá la condición de tensión uniforme bajo cada cimiento aislado y se procederá al análisis del sistema como una viga apoyada en los soportes.
- El segundo modelo, al que denominaremos ‘Modelo elástico simplificado’, propondrá un comportamiento del suelo elástico. Se supondrá una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes, considerando que el terreno no situado bajo el cimiento no experimenta deformaciones. El modelo se basará en la hipótesis de la existencia de una relación

lineal entre la presión transmitida en un punto del cimiento al suelo y el asiento en este mismo punto, de la forma;

$$y = \sigma / K$$

En la siguiente figura se muestra el modelo geométrico planteado para este tipo de solución, así como las variables geométricas que lo definen.

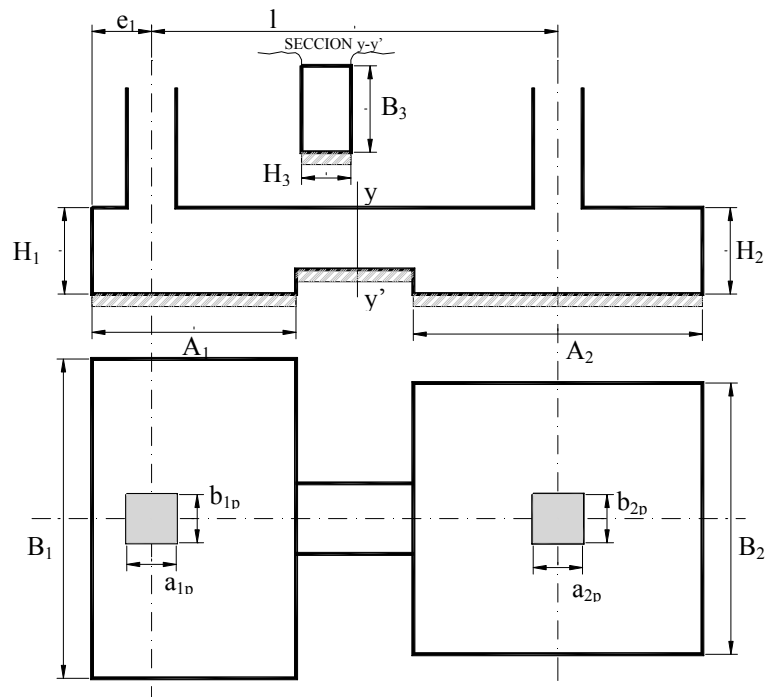


Figura 3.23. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Modelo Geométrico.

Para el diseño de esta solución se seguirá el procedimiento descrito en Calavera [3], verificando el cumplimiento de las instrucciones, EHE-08 [1] y CTE [2].

### 3.6.3.1 Dominio de las variables de diseño.

Se describen a continuación las variables que definen el modelo de cimiento de zapata excéntrica con viga riostra, incluyendo la descripción de las variables geométricas, de materiales y de armado.

VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES GEOMÉTRICAS:

Se muestran en la siguiente tabla las variables que conforman la geometría de la solución, así como su campo y condiciones de existencia, para el modelo de cimiento de zapata excéntrica con viga riostra.

**Tabla 3.26. Modelo 2. Variables Geométricas.**

<b>MODELO 2: ZAPATA EXCÉNTRICA CON VIGA RIOSTRA</b>				
	<b>Designación</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Incremento (mm)</b>
<b>Zapatas</b>				
Zapata 1: Dimensión en dirección x	A <sub>1</sub>	5.000	1.000	±100
Zapata 1: Dimensión en dirección y	B <sub>1</sub>	5.000	1.000	±100
Zapata 1: Canto de la zapata	H <sub>1</sub>	2.000	250 (art 58.8 EHE[1])	±50
Zapata 2: Dimensión en dirección x	A <sub>2</sub>	5.000	1.000	±100
Zapata 2: Dimensión en dirección y	B <sub>2</sub>	5.000	1.000	±100
Zapata 2: Canto de la zapata	H <sub>2</sub>	2.000	250 (art 58.8 EHE[1])	±50
<b>Viga Riostra</b>				
Viga Riostra: Dimensión en dirección y	B <sub>3</sub>	5.000	400	±100
Viga Riostra: Canto de la zapata	H <sub>3</sub>	2.000	0	±50
<b>Condiciones Generales de Geometría</b>				
Condición dimensión de la zapata 1 abarque al menos el soporte 1			A1 > e1 + 0.5 a1p	
Condición no solapamiento entre zapatas, distancia mínima de 1.0 m			L + e1 - A1 - 0.5 A2 > 1.000	

VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES RELATIVAS A LOS MATERIALES:

Las variables relativas a los materiales empleados, serán las mismas ya descritas para el modelo de zapata aislada. En todo caso, se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 3.27. Modelo 2. Variables de los materiales. EHE[1].**

<b>VARIABLES DE MATERIALES</b>		
	<b>Designación</b>	<b>Rango de Valores</b>
Hormigones	f <sub>ck</sub>	f <sub>ck</sub> = 25 / 30 / 35 (N/mm <sup>2</sup> )
Aceros	f <sub>yk</sub>	f <sub>yk</sub> = 400 / 500 (N/mm <sup>2</sup> )

VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES DE ARMADO:

En relación a las variables de armado de primer orden, definidas en 3.3.1, se incluye en la siguiente tabla sus valores discretos posibles, incluyendo los diámetros de armadura que habitualmente son usados en la práctica. Como valor mínimo de la variable ‘diámetro de armadura’, se adoptará el valor de 12 mm para los armados longitudinales, establecido como recomendación en los comentarios del artículo 58.8.2 de EHE-08 [1].



Tabla 3.28. Modelo 2. Variables de Armado.

MODELO 2: ZAPATA EXCÉNTRICA CON VIGA RIOSTRA		
	Designación	Valores (mm)
<b>Zapata 1</b>		
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	D <sub>1xinf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	D <sub>1yinf</sub>	12,16,20,25
<b>Zapata 2</b>		
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	D <sub>2xinf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	D <sub>2yinf</sub>	12,16,20,25
<b>Viga Riostra</b>		
Diámetro Armado superior longitudinal de la viga riostra	D <sub>3sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior longitudinal de la viga riostra.	D <sub>3inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado piel longitudinal de la viga riostra.	D <sub>3piel</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado de Cercos de cortante	D <sub>3,cereo</sub>	6,8,10,12

Variables de Segundo Orden: Variables de Armado:

Se incluye en la siguiente tabla sus valores máximos y mínimos, así como sus posibles incrementos.

Tabla 3.29. Modelo 2. Variables de Armado (II).

MODELO 2: ZAPATA EXCÉNTRICA CON VIGA RIOSTRA				
	Designación	Máximo	Mínimo	Incremento
<b>Zapata 1</b>				
Nº redondos Armado superior dirección 'x' zapata 1	n <sub>1,ssup</sub>	(*)	2 (**)	±1
Nº redondos Armado inferior dirección 'y' zapata 1	n <sub>1,yinf</sub>	(*)	2 (**)	±1
<b>Zapata 2</b>				
Nº redondos Armado superior dirección 'x' zapata 2	n <sub>2,ssup</sub>	(*)	2 (**)	±1
Nº redondos Armado inferior dirección 'y' zapata 2	n <sub>2,yinf</sub>	(*)	2 (**)	±1
<b>Viga Riostra</b>				
Nº redondos del Armado superior en Viga Riostra	n <sub>3,sup</sub>	(*)	2 (**)	±1
Nº cercos en Viga Riostra	n <sub>3,cereo</sub>	(*)	2 (**)	±1
Nº ramas por cerco en Viga Riostra	n <sub>3,ramascereo</sub>	8	2 (**)	±1
Nº redondos Armado de piel viga riostra.	n <sub>3piel</sub>	(*)	2 (**)	±1
Nº redondos Armado inferior viga riostra.	n <sub>3inf</sub>	(*)	2 (**)	±1

(\*) y (\*\*) Los valores relativos al máximo y mínimo número de redondos de armado vendrán condicionados por los siguientes criterios.

Cuantía Mecánica.

Tal y como se indica en el art.42.3.2 EHE [1], la armadura resistente longitudinal traccionada deberá cumplir la relación:

$$A_s \geq 0,04 \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

Para secciones de hormigón armado en flexión simple cuando la resistencia característica es menor a  $50 \text{ N/mm}^2$ , se admite disponer una armadura mínima  $\alpha \cdot A_s$ . El valor de  $\alpha$  para secciones rectangulares será:

$$\alpha = 1,5 - 12,5 \cdot \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Donde:

$A_s$ : Área de armadura pasiva

$A_c$ : Área de la sección total de hormigón.

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva en tracción

$f_{cd}$ : Resistencia de cálculo del hormigón en compresión

#### Cuantías mínimas de Armado.

Las cuantías mínimas a disponer de armado serán las reflejadas por la instrucción EHE-08 [1] en su artículo 42.3.5. Así:

**Tabla 3.30. Modelo 2. Cuantías de armado. EHE [1].**

	Acero $f_y=400 \text{ N/mm}^2$	Acero $f_y=500 \text{ N/mm}^2$	Referencia
Armado Longitudinal			Art 42.3.5 EHE[1]
Losas (1)	2.0 por mil	1.8 por mil	
Vigas (2)	3.3 por mil	2.8 por mil	
Armado Transversal			
Armadura de Cercos	$\sum \frac{A_a f_{yat}}{\text{sen} \alpha} \geq \frac{f_{ct,m}}{7,5} \cdot B_s$ donde Para $f_{ck} < 50 \rightarrow f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$		Art 44.2.3.4 EHE[1]
Armadura de Cercos	Los cercos se prolongarán una distancia de medio canto útil más allá de la sección en la que dejan de ser necesarios.		Art 44.2.3.4 EHE[1]

(1) Indicando que para el caso de zapatas armadas se adoptarán la mitad de estas cuantías en cada dirección dispuestas en la cara inferior.

(2) Cuantía a disponer en la cara de tracción. Se recomienda disponer un 30% en la cara opuesta. Criterio que se adoptará.

#### Distancias mínimas/máximas entre barras de armado

En relación a las limitaciones relativas a la separación entre barras de armado, se seguirá lo indicado en la instrucción EHE-08 [1]. En la siguiente table se muestran resumidos las restricciones impuestas y consideradas en el estudio.

Tabla 3.31. Modelo 2. Distancias Max/Min entre armaduras.

Elemento / criterio	Distancias Max/Min	Referencia
<b>Zapatas</b>		
Separación máxima entre armaduras longitudinales de zapatas	30 cm	EHE [1] art 58.8.2
Separación mínima entre armaduras	10 cm	Calavera [3]
<b>Viga Riostra</b>		
Separación mínima entre armaduras longitudinales de viga riostra	$s_c > \max(2 \text{ cm}; \phi_{\max}; 1,25\phi_{\max}^{\text{arido}})$	EHE [1] art 69.4.1.1
Separación mínima entre cercos	$St \leq 0.75 d (1+\cotg \alpha) < 600 \text{ mm}$ si $V_{rd} \leq 1/5 V_{u1}$ $St \leq 0.60 d (1+\cotg \alpha) < 300 \text{ mm}$ si $1/5 V_{u1} < V_{rd} \leq 2/3 V_{u1}$ $St \leq 0.30 d (1+\cotg \alpha) < 200 \text{ mm}$ si $V_{rd} > 2/3 V_{u1}$	EHE. [1] Art 44.2.3.4.1
Separación máxima transversal entre ramas de cercos	$S_{t,trans} \leq d \leq 500 \text{ mm}$	EHE. [1] Art 44.2.3.4.1

3.6.3.2 Patrones de armado.

Se muestra a continuación el modelo de armado propuesto para esta solución de cimentación mediante viga centradora de ancho constante, con la identificación de los armados dispuestos.

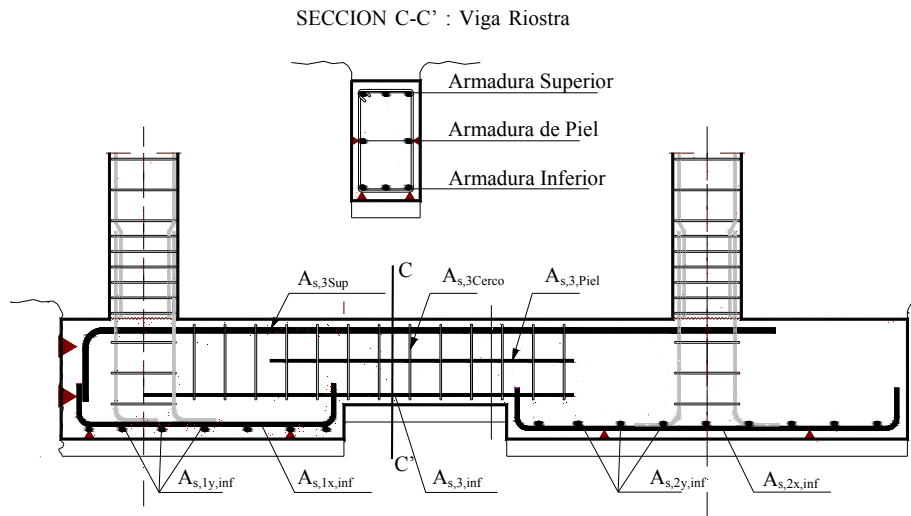


Figura 3.24. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Patrón Armado

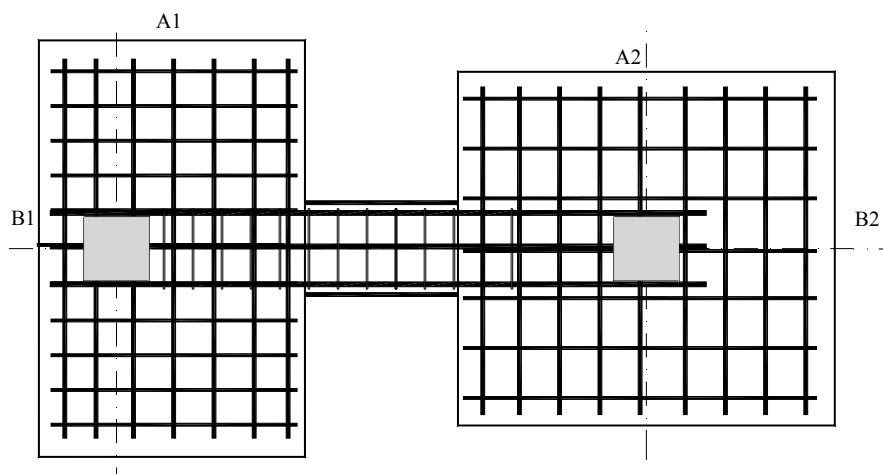


Figura 3.25. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Patrón Armado I

En relación con la viga riostra, los modelos de armado se muestran a continuación:

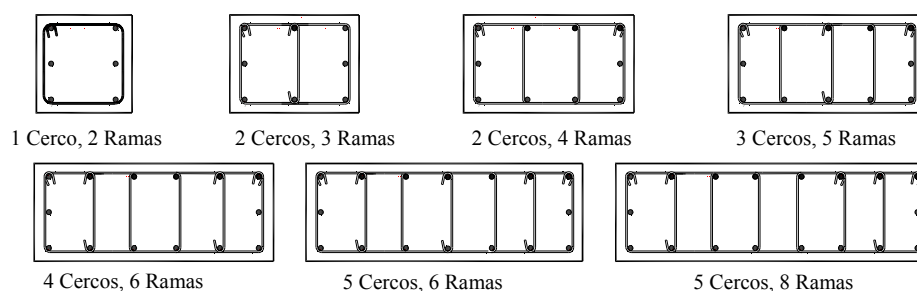


Figura 3.26. Modelo 2. Zapata excéntrica con viga centradora. Armado a cortante

Todos los armados de refuerzo a cortante considerados en este estudio, formarán con el eje de la viga  $90^\circ$ .

### 3.6.3.3 Aptitud al Servicio. ELS de Tensiones en el Terreno.

Para el diseño de esta solución se seguirá lo indicado en las instrucciones, **EHE.08** [1] y **CTE** [2], así como el procedimiento descrito en **Calavera** [3]. Al igual que para el modelo de zapatas aisladas, distinguiremos en función de la modelización del comportamiento del terreno entre un primer modelo de “cimiento rígido”, que supondrá un comportamiento rígido de las zapatas y un segundo modelo, al que denominaremos, ‘Modelo elástico simplificado’, en el que se supondrá que la presión que ejerce el terreno sobre el elemento es directamente proporcional al asiento a través de una constante de proporcionalidad, denominada ‘Módulo de balasto’.

Modelo I. Cimiento Rígido:

Bajo el supuesto de que la rigidez de las zapatas-viga es muy superior a la de los soportes, el modelo en dirección perpendicular a la medianera se puede simplificar a una viga biapoyada sometida a los esfuerzos actuantes en cada soporte más su peso propio, tal y como se muestra en la siguiente figura:

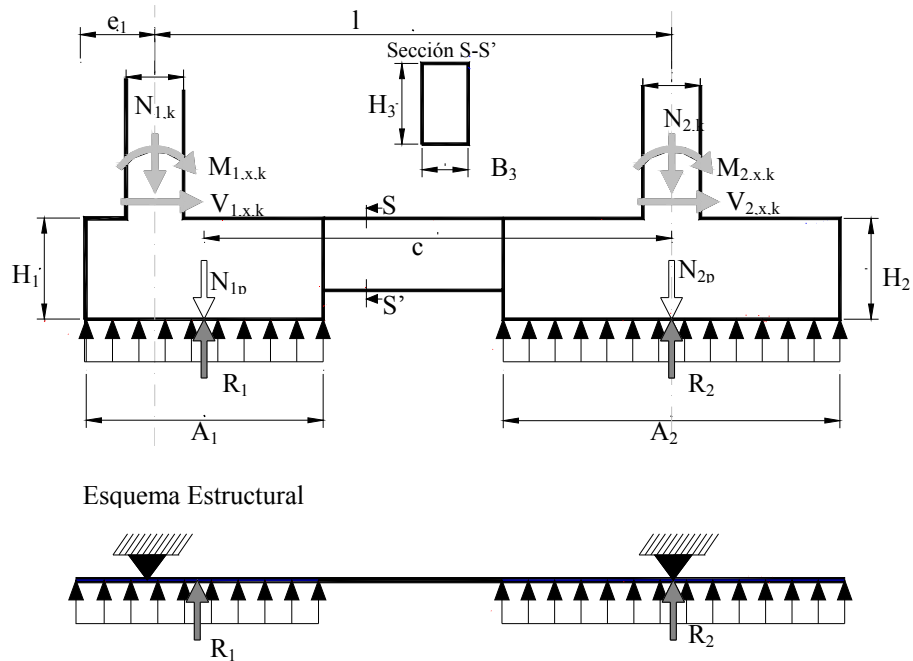


Figura 3.27. Modelo 2. Modelo de Cálculo. Cimiento Rígido.

Entre las condiciones impuestas al sistema, se encuentra que las tensiones transmitidas al terreno sean uniformes, tanto en la zapata 1 como en la zapata 2, para lo que estas deberán verificar las mismas condiciones de rigidez ya descritas para el caso de zapatas aisladas.

Según los requisitos del **DB-C de CTE [2]**, se podrá considerar que el cimiento es rígido y su distribución de presiones sobre el terreno lineal, si se verifica:

$$v \leq \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot K_{sB}}}$$

Para el cálculo de las tensiones transmitidas al terreno, se analizará el sistema de viga biapoyada descrito anteriormente, sometido a las combinaciones de cargas para Estado Límite de servicio descritas en 3.2.4.

Aplicando las ecuaciones de equilibrio se obtiene:

$$\sum F_y = 0 \longrightarrow N_{1,k} + N_{p1} + N_{2,k} + N_{p2} = R_1 + R_2$$

Tomando momento respecto al eje del soporte interior:

$$\sum M = 0 \longrightarrow M_{1,x,k} + V_{1,x,k} \cdot H_1 + M_{2,x,k} + V_{2,x,k} \cdot H_2 + R_1 \cdot c = N_{1,x,k} \cdot l + N_{p1} \cdot c$$

Donde:

$N_{1,x,k}, M_{1,x,k}, V_{1,x,k}, N_{2,x,k}, M_{2,x,k}, V_{2,x,k}$  : Son los esfuerzos característicos correspondientes a los soportes 1 y 2 para la combinación de ELS.

$N_{p1}, N_{p2}$ , son los pesos propios correspondientes a las zapatas 1 y 2.

$R_1, R_2$  : Son las reacciones uniformes bajo cada zapata

Despejando de la segunda ecuación, se obtiene:

$$R_1 = N_{p1} + \frac{N_{1,k} \cdot l - (M_{1,x,k} + V_{1,x,k} \cdot H_1 + M_{2,x,k} + V_{2,x,k} \cdot H_2)}{c}$$

$$R_2 = N_{1,k} + N_{p1} + N_{2,k} + N_{p2} - R_1$$

Donde:

$$c = l + e_1 - \frac{A_1}{2}$$

Al igual que para el caso de zapatas aisladas, la presión sobre el terreno de la zapata de medianera deberá cumplir las condiciones:

$$\sigma_{media} = \frac{R_1}{A_1 \cdot B_1} \leq \sigma_{admisible}$$

$$\frac{N_{p1} + \frac{N_{1,k} \cdot l - M_k}{c}}{A_1 \cdot B_1} \leq \sigma_{ad}$$

Donde:

$$M_k = M_{1,x,k} + V_{1,x,k} \cdot H_1 + M_{2,x,k} + V_{2,x,k} \cdot H_2$$

Sustituyendo c por su valor.

$$\frac{N_{p1} + \frac{N_{1,k} \cdot l - M_k}{l + e_1 - \frac{A_1}{2}}}{A_1 \cdot B_1} \leq \sigma_{ad}$$

Para la zapata interior consideraremos la situación más desfavorable, es decir, la que mayor tensión genera en el terreno. Dado que el sistema de viga centradora provoca un levantamiento en la zapata interior, la situación más desfavorable en la zapata interior ocurrirá cuando sobre el soporte 1, solo actúen las cargas permanentes. Así pues los nuevos valores serán:

$$R_1^* = N_{p1} + \frac{N_{1cp,k} \cdot l - (M_{1cp,x,k} + V_{1cp,x,k} \cdot H_1 + M_{2,x,k} + V_{2,x,k} \cdot H_2)}{c}$$

$$R_2^* = N_{1cp,k} + N_{p1} + N_{2,k} + N_{p2} - R_1^*$$

Y la condición a verificar:

$$\frac{N_{1cp,k} + N_{2,k} + N_{p2} + \frac{N_{1cp,k} \cdot l - M_{kcp}}{c}}{A_2 \cdot B_2} \leq \sigma_{ad}$$

Donde:

$N_{1cp,k}$ : Son las cargas verticales del soporte 1, correspondientes únicamente de las cargas permanentes sin mayorar.

$N_{2,k}$ : Son las cargas verticales del soporte 2, debidas a las cargas permanentes y sobrecargas sin mayorar.

$N_{p1}, N_{p2}$ : Son las cargas debidas a peso propio del cimiento 1 y 2.

Condición de no levantamiento:

Dado que los esfuerzos verticales en la zapata 1, provocan un levantamiento sobre la zapata 2, se deberá asegurar que este levantamiento producido sobre la zapata interior no provoca despegues de la zapata. La condición de seguridad para verificar este punto será la de que dicho levantamiento,  $R_2$ , no se produzca en la situación más desfavorable, que sería aquella Donde, actuando la carga completa en el soporte exterior (cargas permanente + sobrecarga) solo actuase las cargas permanentes en el soporte interior.

Así pues la condición a verificar será:

$$R'_2 = N_{1,k} + N_{p1} + N_{2,cp,k} + N_{p2} - R'_1 > 0$$

Con:

$$R'_1 = N_{p1} + \frac{N_{1,k} \cdot l - (M_{1,x,k} + V_{1,x,k} \cdot H_1 + M_{2,cp,x,k} + V_{2,cp,x,k} \cdot H_2)}{c}$$

Modelo II: Método elástico simplificado.

Al igual que se indicó para las zapatas aisladas, con este modelo se permitirán comportamientos flexibles del cimientto. Para la modelización del comportamiento del suelo, se supondrá una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes, considerándose además que la viga riostra transmite tensiones al terreno. El modelo está basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimientto al suelo y el asiento en este mismo punto. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga, pero sin estar coaccionado por otros a través del cimientto. Se modelizará el suelo mediante la teoría del coeficiente de balasto de winkler, suponiendo que la presión que ejerce el terreno sobre el elemento es directamente proporcional al asiento a través de la constante de proporcionalidad, “Coeficiente de balasto K”, mediante la expresión.

$$y = \sigma / K$$

Donde K es el Módulo de Balasto del terreno

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + K \cdot b \cdot y - q \cdot b = 0$$

Se trata de una ecuación diferencial lineal homogénea de cuarto orden. La solución real de dicha ecuación es:

$$w(x) = C_1 \cdot \cosh\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{Le}\right) + C_2 \cdot \cosh\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \text{seno}\left(\frac{x}{Le}\right) + C_3 \cdot \text{senoh}\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{Le}\right) + C_4 \cdot \text{senoh}\left(\frac{x}{Le}\right) \cdot \text{seno}\left(\frac{x}{Le}\right)$$

Donde:

Le: Es la longitud elástica, definida como:



$$Le = \left( \frac{4 \cdot E \cdot I}{B \cdot K} \right)^{1/4}$$

La integración de la ecuación de diferencias, dará como resultado la ecuación de la deformada.  $y=f(x)$ . A partir de ella se obtendrá la ley de presiones sobre el terreno:

$$\sigma = K \cdot f(x)$$

Y a partir de ella, la ley de momentos actuantes:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$M(x) = -E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh \left[ \frac{x}{Le} \right] \cdot \left( D \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] - C \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) + \left( B \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] - A \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) \cdot \operatorname{senoh} \left[ \frac{x}{Le} \right]}{Le^2} \right)$$

Así como la ley de cortantes actuantes:

$$Q(x) = E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dx^3}$$

$$Q(x) = E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh \left[ \frac{x}{Le} \right] \cdot \left( (B-C) \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] - (A+D) \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) - \left( (A-D) \cdot \cos \left[ \frac{x}{Le} \right] + (B+C) \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{Le} \right] \right) \cdot \operatorname{senoh} \left[ \frac{x}{Le} \right]}{Le^3} \right)$$

Operativamente se plantean dos modelos independientes, uno para la dirección x, (modelo de 5 barras apoyadas sobre el terreno entre los nudos 1-2-3-4-5-6), y otro para la dirección y (modelos independientes de dos barras entre los nudos 7-8-9 y 10-5-11), compuestos cada uno de ellos por vigas apoyadas en el terreno. En la dirección x, las cargas actuantes se dispondrán en los nudos 2 y 5 según esquemas inferiores, mientras que las cargas incluidas en los modelos en dirección y, serán las correspondientes a las reacciones obtenidas en el modelo 'x' bajo cada uno de los cimientos. Los resultados alcanzados se han comparado con los obtenidos en modelos en 2d, realizados con el programa SAP 2000 [13], utilizando elementos tipo placa, obteniéndose en todos los casos resultados similares que han permitido validar los modelos de barras propuestos.

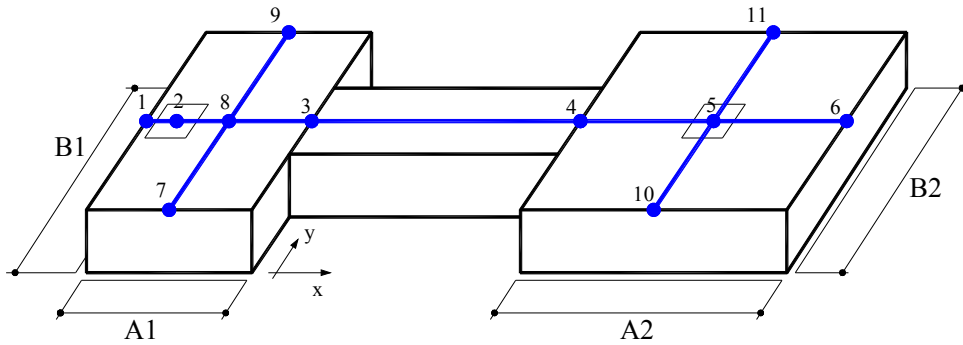
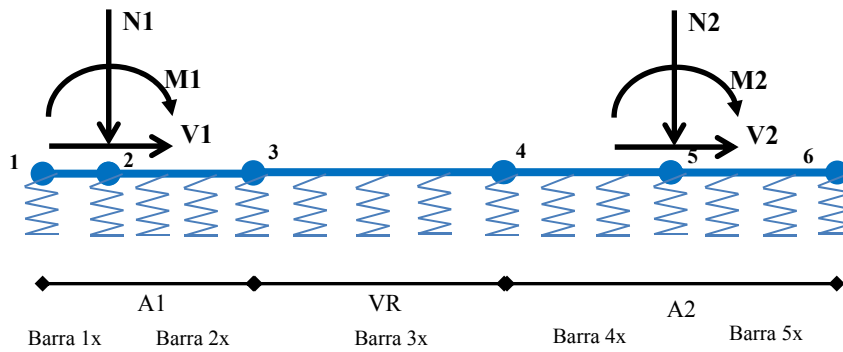


Figura 3.28. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo elástico simplificado.

Dirección x: Modelo de barras.



Dirección y: Modelo de barras.

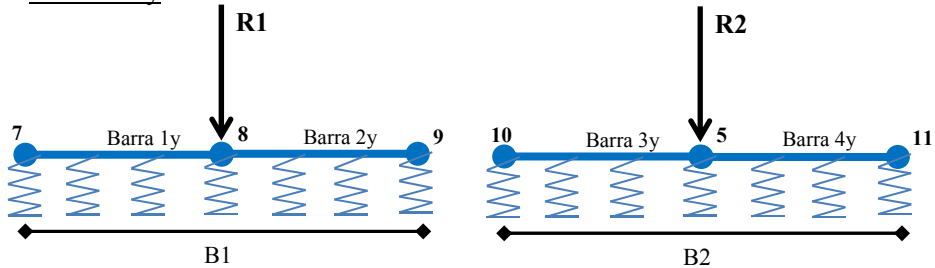


Figura 3.29. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelos de barras.

Las hipótesis de partida del modelo serán:

- Todos los materiales presentarán un comportamiento lineal.
- Se estará en el ámbito de pequeños desplazamientos.
- No se consideran efectos locales, como cambios bruscos de sección

- No se considera el efecto de cortante en la flexión.
- Las vigas son de sección constante.
- La presión en cada punto depende del asiento en el mismo, siendo independiente del resto de puntos.
- No existe interacción entre elementos de terreno contiguos, por lo que no se tiene en cuenta el efecto de cortante del terreno. Por ello se infravalora la resistencia del mismo, obteniéndose asientos superiores a los reales.
- El modelo no permite asientos positivos, es decir despegues de ningún punto en la cimentación.

Para la resolución del modelo se recurrirá al método matricial de estructuras, de la misma forma que se indicó para el modelo de zapatas aisladas.

En este caso la matriz de rigidez global de cada modelo será:

Dirección x:

$$\begin{bmatrix} K_{I,I}^{1x} & K_{I,II}^{1x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{II,I}^{1x} & K_{II,II}^{1x} + K_{I,I}^{2x} & K_{I,II}^{2x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{II,I}^{2x} & K_{II,II}^{2x} + K_{I,I}^{3x} & K_{I,II}^{3x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{II,I}^{3x} & K_{II,II}^{3x} + K_{I,I}^{4x} & K_{I,II}^{4x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{II,I}^{4x} & K_{II,II}^{4x} + K_{I,I}^{5x} & K_{I,II}^{5x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{II,I}^{5x} & K_{II,II}^{5x} \end{bmatrix}$$

Dirección y:

$$\begin{bmatrix} K_{I,I}^{1y} & K_{I,II}^{1y} & 0 \\ K_{II,I}^{1y} & K_{II,II}^{1y} + K_{I,I}^{2y} & K_{I,II}^{2y} \\ 0 & K_{II,I}^{2y} & K_{II,II}^{2y} \end{bmatrix}$$

Al igual que se indicó para el modelo de zapatas aisladas, con la resolución de cada uno de los 3 sistemas de ecuaciones planteados, se obtendrán los giros y desplazamientos de cada uno de los nudos del sistema, y a partir de estos valores, se podrán completar las leyes de deformaciones y esfuerzos a lo largo de cada una de las barras.

Con los valores de asiento obtenidos, se calcularán las tensiones transmitidas al terreno a lo largo del cimiento, mediante:

$$\sigma = y \cdot K$$

Y con ella se verificarán las condiciones del ELS de Tensiones en el Terreno.

- Condicion 1:  $\sigma_{media} \leq \sigma_{admisible}$
- Condicion 2:  $\sigma_{maxima} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisible}$

### 3.6.3.4 Aptitud al Servicio. Estado Límite de Fisuración.

Para la comprobación de este estado límite, se seguirán las indicaciones ya descritas en el punto 3.5.2.4 para el caso de zapatas aisladas, con la única salvedad de que en este caso se aplicarán las comprobaciones además de a las zapatas, a la viga riostra.

### 3.6.3.5 Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al vuelco.

Para la comprobación de este estado límite, se seguirán las mismas indicaciones ya descritas en el punto 3.6.2.5., para el caso de zapatas aisladas, con la única salvedad de que es este caso el análisis se efectuará sobre un modelo que incluirá simultáneamente las dos zapatas. Tal y como se indico en el punto 3.6.2.6., la condición a verificar será:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$$

$E_{d,dst}$ : es el valor de cálculo del efecto de las acciones desestabilizadoras.

$E_{d,stb}$ : es el valor de cálculo del efecto de las acciones estabilizadoras.

Adoptando los coeficientes de seguridad parciales recogidos en CTE [2] tabla 2.1:

$$1.8 \cdot E_{dst} \leq 0.9 \cdot E_{stb} \text{ , es decir, } \frac{E_{stb}}{E_{dst}} \geq 2.0$$

La evaluación de las distintas acciones estabilizantes y desestabilizantes, dará como resultado:

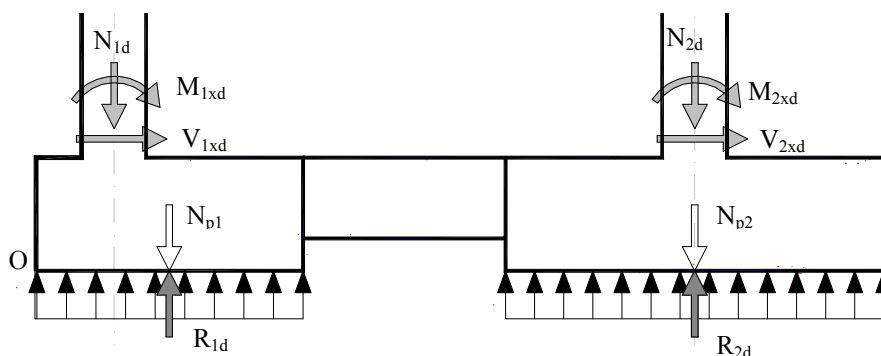


Figura 3.30. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo Rígido. Equilibrio.

Tomando momentos respecto al punto extremo, O.

$$M_{stb} = M_{1xd} + M_{2xd} + V_{1xd} \cdot H_1 + V_{2xd} \cdot H_2 + N_{1d} \cdot e_1 + N_2 \cdot (e_1 + l) + N_{p1} \cdot \left(\frac{A_1}{2} - e_1\right)$$

$$M_{dst} = R_1 \cdot A_1 \cdot 0.5 + R_2 \cdot (e_1 + l)$$

y la condición final a verificar será.:

$$\frac{M_{1xd} + M_{2xd} + V_{1xd} \cdot H_1 + V_{2xd} \cdot H_2 + N_{1d} \cdot e_1 + N_2 \cdot (e_1 + l) + N_{p1} \cdot \left(\frac{A_1}{2} - e_1\right)}{R_1 \cdot A_1 \cdot 0.5 + R_2 \cdot (e_1 + l)} \geq 2$$

### 3.6.3.6 Seguridad Estructural: E.L.U. Estabilidad al Deslizamiento.

La comprobación de este estado límite último, seguirá los mismos pasos ya comentados para el modelo de zapatas aisladas, punto 3.6.2.6., con la única salvedad que el análisis se efectuará como un solo elemento de cimentación y no cada zapata por separado.

### 3.6.3.7 Seguridad Estructural: E.L.U. de Flexión.

Se incluyen a continuación las condiciones impuestas para la verificación de este Estado Límite de Agotamiento frente a sollicitaciones normales de flexión. Se distinguirá entre los dos modelos de análisis propuestos, Modelo de Cimiento Rígido y Modelo Elástico simplificado.

#### Modelo I: Cimiento Rígido.

Como ya se comentó anteriormente, se supondrá para este modelo un comportamiento rígido de las cimentaciones, imponiéndose la condición de una distribución de tensiones lineal y constante bajo cada cimiento.

Al igual que se realizó para el cálculo de las tensiones transmitidas al terreno, inicialmente se calcularán las reacciones bajo cada zapata imponiendo las condiciones de equilibrio al sistema. En este caso, no se considerarán las cargas debidas a peso propio y se incluirán las cargas externas bajo la combinación de E.L.U. ya definida en el punto 3.2.4.

Así pues, imponiendo las condiciones de equilibrio al sistema de fuerzas mostrado en la figura 3.30:

$$\sum F_y = 0 \longrightarrow N_{1,d} + N_{2,d} + N_{p2} = R_{1d} + R_{2d}$$

Tomando momentos respecto al eje del soporte interior:

$$\sum M = 0 \longrightarrow M_{1,x,d} + V_{1,x,d} \cdot H_1 + M_{2,x,d} + V_{2,x,d} \cdot H_2 + R_{1d} \cdot c = N_{1,d} \cdot l + N_{p1} \cdot c$$

Despejando de la segunda ecuación:

$$R_{1d} = \frac{N_{1,d} \cdot l - (M_{1,x,d} + V_{1,x,d} \cdot H_1 + M_{2,x,d} + V_{2,x,d} \cdot H_2)}{c}$$

$$R_{2d} = N_{1,d} + N_{2,d} - R_{1d}$$

Denominando:

$$M_d = M_{1,x,d} + V_{1,x,d} \cdot H_1 + M_{2,x,d} + V_{2,x,d} \cdot H_2$$

$$R_{1d} = \frac{N_{1,d} \cdot l - M_d}{c}$$

$$R_{2d} = N_{1,d} + N_{2,d} - R_{1d} = N_{1,d} + N_{2,d} - \frac{N_{1,d} \cdot l - M_d}{c}$$

Una vez determinadas las reacciones en el terreno, se procede al cálculo de los esfuerzos suponiendo un modelo de viga rígida biapoyada. Las leyes de momentos y cortantes se representan en la siguiente figura:

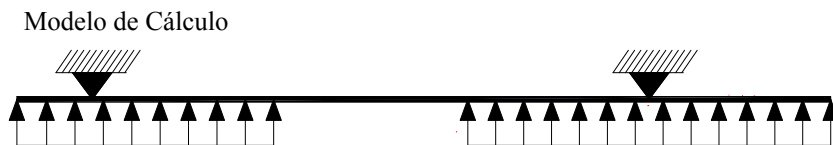


Figura 3.31. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo Cimiento Rígido.

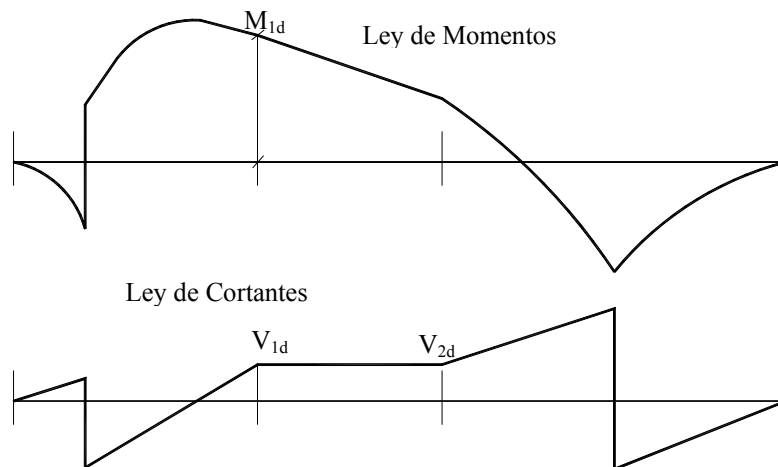


Figura 3.32. Modelo 2. Leyes de esfuerzos. Modelo Rígido.

Para las verificaciones del ELU de flexión en cada uno de los elementos se seguirán las siguientes indicaciones:

Viga Riostra:

Para el cálculo de la viga riostra se tendrán en cuenta los esfuerzos máximos actuantes en ella,  $M_{1d}$  y  $V_{1d}$ , tal y como muestra la figura anterior. El momento de diseño de la viga riostra será el obtenido en la sección correspondiente a la unión entre viga riostra y zapata de medianería. En el interior de la zapata, tal y como reflejan los gráficos, se obtienen valores superiores de  $M$ , pero la sección resistente es muy superior, siempre que el canto de la viga riostra no sea superior al de la zapata, situación que no contemplará como válida. En todo caso, y siguiendo los criterios de Calavera [3], el refuerzo a cortante de la viga riostra se llevará hasta el extremo de la zapata de medianera. Del análisis del equilibrio del sistema impuesto, se obtienen los esfuerzos de diseño de la viga riostra:

$$M_{1,x,d} = R_{2d} \cdot \frac{A_2}{2} + M_d - N_{1,d} \cdot (A_1 - e)$$

$$V_{1,x,d} = R_{2d} - N_{1,d}$$

La viga se armará superiormente con la cuantía que permita cubrir el momento  $M_{1d}$ , verificándose a su vez el cumplimiento de las cuantías mínimas indicadas en el artículo 42.3.5 de EHE-08 [1] y descritas en el punto 3.6.3.1.

Se impondrá como criterio de diseño el no ser necesaria armadura de compresión en la viga. Con estos criterios el proceso de diseño será el siguiente:

$$\mu = \frac{M_{1d}}{B_3 \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \leq 0.252$$

$$\omega = \mu \cdot (1 + \mu)$$

$$A_{s,mech} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_s = \max(A_{s,mech}, A_{s,geo})$$

La armadura dispuesta, cumplirá las limitaciones de separación indicada en la instrucción EHE-08 [1] y ya descritas en el punto 3.5.3.1.

$$s_c > \max(2 \text{ cm}; \phi_{\max}; 1,25\phi_{\max}^{arido})$$

El armado se prolongará al menos hasta el eje del soporte de medianería, a partir del cual, se dispondrá una longitud de anclaje dada por:

$$l_b = \frac{V_{1d}}{A_s \cdot f_{yd}}$$

Donde  $V_{1d}$  corresponde al cortante máximo existente en la sección dispuesta a un canto útil de la cara del soporte de medianera.

Del mismo modo el armado se prolongará hasta el eje del soporte interior, a partir del cual se dispondrá una longitud de anclaje de valor:

$$l_b = \frac{V_{2'd}}{A_s \cdot f_{yd}}$$

Siendo  $V_{2'd}$ , el cortante existente a un canto útil de la cara del soporte interior.

Caso de que la viga disponga de cantos mayores a 60 cm, se dispondrá una armadura de piel, con una separación no mayor de 20 cm y cuya cuantía será:

$$\frac{100 A_s^{piel}}{b(2d - h)} \geq 0.05 \text{ (por cara)}$$

El criterio se adopta de lo indicado en la anterior instrucción de Hormigón Española EH-91 [12].

Esta armadura se llevará hasta su encuentro con cada una de las zapatas a partir de lo cual se prolongará una longitud de anclaje.

En relación al armado inferior y tal y como indica la instrucción EHE [1] tabla 42.3.5, en la cara opuesta a la de tracción se dispondrá una cuantía mínima igual al 30% de la colocada en la cara superior.

La armadura inferior se dispondrá a lo largo de la viga riostra, por un lado hasta el eje del soporte de medianera, para permitir la posterior disposición del refuerzo a cortante y por el otro lado hasta la entrada en la zapata interior, a partir de la cual se dispondrá una longitud de anclaje, dada por las condiciones reflejadas en la instrucción EHE [1] y con una distancia mínima de  $d/2$ , criterio también recogido en la misma instrucción.

#### Zapata de medianera

Armadura inferior paralela a la medianera. Dirección y.

Para el cálculo de este armado se seguirá el procedimiento descrito en la instrucción EHE[1] para zapatas aisladas y recogido en el apartado 3.5.2.7., teniendo en cuenta las tensiones transmitidas en esta dirección, trabajando la zapata como una losa de vuelo igual a  $0.5 \times B_1 - 0.5 \times b_{1p}$ . Para el caso de cimiento rígido se tendrá en cuenta que la zapata se encuentra sometida a una tensión de valor:



$$\sigma_{1d} = \frac{R_{1d}}{A_1 \cdot B_1} = \frac{N_{1,d} \cdot l - M_d}{A_1 \cdot B_1 \cdot c}$$

Una vez determinados los valores de tensión sobre el terreno, se calculará el Momento de diseño en la sección de referencia, tal y como se describió en el caso de zapatas aisladas.

Armadura inferior perpendicular a la medianera. Dirección x.

Para la determinación de esta armadura, se atenderá a un criterio de cuantía geométrica mínima, teniendo en cuenta la aportación que hace la armadura de la viga centradora en la sección de la zapata, y por otro lado se comprobará la relación incluida en la anterior instrucción de Hormigón Española EH-91 [12], relativa a que cualquier sección de la zapata debe ser capaz de soportar un flector por unidad de longitud de, al menos, la quinta, parte del producido en una sección perpendicular, es decir:

$$\frac{1}{5} \left( \frac{M_{ds1}}{A'_1} \right) \leq \left( \frac{M_{ds1}^\perp}{B'_1} \right)$$

#### Zapata Interior.

El dimensionado a flexión de la zapata interior, correspondiente al soporte 2, seguirá los mismos principios desarrollados en el apartado correspondiente al modelo de Zapata Aislada, teniendo en cuenta la reacción,  $R_2$ , obtenida de las condiciones de equilibrio del sistema impuesto. Como situación más desfavorable, la reacción  $R_2$ , se obtendrá en el caso de actuar únicamente las cargas permanentes en el soporte medianero, que dará como resultado un menor valor de levantamiento en la zapata interior y por tanto mayores tensiones de diseño. El resto de pasos seguirá lo ya descrito en el apartado 3.6.2.7.

#### Modelo II: Modelo elástico simplificado.

En este caso, la presión en cada punto será proporcional a la deformación del terreno, y para su resolución se recurrirá al método de la matriz de rigidez, tal y como se indicó en el apartado de comprobación del ELS de tensiones en el terreno, adoptando en este caso las cargas mayoradas y sin la consideración del peso propio.

Se plantean pues tres sistemas de barras, uno para la modelización del comportamiento en la dirección x y dos modelos más, para la modelización del comportamiento en dirección y de cada cimiento.

Tras obtener los asientos y giros en cada uno de los nudos del sistema de barras modelizado, se obtendrán las leyes de esfuerzos (Momentos y cortantes) a través de las ecuaciones:

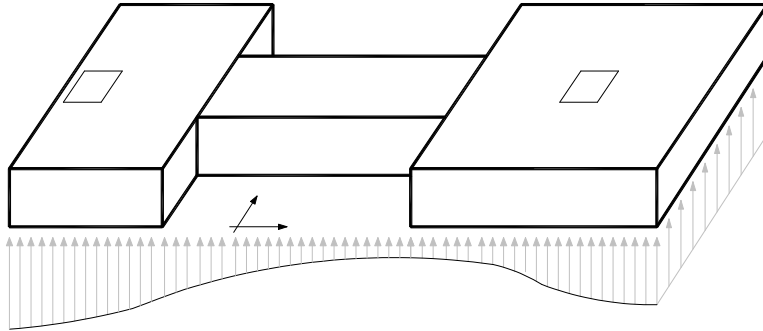


Figura 3.33. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Modelo Elástico Simplificado.

$$M(x) = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$$

Así como la ley de cortantes actuantes:

$$Q(x) = E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dx^3}$$

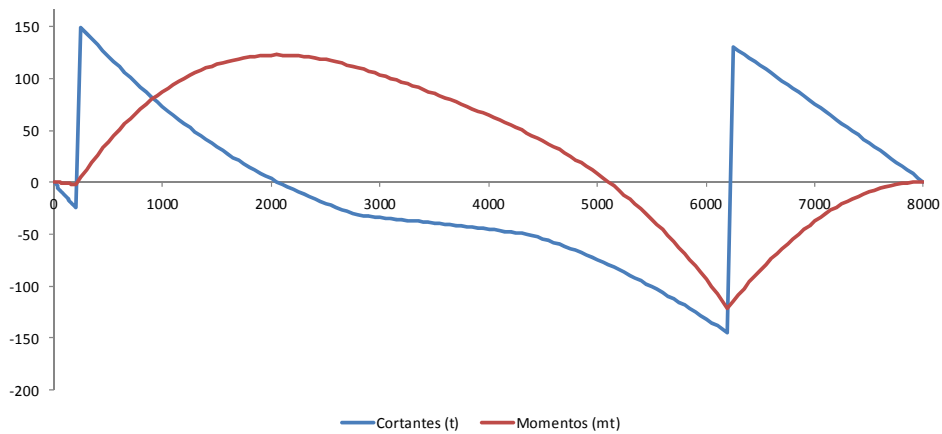


Figura 3.34. Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Gráficas de esfuerzos modelo Elástico.

A partir de las ecuaciones, se obtendrá los esfuerzos de diseño, siguiendo el mismo proceso ya descrito para el modelo de cimiento rígido.

### 3.6.3.8 Seguridad Estructural: E.L.U. de Cortante.

Se incluyen a continuación las comprobaciones a realizar para la verificación del ELU de Cortante, conforme a lo estipulado en el articulado de la instrucción EHE-08 [1].

#### Viga Riostra

El valor del esfuerzo cortante de diseño para la viga riostra será el valor máximo obtenido a lo largo de la misma y dependerá del modelo de análisis considerado. Así, para el modelo de cimentación rígida, dicho valor se situará en el punto de unión de la viga riostra con la zapata de medianería, mientras que en el caso del modelo elástico simplificado propuesto, dicho valor se corresponderá con el obtenido en el encuentro de la viga riostra con la zapata interior.

La comprobación se realizará según lo dispuesto en el artículo 44.2.3 de la instrucción EHE-08[1], disponiéndose un armado mínimo compuesto de 2 cercos de diámetro 6 mm.

Según lo indicado en la instrucción art 44.2.3 de EHE [1], las verificaciones a realizar serán:

- a) Agotamiento por compresión oblicua del alma

$$V_d \leq V_{u1}$$

donde para nuestra situación :

$$V_{u1} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot B_3 \cdot d_3$$

- b) Agotamiento por tracciones en el alma

$$V_d \leq V_{u2}$$

El procedimiento de cálculo es el mismo descrito anteriormente para zapatas aisladas, con la salvedad de que en este caso si se permite la disposición de armadura de refuerzo a cortante. Caso de obtenerse como resultado, la necesidad de disponer de refuerzo a cortante, se deberían verificar las siguientes restricciones:

Para piezas con armadura de cortante:

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su}$$

Donde:

$$V_{cu} = \frac{0.15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot \left(100 \cdot \rho \cdot f_{cv} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd}\right)^{1/3} \cdot B_0 \cdot d$$

$$\text{con } V_{cu} \geq \left[ \frac{0,075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{cv}^{1/2} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd} \right] \cdot B_0 \cdot d$$

Donde:

- D, Canto útil.
- $\rho_l$ , Cuantía geométrica de armadura longitudinal de la losa.
- $\xi$ .

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, \text{ con } d \text{ en mm}$$

En caso de no cumplir habrá que disponer una armadura de cortante adicional de valor:

$$V_{su} = V_d - V_{cu}$$

La cuantía necesaria mediante barras a 90° será:

$$A_{90^\circ} = \frac{V_{su}}{0.9 \cdot \frac{d}{s} \cdot f_{yd}}$$

Donde s, es el paso entre cercos.

Se impondrá la condición de cuantía mínima indicada en el art 44.2.3.4. de EHE [1]:

$$\sum \frac{A_\alpha f_{yad}}{\text{sen } \alpha} \geq \frac{f_{ct,m}}{7,5} \cdot B_3^{2/3}$$

$$\text{Donde para } f_{ck} < 50, f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$$

La separación longitudinal entre armaduras transversales verificará la condición impuesta en el art 44.2.3.4.1 de EHE-08 [1].

$$\text{Para : } S_t \leq 0.75 d (1 + \cotg \alpha) < 600 \text{ mm si } V_{rd} \leq 1/5 V_{ul}$$

$$S_t \leq 0.60 d (1 + \cotg \alpha) < 300 \text{ mm si } 1/5 V_{ul} < V_{rd} \leq 2/3 V_{ul}$$

$$S_t \leq 0.30 d (1 + \cotg \alpha) < 200 \text{ mm si } V_{rd} > 2/3 V_{ul}$$

Con respecto a la separación transversal entre ramas se verificará la condición.

$$S_{t,trans} \leq d \leq 500 \text{ mm}$$

La armadura de cortante obtenida se prolongará una longitud igual a medio canto útil de la pieza, más allá de la sección donde teóricamente dejan de ser necesarios.

En todo caso se seguirá el criterio establecido en Calavera [3], disponiéndose el armado a cortante de la viga riostra a lo largo de toda la zapata de medianera y hasta el encuentro con la zapata interior, a partir de la cual se continuará una distancia de 2 veces el canto útil.

#### Zapata de medianera.

La comprobación del ELU Cortante en la dirección 'y', paralela al plano de la medianera, se realizará según lo indicado en la instrucción EHE-8 [1] para el caso de zapatas aisladas y cuyo desarrollo se incluye en el apartado 3.6.2.9., obteniendo los Cortantes actuantes en las secciones de referencia a un canto útil de la cara de los soportes y en función del tipo de distribución de tensiones existente.

La comprobación en la dirección 'x' perpendicular al plano de medianera, se realizará en la sección de referencia marcada por la instrucción EHE y situada a un canto útil de la cara del soporte, según el modelo de tensiones adoptado.

Se determinará el máximo valor entre las dos secciones a cada lado del soporte, siempre que las mismas no se sitúen fuera del cimiento, y con él se verificarán las mismas condiciones ya incluidas en el análisis de zapata aislada:

Para el caso de 'Modelo de cimiento Rígido', el valor de cortante máximo determinado en cada caso será:

$$V_d = N_{1d} - \sigma_{1d} \cdot B_1 \cdot (e_1 + 0.5 \cdot a_{1p} + d)$$

Las comprobaciones a realizar:

Agotamiento por compresión oblicua del alma

$$V_d \leq V_{u1}$$

donde para nuestra situación :

$$V_{u1} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot B_3 \cdot d_3$$

Agotamiento por tracciones en el alma

$$V_d \leq V_{u2}$$

#### Zapata interior:

El dimensionado a cortante de la zapata interior correspondiente al soporte 2, seguirá los mismos principios desarrollados en el apartado de zapatas aisladas.

Dirección x, perpendicular a la medianera:

En función del modelo de transmisión de tensiones al terreno adoptado, se calcularán los valores de cortante actuantes en las secciones de referencia establecidas por EHE[1], (a un canto útil de ambas caras de soporte), adoptando el valor máximo para la comprobación. Con los valores obtenidos se procederá a verificar las restricciones impuestas por EHE-08 [1].

- a) Agotamiento por compresión oblicua del alma:  $V_d \leq V_{u1}$
- b) Agotamiento por tracciones en el alma:  $V_d \leq V_{u2}$

En la dirección y, paralela a la medianera, se seguirá el mismo procedimiento.

### 3.6.3.9 Seguridad Estructural: E.L.U. de Punzonamiento.

Se incluyen a continuación las comprobaciones a realizar para la verificación del ELU de punzonamiento, conforme a lo estipulado en el articulado de la instrucción EHE-08 [1].

El dimensionado a punzonamiento de ambas zapatas (zapata de medianera y zapata interior), seguirá los mismos principios desarrollados en el apartado 3.6.2.10. de EHE[1], para zapatas aisladas.

### 3.6.3.10 Seguridad Estructural: E.L.U. de Anclaje.

Se incluyen a continuación las comprobaciones a realizar para la verificación del ELU de anclaje, conforme a lo estipulado en el articulado de la instrucción EHE-08 [1].

#### Zapata de medianera y Zapata interior:

Las condiciones de anclaje a disponer para las armaduras de las zapatas, seguirá los mismos principios desarrollados en el apartado 3.6.2.11, para zapatas aisladas.

#### Viga Riostra:

El armado superior se prolongará al menos hasta el eje del soporte de medianera, a partir del cual se dispondrá una longitud de anclaje dada por:

$$l_b = \frac{V_{2d}}{A_s \cdot f_{yd}}$$

Donde  $V_{2d}$  corresponde al cortante existente en la sección dispuesta a un canto útil de la cara del soporte de medianera.

Del mismo modo el armado se llevará hasta el eje del soporte interior, a partir del cual se dispondrá una longitud de anclaje de valor:

$$l_b = \frac{V_{2d}}{A_s \cdot f_{yd}}$$

Siendo  $V_{2d}$ , el cortante existente a un canto útil de la cara del soporte 2.

La armadura inferior se dispondrá a lo largo de la viga riostra, por un lado hasta el eje del soporte de medianera para permitir la posterior disposición del refuerzo a cortante y por el otro lado hasta la entrada en la zapata interior, a partir de la cual se dispondrá una longitud de anclaje, dada por las condiciones reflejadas en la instrucción EHE-08 [1] y con una distancia mínima de  $d/2$ , criterio también recogido en la instrucción.

### 3.6.4 Zapata Combinada de Ancho Constante (Modelo 5).

Se denominará zapata combinada, a aquella que encierra bajo la misma zapata dos pilares, imponiendo además en esta configuración que el ancho y el canto se mantenga constante a lo largo de toda la zapata.

La geometría de este modelo se muestra en la siguiente figura.

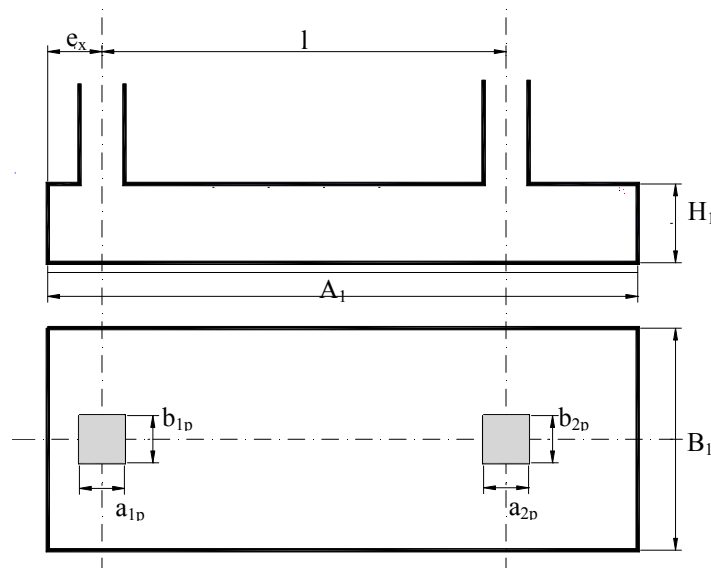


Figura 3.35. Modelo 5. Modelo Geométrico.

#### 3.6.4.1 Dominio de las variables de diseño.

Se incluye a continuación la descripción de todas las variables de diseño del modelo de cimiento de zapata combinada de ancho constante, incluyendo variables geométricas, de materiales y de armado.

VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES GEOMÉTRICAS:

Se muestra en la siguiente tabla las variables geométricas que conforman este modelo de cimentación, así como sus valores máximos, mínimos y el rango de variación posible de los mismos.

**Tabla 3.32. Modelo 5. Variables Geométricas.**

<b>MODELO 5: ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CONSTANTE</b>				
	<b>Designación</b>	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Incremento (mm)</b>
<b>Zapatas</b>				
Zapata 1: Dimensión en dirección x	A <sub>1</sub>	10.000	1.000	±100
Zapata 1: Dimensión en dirección y	B <sub>1</sub>	5.000	400	±100
Zapata 1: Canto de la zapata	H <sub>1</sub>	2.000	250 (art 58.8 EHE)	±50
<b>Condiciones Generales de Geometría</b>				
Condición de que la longitud de la zapata cubra los dos soportes			A <sub>1</sub> > e <sub>1</sub> + l + 0.5 a <sub>2p</sub>	

Tal y como se indica en la instrucción EHE-08[1] art 58.8, se impondrá un canto mínimo de 25 cm para cualquier modelo de zapata, aspecto que viene condicionado principalmente para lograr una suficiente longitud de anclaje para las armaduras longitudinales del soporte que lo acomente.

VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES RELATIVAS A LOS MATERIALES:

Este tipo de variables definirán las características de los materiales constitutivos del cemento (acero y hormigón) a utilizar. La designación de los mismos, así como el rango de valores que es posible adoptar se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 3.33. Modelo 5. Variables de los materiales.**

<b>VARIABLES DE MATERIALES</b>		
	<b>Designación</b>	<b>Rango de Valores</b>
Hormigones	f <sub>ck</sub>	25 / 30 / 35 (N/mm <sup>2</sup> )
Aceros	f <sub>ck</sub>	400 / 500 (N/mm <sup>2</sup> )

El rango de valores adoptados para estas variables será el mismo para todos los modelos de cimentación incluidos en el presente estudio.

VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES DE ARMADO:

En relación a las variables de armado de primer orden definidas en 3.4.3, correspondientes a los diámetros de los armados dispuestos, se incluye en la siguiente tabla sus valores discretos máximos y mínimos. Como valor mínimo de diámetro de las armaduras longitudinales, se adoptará el valor de 12 mm, establecido como recomendación en los comentarios del artículo 58.8.2 de EHE-08 [1].



Tabla 3.34. Modelo 5. Variables de armado. (I).

MODELO 3: ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CTE.		
	Designación	Valores (mm)
Diámetro Armado inferior en dirección 'x'	D <sub>1,x,inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior en dirección 'y'	D <sub>1,y,inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado superior en dirección 'x'	D <sub>1,x,sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado superior en dirección 'y'	D <sub>1,y,sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inf. de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 1	D <sub>1,y,inf,ref-1</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inf. de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 2	D <sub>1,y,inf,ref-2</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado piel dirección 'x'	D <sub>1,x,piel</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado de cercos	D <sub>3,cercos</sub>	6,8,10,12

## Variables de Segundo Orden: Variables de Armado:

Se incluye en la siguiente tabla sus valores máximos y mínimos así como sus posibles incrementos.

Tabla 3.35. Modelo 5. Variables de armado. (II).

MODELO 3: ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CTE				
	Designación	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Incremento
Nº de redondos Armado superior en dirección 'x'	n <sub>1,x,sup</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos Armado inferior en dirección 'x'	n <sub>1,x,inf</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos Armado superior en dirección 'y'	n <sub>1,y,sup</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos Armado inferior en dirección 'y'	n <sub>1,y,inf</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos Armado inf. de refuerzo bajo soporte 1.	n <sub>1,y,inf,ref-1</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos Armado inf. de refuerzo bajo soporte 2.	n <sub>1,y,inf,ref-2</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado de piel	n <sub>piel</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos de armado de cercos	n <sub>3,cercos</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de ramas por cerco	n <sub>3,ramascercos</sub>	8	2 (**)	1

(\*) y (\*\*) Los valores relativos al máximo y mínimo número de redondos de armado vendrán condicionados además por los siguientes criterios.

Cuantía Mecánica.

Tal y como se indica en el art.42.3.2 de EHE-08 [1], la armadura resistente longitudinal traccionada deberá cumplir la relación:

$$A_s \geq 0,04 \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

Para secciones de hormigón armado en flexión simple cuando la resistencia característica es menor a 50 N/mm<sup>2</sup>, se admite disponer una armadura mínima  $\alpha$  A<sub>s</sub>. El valor de  $\alpha$  para secciones rectangulares será:

$$\alpha = 1,5 - 12,5 \cdot \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Donde:

$A_s$ : Área de armadura pasiva

$A_c$ : Área de la sección total de hormigón.

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva en tracción

$f_{cd}$ : Resistencia de cálculo del hormigón en compresión

#### Cuantías mínimas de Armado.

Las cuantías mínimas a disponer de armado serán las reflejadas por la instrucción EHE-08 [1] en su artículo 42.3.5. Así:

**Tabla 3.36. Modelo 5. Cuantías de armado. EHE [1].**

	Acero $f_y=400 \text{ N/mm}^2$	Acero $f_y=500 \text{ N/mm}^2$	Referencia
Armaduras Longitudinales			Art 42.3.5 EHE[1]
Losas (1)	2.0	1.8	
Armaduras Transversales			
Armadura de Cercos	$\sum \frac{A_s f_{yd}}{\text{sen} \alpha} \geq \frac{f_{ct,m}}{7,5} \cdot B_3$ donde Para $-f_{ck} < 50 \rightarrow f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$		Art 44.2.3.4 EHE[1]
Armadura de Cercos	Los cercos se prolongarán una distancia de medio canto útil mas allá de la sección en la que dejan de ser necesarios.		Art 44.2.3.4 EHE[1]

(1) Cuantía a disponer en la cara de tracción. Se recomienda disponer un 30% en la cara opuesta. Criterio que se adoptará.

#### Distancias mínimas/máximas entre barras de armado

En relación a las limitaciones relativas a la separación entre barras de armado se seguirá lo indicado en la instrucción EHE-08[1], resumidas en la siguiente tabla:

**Tabla 3.37. Modelo 5. Distancias min/Max de armado.**

Criterio	Valores	Referencia
Separación máxima entre armaduras longitudinales	30 cm	EHE [1] art 58.8.2
Separación mínima entre armaduras	10 cm	Calavera [3]
Separación mínima entre cercos	$St \leq 0.75 d (1 + \cotg \alpha) < 600 \text{ mm}$ si $V_{rd} \leq 1/5 V_{u1}$ $St \leq 0.60 d (1 + \cotg \alpha) < 300 \text{ mm}$ si $1/5 V_{u1} < V_{rd} \leq 2/3 V_{u1}$ $St \leq 0.30 d (1 + \cotg \alpha) < 200 \text{ mm}$ si $V_{rd} > 2/3 V_{u1}$	EHE. [1] Art 44.2.3.4.1
Separación máxima transversal entre ramas de cercos	$S_{t,trans} \leq d \leq 500 \text{ mm}$	EHE. [1] Art 44.2.3.4.1

### 3.6.4.2 Patrón de armado.

Se muestra a continuación el modelo de armado a disponer para este modelo de cimentación.

El modelo de armado que se propone garantizará por una parte el cumplimiento de los distintos requerimientos impuestos por la actual instrucción EHE-08 [1], en cuanto a cuantías mínimas y distancias máximas y mínimas entre barras de armado, ya comentadas en apartados anteriores y por otro lado garantizará la constructibilidad de la solución.

En función de la existencia o no de esfuerzos de tracción en la cara superior del cimiento, se plantearán dos patrones de armado diferentes.

#### Opción 1: Sin Armado Superior

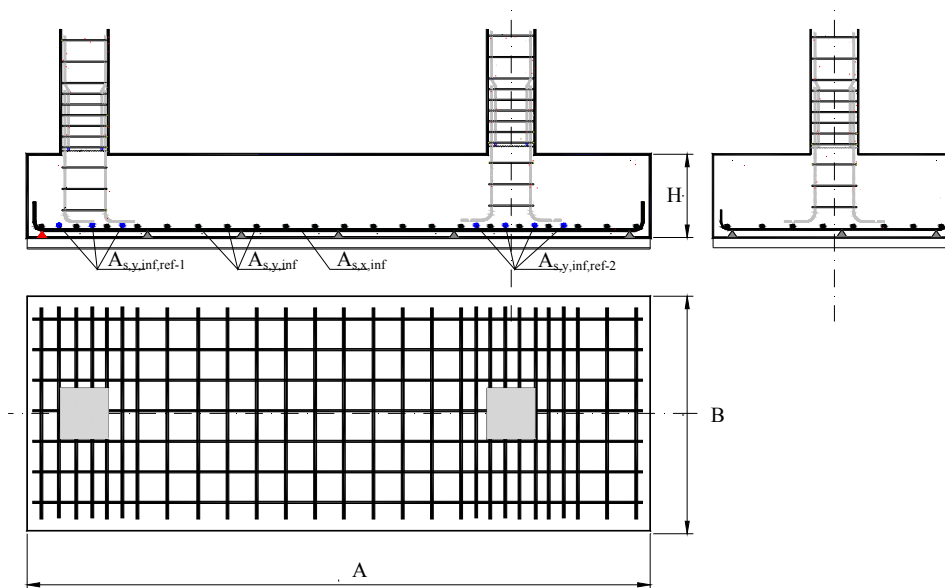


Figura 3.36. Modelo 5. Patrón de armado. (Configuración 1).

Opción 2: Con Armado Superior

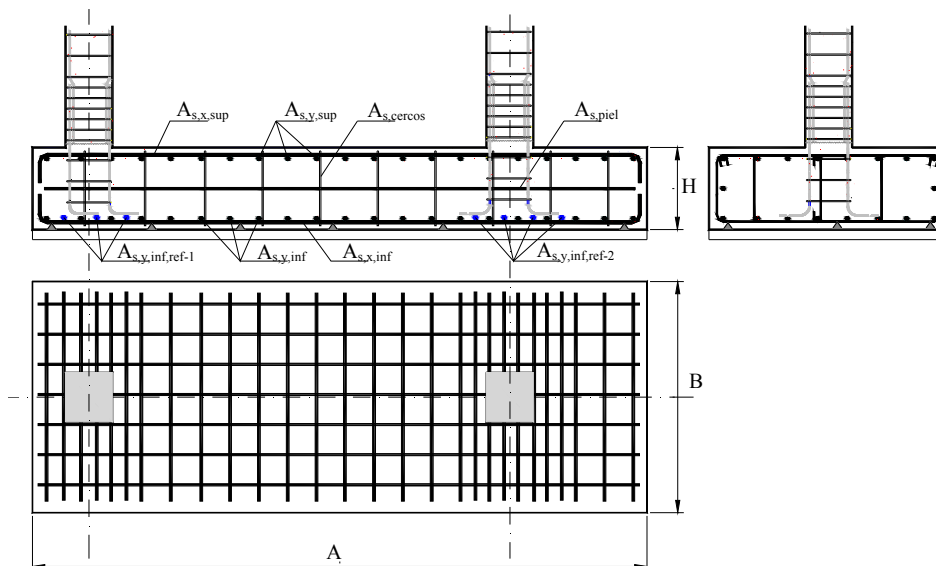


Figura 3.37. Modelo 5. Patrón de armado. (Configuración 2).

En relación a los modelos de armado de los refuerzos a cortante, las variantes se muestran en las siguientes figuras.

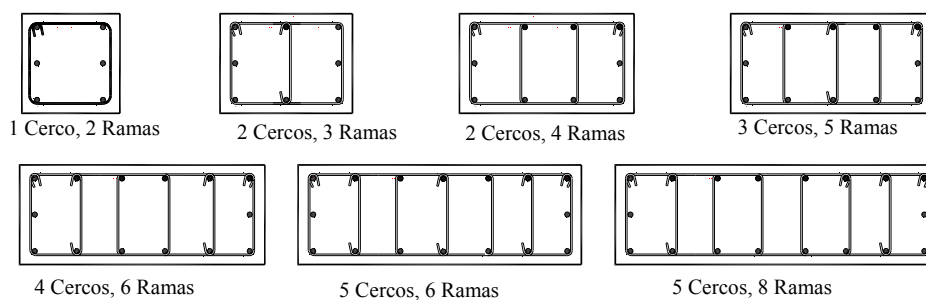


Figura 3.38. Modelo 5. Patrón de armado. Refuerzo Cortante.

3.6.4.3 Aptitud al Servicio. E.L.S. de Tensiones en el Terreno.

Al igual que en los casos anteriores, se han evaluado dos modelos de comportamiento distintos. Uno inicial, Modelo I supuesto cemento rígido, y otro, Modelo II, supuesto un modelo elástico de presiones sobre el terreno.

A.- Modelo I. Cimiento Rígido.

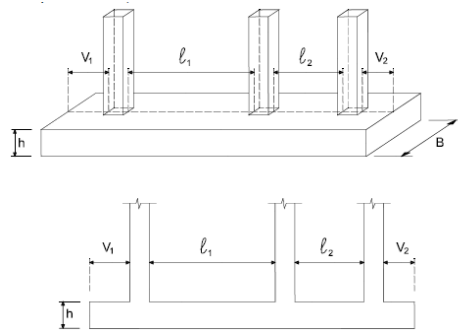
Para considerar que la zapata combinada presenta un comportamiento rígido y por tanto, a efectos de cálculo, produce una distribución de presiones lineal sobre el terreno, se deberán verificar las exigencias para ello descritas en la instrucción **EHE-08** [1].

Se considerará aceptable la hipótesis de rigidez relativa cuando:

$$l \leq \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot k_{sB}}} \quad v \leq \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E_c \cdot I_c}{B \cdot k_{sB}}}$$

Siendo:

- l: Es la luz del vano que separa, bien los dos pilares de una zapata combinada, bien dos pilares cualesquiera de una zapata corrida.
- v: Es la luz de cualquier voladizo en la dirección longitudinal.
- E<sub>c</sub>: Es el módulo de deformación del material de la zapata, (usualmente hormigón armado) representativo del tipo de carga y su duración.
- I<sub>c</sub>: Es el momento de inercia de la sección de la zapata perpendicular a la dirección del vuelo considerado respecto a la horizontal que pasa por su centro de gravedad.
- B: Es el ancho de la zapata (dirección transversal).
- k<sub>sB</sub>: Es el módulo de balasto de cálculo, representativo de las dimensiones del cimiento.



**Figura 3.39. Modelo 5. Criterios de Rigidez. EHE [1].**

Según se indica en CTE DB-C [2], se considerará que estos elementos son rígidos y que la distribución de presiones en el suelo es lineal, cuando se cumplan simultáneamente las condiciones de rigidez descritas anteriormente, así como las limitaciones

incluidas en la interacción terreno-estructura. En este estudio no se incluirán comprobaciones de interacción terreno-estructura que se supondrá se cumplen en todo caso.

Para la obtención de las tensiones transmitidas al terreno, se procederá al análisis como viga biapoyada en los dos soportes, planteando el equilibrio de esfuerzos. El primer paso consistirá en la traslación de los esfuerzos al centro de gravedad de la sección para proceder al cálculo de las tensiones transmitidas al terreno, de la misma forma ya descrita en el apartado correspondiente al caso de zapatas aisladas. Para el análisis se utilizarán los esfuerzos obtenidos de la combinación para ELS definidos en 3.3.4.

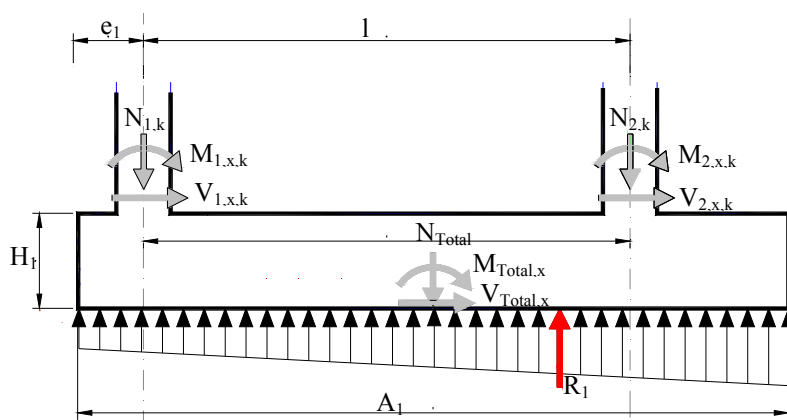


Figura 3.40. Modelo 5. Modelo de cálculo lineal.

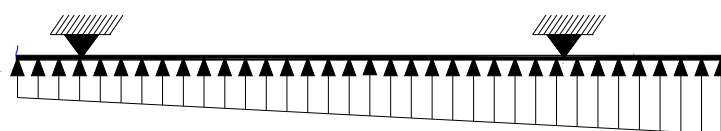


Figura 3.41. Modelo 5. Modelo de cálculo lineal II.

Dado que la zapata se configura con ancho constante, el centro de gravedad de la sección se sitúa en el centro geométrico de la misma, donde imponiendo el equilibrio se obtiene.

$$\begin{cases} N_{1,k} + N_{2,k} + N_{pp} = N_{total} \\ M_{total,x} = M_{1,x} + V_{1,x} \cdot H_1 + M_{2,x} + V_{2,x} \cdot H_1 - N_{1,k} \cdot (0,5 \cdot A_1 - e) + N_2 \cdot (l + e - 0,5 \cdot A_1) \end{cases}$$

Una vez reducido el sistema al conjunto de esfuerzos ( $N_{Total}$ ,  $M_{Total}$ ) aplicado en la base de la zapata, el problema se resuelve del mismo modo ya explicado para zapatas aisladas en el punto 3.6.2.4., donde dependiendo de la zona de cimiento que transmite presiones al terreno se tendrán los siguientes casos:

- Toda la zapata transmite presión al terreno:

$$\sigma_{med} = \frac{N_{total}}{A_1 \cdot B_1} \leq \sigma_{admisible}$$

$$\sigma_{max} = \frac{N_{total}}{A_1 \cdot B_1} \pm \frac{6 \cdot M_{Total,x}}{A_1^2 \cdot B_1} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisible}$$

- Parte de la zapata no trasmite presión al terreno.

$$x = 3 \cdot \left( \frac{A}{2} - e_x \right)$$

$$\sigma_{media} = \frac{N_{Total}}{3 \cdot \left( \frac{A}{2} - e_x \right) \cdot A} \leq \sigma_{admisible}$$

$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot N_{Total}}{3 \cdot \left( \frac{A}{2} - e_x \right) \cdot B} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisible}$$

#### B.- Modelo II. Método elástico Simplificado.

Al igual que se indicó para las zapatas aisladas, con este modelo se permitirán comportamientos flexible del cimiento. Para la modelización del comportamiento del suelo, se supondrá una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes.

El modelo está basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimiento al suelo y el asiento en este mismo punto. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga pero sin estar coaccionado por otros a través del cimiento.

Se modelizará el suelo mediante la teoría del coeficiente de balasto de winkler, suponiendo que la presión que ejerce el terreno sobre el elemento es directamente proporcional al asiento a través de la constante de proporcionalidad , “Coeficiente de balasto K”, mediante la expresión.

$$y = \sigma / K$$

Donde K es el Módulo de Balasto del terreno

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + K \cdot b \cdot y - q \cdot b = 0$$

Se trata de una ecuación diferencial lineal homogénea de cuarto orden. La solución real de dicha ecuación es:

$$w(x) = C_1 \cdot \cosh\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{L_e}\right) + C_2 \cdot \cosh\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \operatorname{seno}\left(\frac{x}{L_e}\right) +$$

$$C_3 \cdot \operatorname{senoh}\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{L_e}\right) + C_4 \cdot \operatorname{senoh}\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \operatorname{seno}\left(\frac{x}{L_e}\right)$$

Donde:

$L_e$ : Es la longitud elástica, definida como:

$$L_e = \left(\frac{4 \cdot E \cdot I}{B \cdot K}\right)^{1/4}$$

La integración de la ecuación de diferencias, dará como resultado la ecuación de la deformada.  $y=f(x)$ . A partir de ella se obtendrá la ley de presiones sobre el terreno:

$$\sigma = K \cdot f(x)$$

Y a partir de ella, la ley de momentos actuantes:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$M(x) = -E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh\left[\frac{x}{L_e}\right] \cdot \left( D \cdot \cos\left[\frac{x}{L_e}\right] - C \cdot \operatorname{seno}\left[\frac{x}{L_e}\right] \right) + \left( B \cdot \cos\left[\frac{x}{L_e}\right] - A \cdot \operatorname{seno}\left[\frac{x}{L_e}\right] \right) \cdot \operatorname{senoh}\left[\frac{x}{L_e}\right] \right)}{L_e^2} \right)$$

Así como la ley de cortantes actuantes:

$$Q(x) = E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dx^3}$$



$$Q(x) = E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh \left[ \frac{x}{L_e} \right] \cdot \left( (B-C) \cdot \cos \left[ \frac{x}{L_e} \right] - (A+D) \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{L_e} \right] \right) - \left( (A-D) \cdot \cos \left[ \frac{x}{L_e} \right] + (B+C) \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{L_e} \right] \right) \cdot \operatorname{senoh} \left[ \frac{x}{L_e} \right]}{L_e^3} \right)$$

Operativamente se plantean dos modelos de barras independientes, uno para la dirección x y otro para la dirección y. El modelo en dirección x, se compondrá de 4 vigas apoyadas en el terreno, tal y como muestra la siguiente figura.

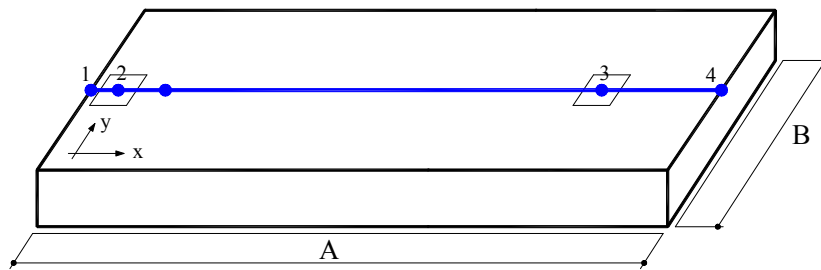


Figura 3.42. Zapata Combinada de ancho constante. Modelo Elástico Lineal.

Las cargas actuantes se dispondrán en los nudos 2 y 3 según esquemas inferiores. Los resultados alcanzados se han comparado con los obtenidos en modelos en 2d, realizados con el software SAP 2000 v 17.1.1, utilizando elementos finitos tipo placa, obteniéndose en todos los casos resultados similares.

Dirección x:

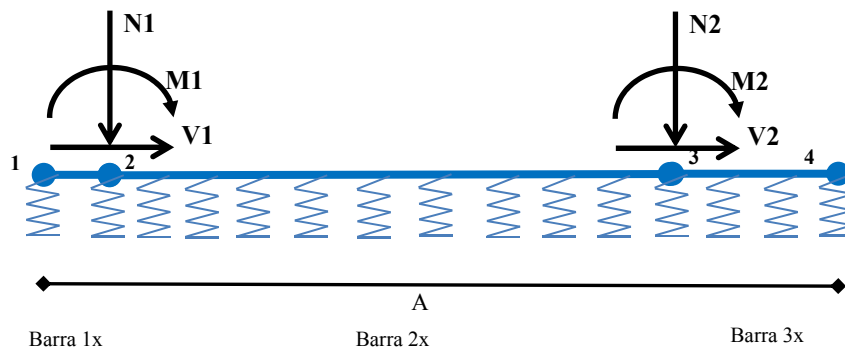


Figura 3.43. Zapata Combinada de ancho constante. Modelo de barras.

Las hipótesis de partida del modelo serán las mismas ya descritas en el modelo elástico utilizado para las zapatas aisladas.

Para la resolución del modelo se recurrirá al método matricial de estructuras, de la misma forma que se indicó para el modelo de zapatas aisladas.

En este caso la matriz de rigidez global será:

Dirección x:

$$\begin{bmatrix} K_{I,I}^{1x} & K_{I,II}^{1x} & 0 & 0 & 0 \\ K_{II,I}^{1x} & K_{II,II}^{1x} + K_{I,I}^{2x} & K_{I,II}^{2x} & 0 & 0 \\ 0 & K_{II,I}^{2x} & K_{II,II}^2 + K_{I,I}^{3x} & K_{I,II}^{3x} & 0 \\ 0 & 0 & K_{II,I}^{3x} & K_{II,II}^{3x} + K_{I,I}^{4x} & K_{I,II}^{4x} \\ 0 & 0 & 0 & K_{II,I}^{4x} & K_{II,II}^{4x} \end{bmatrix}$$

Al igual que se indicó para el modelo de zapatas aisladas, con la resolución del sistema de ecuaciones planteados, se obtendrán los giros y desplazamientos de cada uno de los nudos del sistema, y a partir de estos valores, se podrán completar las leyes de deformaciones y esfuerzos a lo largo de cada una de las barras.

Con los valores de asiento obtenidos, se calcularán las tensiones transmitidas al terreno a lo largo del cimiento:

$$\sigma = y \cdot K$$

Y con ella se verificarán las condiciones del ELS:

- Condición 1:  $\sigma_{media} \leq \sigma_{admisible}$
- Condición 2:  $\sigma_{maxima} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisible}$

#### 3.6.4.4 Aptitud al Servicio. E.L.S. de Fisuración.

Para la comprobación de este estado límite, se seguirán las indicaciones ya descritas para el caso de zapatas aisladas.

#### 3.6.4.5 Seguridad Estructural: E.L.U. de Estabilidad al Vuelco.

El cálculo se realizará tal y como se describió para el modelo de zapata aislada, con la única salvedad de que en el análisis de momentos se tendrán en cuenta los esfuerzos actuantes en ambos soportes.

#### 3.6.4.6 Seguridad Estructural: E.L.U. de Estabilidad al Deslizamiento

El cálculo se realizará tal y como se describió para el modelo de zapata aislada, con la única salvedad de que en el análisis se tendrán en cuenta los esfuerzos verticales y horizontales actuantes en ambos soportes.

3.6.4.7 Seguridad Estructural: E.L.U. de Flexión.

La verificación de esta restricción se iniciará con la determinación inicial de los esfuerzos de flexión actuantes, que será dependiente del modelo de transmisión de tensiones al terreno adoptado.

Modelo I: Cimiento Rígido.

Como ya se comentó anteriormente, se supondrá para este modelo un comportamiento rígido de las cimentaciones, imponiéndose la condición de una distribución de tensiones lineal y constante bajo el cimiento.

Los esfuerzos se obtendrán del modelo de viga rígida biapoyada en los soportes y con vuelos en los extremos y sometida a una distribución lineal de tensiones.

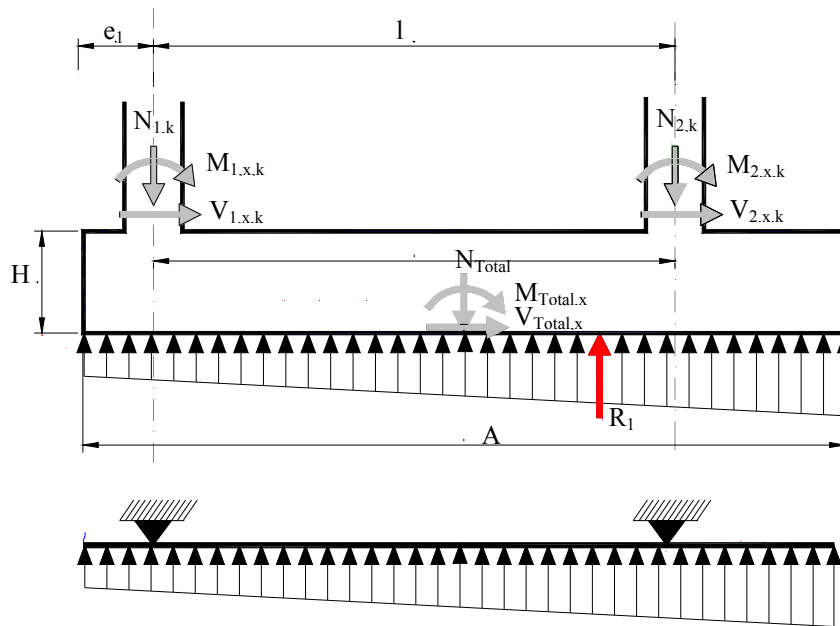


Figura 3.44. Modelo 5. Modelo de cimiento rígido. Tensiones en el terreno

Armado Longitudinal. Dirección x, perpendicular a la medianera:

Aplicando las leyes de equilibrio se obtendrán los valores de tensión sobre el terreno y en función de estas se obtendrán los valores de flexión en cada punto del cimiento. El diagrama de momentos flectores actuantes, será similar al representado en las siguientes figuras, dependiendo de si existen o no tracciones en la cara superior del cimiento.

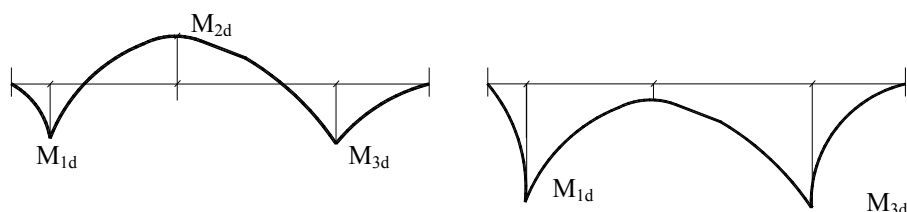


Figura 3.45. Modelo 5. Modelo de cimiento rígido. Esfuerzos de flexión.

El criterio de armado será:

CASO I: Sin tracciones en la cara superior. En este caso solo se dispondrá armadura inferior y se colocará como armadura base la correspondiente al mayor momento entre  $M_{1d}$  y  $M_{3d}$ , verificando el cumplimiento de las cuantías mínimas geométricas impuestas por la instrucción EHE-08.

$$M_{\max} = \text{MAX}(M_{1d}, M_{3d})$$

$$\mu = \frac{M_{\max}}{B \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \leq 0.252$$

$$\omega = \mu \cdot (1 + \mu)$$

$$A_{s, \text{mec}} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$As = \max(A_{s, \text{mec}}, A_{s, \text{geo}})$$

La armadura resultante se dispondrá de lado a lado de la zapata respetando las reglas de anclaje definidas en 3.6.2.11.

CASO II. Con tracciones en la cara superior. En este caso será necesaria armadura tanto inferior como superior. La disposición de la armadura se realizará de la siguiente forma:

Primero se armará inferiormente la sección para cubrir un momento máximo entre  $M_{1d}$  y  $M_{3d}$ , verificando que se cubre al menos la cuantía mínima geométrica impuesta por la instrucción EHE-08 [1].

Seguidamente se armará superiormente la sección para cubrir un momento máximo  $M_{2d}$ .

La armadura resultante se dispondrá de lado a lado de la zapata respetando las reglas de anclaje definidas en 3.6.2.11.

### Armado Transversal

El modelo de armado transversal de la sección seguirá los criterios descritos por Calavera [3]. Se considerará un comportamiento rígido a través de unos voladizos virtuales en cada soporte, con un ancho igual al del soporte más dos cantos útiles. Se considerará que toda la carga transmitida por los soportes es resistida por esta sección.

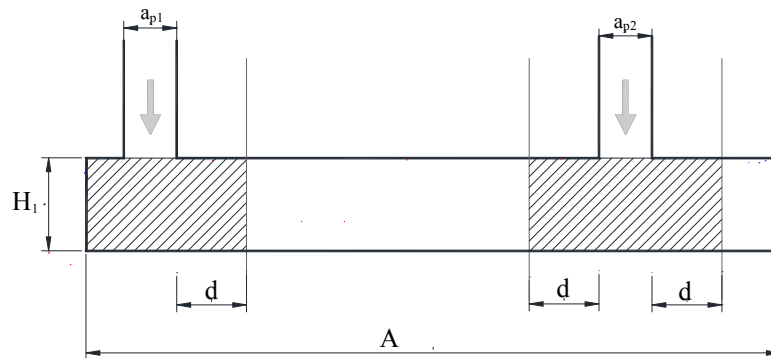


Figura 3.46. Modelo 5. Cálculo armadura transversal.

La tensión bajo cada zapata ficticia será:

$$\sigma_{t1} = \frac{N_1}{(a_{1p} + 2 \cdot H_1) \cdot B_1} \quad \sigma_{t2} = \frac{N_2}{(a_{2p} + 2 \cdot H_1) \cdot B_1}$$

El comportamiento trasversal de la zapata se modelizará como una viga rígida en ménsula sometida a la tensión calculada anteriormente, procediéndose a su armado para resistir el momento actuante en la sección transversal de referencia S1, definida en EHE [1], ya descrita para el caso de zapatas aisladas en su comprobación a flexión. El proceso de dimensionado será:

- Para la disposición de armado, primero se armará transversalmente la viga para cubrir la cuantía mínima impuesta por EHE-08 [1].
- Posteriormente se comprobará si la cuantía mínima inferior dispuesta cubre los momentos calculados en las secciones de referencia S1 de las dos zapatas virtuales transversales. De no ser así se dispondrán los refuerzos correspondientes en cada zona.

### Modelo II: Método elástico simplificado.

El procedimiento de armado será el mismo ya comentado para el modelo rígido, siendo la única diferencia el modelo de cálculo que se utilizará para la obtención de los esfuerzos de diseño.

En dirección  $x$  se planteará el mismo sistema de vigas apoyadas sobre el terreno descrito en el apartado 3.6.4.3., considerando la actuación de las cargas mayoradas.

En dirección 'y', se seguirá el mismo procedimiento ya descrito para el modelo rígido.

### 3.6.4.8 Seguridad Estructural: E.L.U. de Cortante.

Para la comprobación del ELU de Cortante se seguirán las indicaciones de EHE-08 [1].

#### Comprobación sentido longitudinal:

Para la comprobación en el sentido longitudinal, se determinarán los esfuerzos de cortante actuantes en las secciones de comprobación establecidas por EHE-08 [1], que se sitúan a un canto útil de cada cara de soporte. La determinación de estos esfuerzos vendrá condicionada por la distribución de tensiones existentes, calculándose por tanto los esfuerzos de corte bien a través del modelo de cimiento rígido, para el caso de distribución lineal de tensiones, bien mediante el modelo elástico simplificado. En cualquier caso la ley de cortantes actuantes adoptará una forma similar a la reflejada en la siguiente figura:

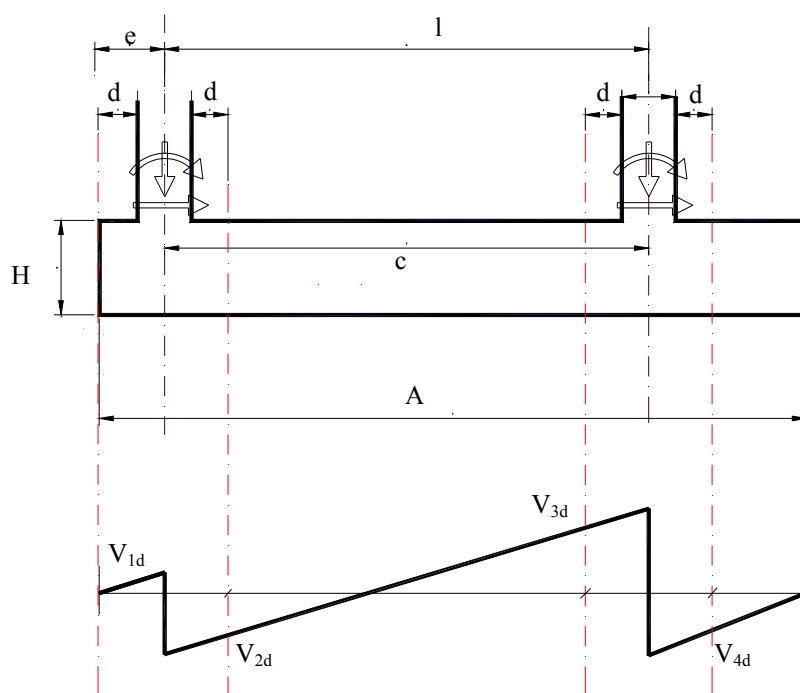


Figura 3.47. Modelo 5. E.L.U. Cortante.

Según lo indicado en la instrucción EHE-08 [1], art 44.2.3 las verificaciones a realizar para cada una de las secciones de referencia serán:

A.- Agotamiento por compresión oblicua del alma

$$V_d \leq V_{u1}$$

Siendo:

$$V_{u1} = k f_{1cd} b_0 d \frac{\cot g \theta + \cot g \alpha}{1 + \cot g^2 \theta}$$

k, coeficiente de reducción por esfuerzo axial, que en este caso presenta un valor 1 al no existir pretensados o esfuerzos de compresión.

$f_{1cd}$ , resistencia a la compresión del hormigón,  $f_{1cd} = 0.6 f_{cd}$

$b_0$ , anchura mínima neta del elemento

$\theta$  Ángulo de las bielas de compresión con el eje de la pieza. En nuestro caso  $\theta = 45^\circ$

$\alpha$  : Ángulo de las armaduras con el eje de la pieza, en nuestro caso  $\alpha = 90^\circ$ , en cercos verticales  $\cot g \alpha = 0$

$$\frac{\cot g \theta + \cot g \alpha}{1 + \cot g^2 \theta} = \frac{1}{1+1} = \frac{1}{2}$$

En el caso habitual de que las armaduras formen un ángulo  $\alpha = 90^\circ$  y se adopte como ángulo de las bielas de compresión  $\theta = 45^\circ$ , la expresión del esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma queda:

$$V_{u1} = 0,3 \cdot f_{cd} \cdot b_0 \cdot d$$

B.- Agotamiento por tracciones en el alma.

$$V_d \leq V_{u2}$$

Inicialmente se comprobará la sección en ausencia de armadura transversal para lo que se distinguirán dos casos

Piezas sin armadura de cortante en regiones no fisuradas ( $M_d \leq M_{fis}$ )

$$V_{u2} = \frac{I \cdot b_0}{S} \sqrt{(f_{ct,d})^2 + \alpha_1 \cdot \alpha'_{cd} \cdot f_{ct,d}}$$

Eliminando el término relativo a armaduras pretensadas

$$V_{u2} = \frac{I \cdot b_0}{S} (f_{ct,d})^2$$

Donde:

I: Momento de inercia de la sección transversal.

S: Momento estático de la sección transversal.

B<sub>0</sub>: Ancho del alma

F<sub>cd,t</sub>: Resistencia de cálculo a tracción del hormigón

Piezas sin armadura de cortante en regiones fisuradas (M<sub>d</sub> > M<sub>fis</sub>).

$$V_{cu} = \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{cv} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd})^{1/3} \cdot b_0 \cdot d$$

$$\geq \left[ \frac{0.075}{\gamma_c} \cdot \xi^{3/2} \cdot f_{cv}^{1/2} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd} \right] \cdot b_0 \cdot d$$

donde:

d, Canto útil

f<sub>cv</sub>: Resistencia efectiva del hormigón a cortante en N/mm<sup>2</sup> de valor f<sub>ck</sub>, con f<sub>cv</sub> no mayor que 15 N/mm<sup>2</sup> en el caso de control indirecto de la resistencia del hormigón, siendo f<sub>ck</sub> la resistencia a compresión del hormigón, que a efectos de este apartado no se considerará superior a 60 N/mm<sup>2</sup>.

ρ<sub>i</sub>, Cuantía geométrica de armadura longitudinal principal de tracción anclada a una distancia igual o mayor que d (canto útil), a partir de la sección de estudio. No será inferior a 0,02.

ξ:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ con } d \text{ en mm}$$

En caso de no cumplirse las condiciones anteriores, se calculará el armado de refuerzo a cortante a disponer de la siguiente forma:

Inicialmente se calculará de nuevo el valor V<sub>cu</sub> para piezas con armadura de cortante:

$$V_{cu} = \frac{0.15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{cv} + 0.15 \cdot \sigma'_{cd})^{1/3} \cdot \beta \cdot b_0 \cdot d$$



Donde en el caso de piezas de hormigón armado sometidas a flexión simple o compuesta con armadura transversal dispuesta con  $\alpha=90^\circ$ , depreciando el efecto favorable de las compresiones y para  $\theta = \theta_e = 45^\circ$ , la contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante será;

$$V_{cu} = \frac{0.15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_0 \cdot d$$

La contribución necesaria de la armadura de refuerzo a cortante será:

$$V_{su} = V_{u2} - V_{cu} = A_{90} \cdot f_{y,90,d} \cdot 0.9 \cdot d = V_{u2} - \frac{0.15}{\gamma_c} \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_0 \cdot d$$

Las condiciones de cuantías mínimas y separaciones entre barras serán las mismas ya descritas en el apartado 3.6.3.7 para la viga riostra del Modelo 2.

La disposición de armado se realizará en cada una de las secciones de referencia de comprobación donde se determine su necesidad, extendiendo su disposición una distancia de medio canto útil más allá del punto donde teóricamente deja de ser necesaria.

#### Comprobación sentido transversal:

Para la comprobación en sentido transversal de la sección, se han adoptado de los criterios establecidos en **Calavera [3]**. Se considerará un comportamiento rígido a través de unos voladizos virtuales en cada soporte, con un ancho igual al del soporte más dos cantos útiles, del mismo modo ya descrito en el apartado de ELU flexión. Se considerará que toda la carga transmitida por los soportes es resistida por esta sección.

Una vez determinadas las dimensiones de estas zapatas ficticias, la comprobación a cortante se realizará de la misma forma ya descrita para zapatas aisladas, considerando una distribución de tensiones lineal, y determinándose el esfuerzo cortante de diseño en la sección de referencia situada a un canto útil de la cara del soporte.

#### *3.6.4.9 Seguridad Estructural. E.L.U. de Punzonamiento.*

La comprobación del cimiento a ELU de Punzonamiento se realizará independientemente para cada soporte, conforme lo descrito en la instrucción EHE [1].

En el caso de que la proximidad entre los soportes implique un solape entre los perímetros críticos definidos en EHE-08[1] para la comprobación a punzonamiento, la comprobación de los soportes se hará conjunta disponiendo un perímetro crítico que será la combinación de ambos.

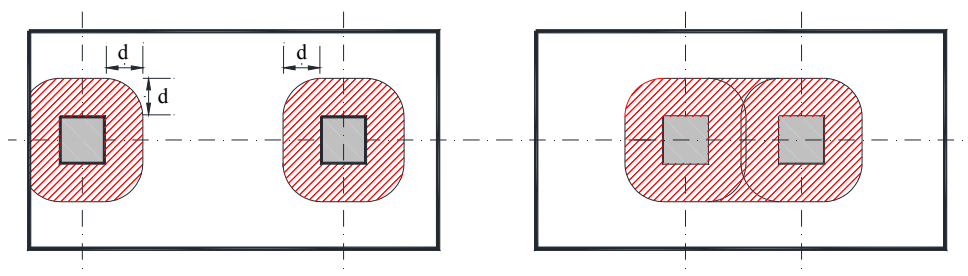


Figura 3.48. Modelo 5. E.L.U. Punzonamiento. Perímetro crítico.

### 3.6.4.10 Seguridad Estructural: E.L.U. de Anclaje.

La comprobación de anclaje de las armaduras seguirá el siguiente proceso:

#### Armadura longitudinal inferior :

Se determinarán las longitudes de anclaje de la armadura inferior longitudinal en función de la condición más desfavorable entre las siguientes:

- A. Cálculo del anclaje a partir del eje 1, donde se sitúa el momento actuante  $M_{1d}$ .
- B. Cálculo del anclaje a partir del extremo de la zapata.

Las mismas condiciones se verificarán para el anclaje de la armadura a la derecha del soporte 2.

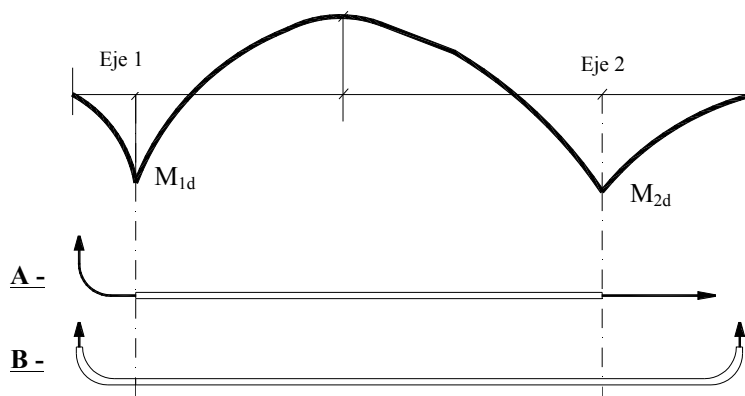


Figura 3.49. Modelo 5. E.L.U. Anclaje de armaduras.

A.- Anclaje a partir del eje 1, donde se sitúa el  $M_{1d}$ .

Las condiciones generales para el anclaje y empalme de armaduras se describen en el artículo 69.5 de La norma EHE-08 [1]. De acuerdo a la instrucción, la armadura inferior presenta una Posición I, por lo que la longitud básica de anclaje vendrá determinada por:

$$\text{Posición I: } l_{bl} = m \cdot \phi^2 \geq \frac{f_{yk}}{20} \cdot \phi$$

El valor del coeficiente ‘m’, depende del tipo de acero y hormigón utilizado y se describe en la siguiente tabla:

**Tabla 3.38. Modelo 5. Anclaje armadura. Parámetro “m”. EHE [1]**

Resistencia característica del hormigón (N/mm <sup>2</sup> )	m	
	B-400S	B-500S
25	1,2	1,5
30	1,0	1,3
35	0,9	1,2
40	0,8	1,1
45	0,7	1,0
50	0,7	1,0

Finalmente la longitud neta de anclaje se define como:

$$l_{b,neto} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s,real}}$$

Donde  $\beta$  es el factor de reducción definido en la siguiente tabla.

**Tabla 3.39. Modelo 5. Anclaje armaduras. Factor  $\beta$ . EHE [1].**

Tipo de anclaje	Tracción	Compresión
Prolongación recta	-1	1
Patilla, gancho y gancho en U	0.7 (*)	1
Barra transversal soldada	0.7	0.7

(\*) Si el recubrimiento de hormigón perpendicular al plano de doblado es superior a 3 diámetros. En caso contrario el valor sería 1.

Inicialmente se comprobará una disposición en prolongación recta,  $\beta=1$ , solo en el caso de verificar que no hay suficiente longitud para su disposición, se volverán a realizar las comprobación con la disposición de patillas,  $\beta=0.7$ .

Caso de necesitar la disposición de patillas, la longitud de la misma no será inferior a 5 veces el diámetro de la barra tal y como se recoge en el art 69.5.1.1 de EHE-08 [1]. Por último habrá de verificar los valores mínimos siguientes.

$$l_{b,neto} > \left\{ \begin{array}{l} 10 \cdot \phi \\ 15cm \\ \frac{lb}{3} \end{array} \right\}$$

B.- Anclaje a partir del extremo de la zapata.

En este caso el anclaje se comprueba desde el borde de zapata, por lo que siempre será necesario disponer patillas.

Al no existir momento actuante en el borde del cimiento:

$$\frac{A_s}{A_{s,real}} = 0 \longrightarrow l_{b,neto} = 0$$

Por lo que la longitud básica de anclaje, que será la longitud de la patilla, será el valor máximo de:

$$l_{b,neto} = MAX \left( \begin{array}{l} 10 \cdot \phi \\ 15cm \\ \frac{lb}{3} \end{array} \right)$$

Se deberá verificar, además, que la longitud de la patilla no es inferior a 5 veces el diámetro de la barra.

La condición más desfavorable en A y B, determinará las longitudes de anclaje.

Armadura longitudinal superior:

En el caso de existir armado superior longitudinal, se determinará su longitud de anclaje a desarrollarse a partir del punto de momento nulo, tal y como se refleja en la siguiente gráfica.

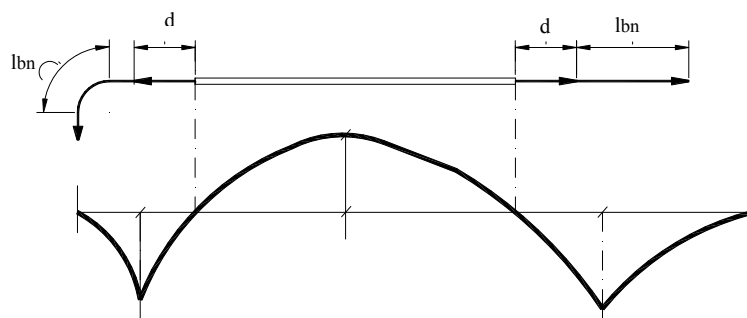


Figura 3.50. Modelo 5. E.L.U. Anclaje de armaduras extremas.

Además, se verificarán las condiciones impuestas para la armadura longitudinal en el art 44.2.3.4.2 de EHE-08 [1]:

Las armaduras longitudinales de flexión deberán ser capaces de soportar un incremento de tracción respecto a la producida por  $M_d$ , igual a:

$$\Delta T = V_{rd} \cdot \cot g\theta - \frac{V_{su}}{2} \cdot (\cot g\theta + \cot g\alpha)$$

Esta prescripción se cumple de forma automática decalando la ley de momentos de cálculo  $M_d$ , una magnitud igual a:

$$S_d = z \cdot \left( \cot g\theta - \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{su}}{V_{ref}} \cdot (\cot g\theta + \cot g\alpha) \right)$$

En el sentido más desfavorable.

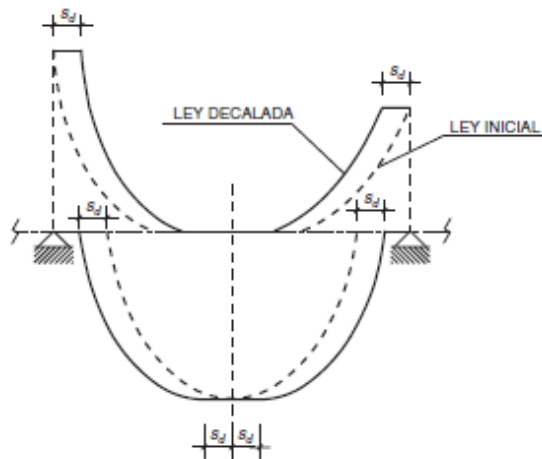


Figura 3.51. Modelo 5. E.L.U. Anclaje. Ley de decalaje. EHE [1].

Para el caso en estudio, donde  $\theta=45^\circ$ , bastará con decalar la ley el valor de un canto útil. Así pues, el proceso de anclaje de las armaduras superiores longitudinales seguirá los siguientes pasos:

- Disponer el armado superior hasta los puntos de momento nulo, más un canto útil a cada lado.
- Determinar el valor de la longitud básica de anclaje, (Posición II).

$$l_{bII} = 1.4 \cdot m \cdot \phi^2 \geq \frac{f_{yk}}{14} \cdot \phi$$

- Determinar el valor de la longitud neta de anclaje suponiendo prolongación recta,  $\beta=1.0$ .

$$l_{b,neto} = l_b \cdot \beta \cdot \frac{A_s}{A_{s,real}} > \text{MAX}(10 \cdot \phi, 15\text{cm}, \frac{lb}{3})$$

- Verificar que existe suficiente espacio en el cimiento para colocar la armadura, sino, considerar la disposición de anclaje con patilla,  $\beta=0.7$ , y recalcular la  $l_{b,neto}$ . Se deberá verificar además que la longitud de la patilla no es inferior a 5 veces el diámetro de la barra.
- Verificar que la dimensión de la patilla no sobrepasa el canto del cimiento.

#### Armadura transversal:

Las comprobaciones seguirán el mismo procedimiento descrito en el mismo apartado relativo a zapatas aisladas.

#### **3.6.5 Zapata Combinada Asimétrica. (Modelos 3 y 4)**

Esta solución surge como una variación de la configuración como zapata combinada de ancho constante, disponiendo de dos anchos distintos asignados a cada uno de los soportes. En función de cual sea el ancho mayor, se le designará como Modelo 3, para los casos en que el ancho correspondiente al soporte 1 sea mayor al correspondiente al soporte 2 y Modelo 4, al contrario.

La geometría de esta solución permite obtener soluciones al problema donde el centro de esfuerzos se sitúe en el centro de gravedad de la sección, consiguiendo distribuciones uniformes de tensiones en el terreno.

Al igual que en los casos anteriormente descritos, se supondrá también dos modelos distintos de comportamiento, un modelo de cimiento rígido, que supondrá un comportamiento rígido del elemento, transmitiendo una tensión lineal sobre el terreno y un modelo elástico simplificado.

El análisis general de la solución es igual al ya reflejado para el caso de zapata combinada de ancho constante, relatándose a continuación los puntos diferenciadores de este tipo de solución.

La geometría general de estos modelos se muestran en las siguientes figuras.

Modelo 3:

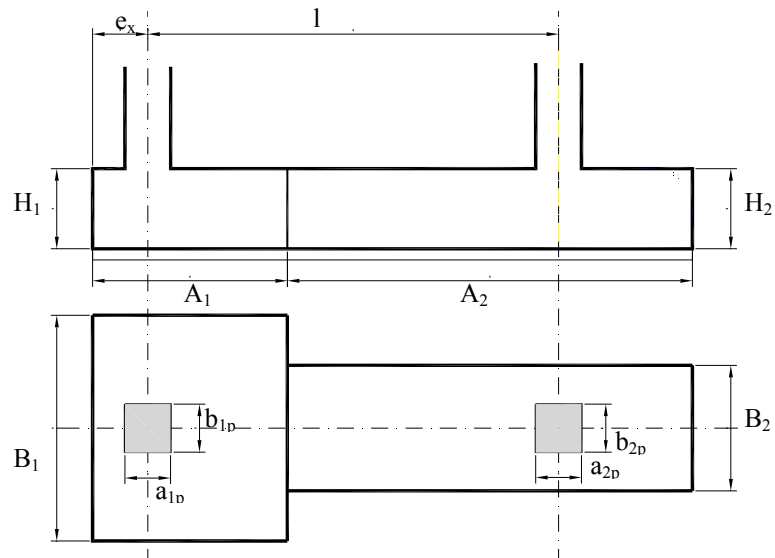


Figura 3.52. Modelo 3. Modelo geométrico.

Modelo 4:

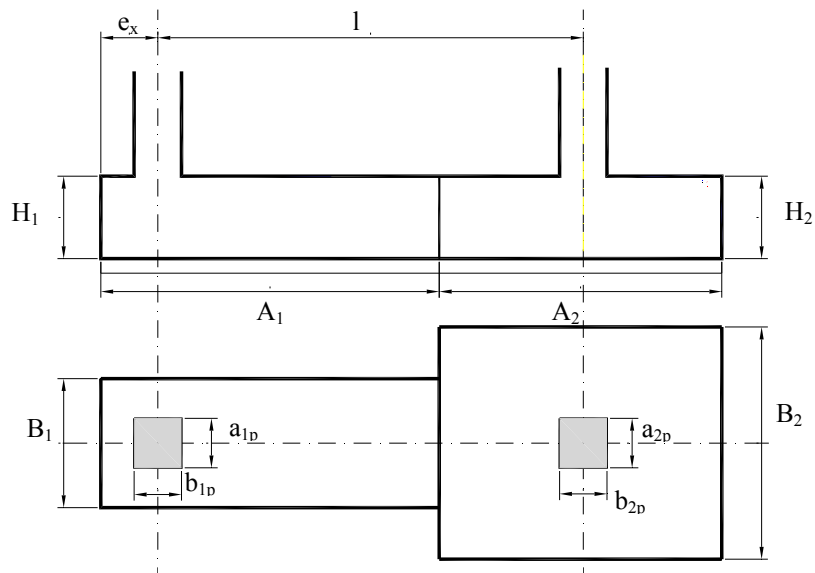


Figura 3.53. Modelo 4. Modelo geométrico.

3.6.5.1 Dominio de las variables de diseño.

Se incluye a continuación la descripción de las variables que configuran el modelo de cimiento de zapata combinada asimétrica, diferenciando entre variables geométricas, de materiales y de armado.

Variables de primer Orden: Variables Geométricas:

Se muestra en la siguiente tabla las variables geométricas que conforman este modelo de cimentación, así como sus valores máximos, mínimos y el rango de variación posible de los mismos.

**Tabla 3.40. Modelo 3/4. Variables geométricas**

MODELO 3 y 4: ZAPATA COMBIANDA DE ANCHO NO CONSTANTE				
Zona	Designación	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Incremento (mm)
Zona 1: Dimensión en dirección x	A <sub>1</sub>	5.000	1.000	100
Zona 1: Dimensión en dirección y	B <sub>1</sub>	5.000	400	100
Zona 1: Canto de la zapata	H <sub>1</sub>	2.000	250 (art 58.8 EHE)	50
Zona 2: Dimensión en dirección x	A <sub>2</sub>	5.000	1.000	100
Zona 2: Dimensión en dirección y	B <sub>2</sub>	5.000	400	100
Zona 2: Canto de la zapata	H <sub>2</sub>	2.000	250 (art 58.8 EHE)	50
Condiciones Generales de Geometría				
Condición de que la dimensión de la zapata 1 abarque al menos el soporte 1			$A_1 > e_1 + 0.5 a_{1p}$	
Condición de no solapamiento entre zapata 1 con soporte 2			$A_1 - e_1 - 0.5 a_{1p} < L - 0.5 a_{1p} - 0.5 a_{2p}$	
Condición de igualdad de cantos entre zapatas			$H_1 = H_2$	
Condición diferencia mínima entre anchos de tramos B <sub>1</sub> y B <sub>2</sub>			$B_1 - B_2 < 800$	

Tal y como se indica en la instrucción EHE-08[1] art 58.8, se impondrá un canto mínimo de 25 cm para cualquier modelo de zapata, aspecto que viene condicionado principalmente para lograr una suficiente longitud de anclaje para las armaduras longitudinales del soporte que lo acomete.

Variables de Primer Orden: Variables relativas a los Materiales:

Este tipo de variables definirán las características de los materiales de acero y hormigón a utilizar. La designación de los mismos, así como el rango de valores que es posible adoptar se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 3.41. Modelo 3/4. Variables de los materiales**

Variables de Materiales		
	Designación	Rango de Valores
Hormigones	$f_{ck}$	25 / 30 / 35 (N/mm <sup>2</sup> )
Aceros	$f_{yk}$	400 / 500 (N/mm <sup>2</sup> )



**VARIABLES DE PRIMER ORDEN: VARIABLES DE ARMADO:**

En relación a las variables de armado de primer orden definidas en 3.4.3, se incluye en la siguiente tabla sus valores discretos posibles, adoptados como los valores de diámetro existentes y utilizados habitualmente en la práctica. Como valor mínimo de diámetro, para los armados longitudinales, se adoptará el valor de 12 mm, establecido como recomendación en los comentarios del artículo 58.8.2 de EHE-08 [1].

**Tabla 3.42. Modelo 3/4. Variables de armado.**

MODELO 3 y 4: ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA		
	Designación	Valores (mm)
Diámetro Armado inferior en dirección 'x' Zona 1	D <sub>1,x,inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior en dirección 'y' Zona 1	D <sub>1,y,inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado superior en dirección 'x' Zona 1	D <sub>1,x,sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado superior en dirección 'y' Zona 1	D <sub>1,y,sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inf. de refuerzo en dirección 'y' bajo Zona 1	D <sub>1,y,inf,ref-1</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior en dirección 'x' Zona 2	D <sub>2,x,inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inferior en dirección 'y' Zona 2	D <sub>2,y,inf</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado superior en dirección 'x' Zona 2	D <sub>2,x,sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado superior en dirección 'y' Zona 2	D <sub>2,y,sup</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado inf. de refuerzo en dirección 'y' bajo soporte 2	D <sub>1,y,inf,ref-2</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado piel dirección 'x' zapata 1	D <sub>1,x,piel-1</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado piel dirección 'x' zapata 2	D <sub>1,x,piel-2</sub>	12,16,20,25
Diámetro Armado de cercos	D <sub>3,cercos</sub>	6,8,10,12

**VARIABLES DE SEGUNDO ORDEN: VARIABLES DE ARMADO:**

Se incluye en la siguiente tabla sus valores máximos y mínimos así como sus posibles incrementos.

**Tabla 3.43. Modelo 3/4. Variables de armado II.**

MODELO 3 y 4: ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA.				
	Designación	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Incremento
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'x' zona 1	n <sub>1,x,sup</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' zona 1	n <sub>1,x,inf</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'y' zona 1	n <sub>1,y,sup</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' zona 1	n <sub>1,y,inf</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado inferior de refuerzo bajo zona 1.	n <sub>1,y,inf,ref-1</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'x' zona 2	n <sub>2,x,sup</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'x' zona 2	n <sub>2,x,inf</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado superior en dirección 'y' zona 2	n <sub>2,y,sup</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado inferior en dirección 'y' zona 2	n <sub>2,y,inf</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado inferior de refuerzo bajo soporte 2.	n <sub>1,y,inf,ref-2</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos del Armado de piel	n <sub>piel</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de redondos de armado de cercos zona 1	n <sub>3,cercos</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de ramas por cerco zona 1	n <sub>3,ramascercos</sub>	8	2 (**)	1
Nº de redondos de armado de cercos zona 1	n <sub>3,cercos,2</sub>	(*)	2 (**)	1
Nº de ramas por cerco zona 2	n <sub>3,ramascercos,2</sub>	8	2 (**)	1

(\*) y (\*\*) Los valores relativos al máximo y mínimo número de redondos de armado vendrán condicionados además por los siguientes criterios.

### Cuantía Mecánica.

Tal y como se indica en el art.42.3.2 de EHE [1], la armadura resistente longitudinal traccionada deberá cumplir la relación:

$$A_s \geq 0,04 \cdot A_c \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

Para secciones de hormigón armado en flexión simple cuando la resistencia característica es menor a  $50 \text{ N/mm}^2$ , se admite disponer una armadura mínima  $\alpha A_s$ . El valor de  $\alpha$  para secciones rectangulares será:

$$\alpha = 1,5 - 12,5 \cdot \frac{A_s \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}}$$

Donde:

$A_s$ : Área de armadura pasiva

$A_c$ : Área de la sección total de hormigón.

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva en tracción

$f_{cd}$ : Resistencia de cálculo del hormigón en compresión

### Cuantías mínimas de Armado.

Las cuantías mínimas a disponer de armado serán las reflejadas por la instrucción EHE.08 en su artículo 42.3.5. Así:

**Tabla 3.44. Modelo 3/4. Cuantías de armado**

	Acero $f_y=400 \text{ N/mm}^2$	Acero $f_y=400 \text{ N/mm}^2$	Referencia
Armaduras Longitudinales			Art 42.3.5 EHE [1]
Losas (1)	2.0	1.8	
<b>Armaduras Transversales</b>			
Armadura de Cercos	$\sum \frac{A_{s,i} f_{y,i}}{s_i \sin \alpha} \geq \frac{f_{ct,m}}{7,5} \cdot B_s$ donde Para $f_{ck} < 50 \rightarrow f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$		Art 44.2.3.4 EHE[1]
Armadura de Cercos	Los cercos se prolongarán una distancia de medio canto útil más allá de la sección en la que dejan de ser necesarios.		Art 44.2.3.4 EHE [1]

- (1) Cuantía a disponer en la cara de tracción. Se recomienda disponer un 30% en la cara opuesta. Criterio que se adoptará

### Distancias mínimas/máximas entre barras de armado

En relación a las limitaciones relativa a la separación entre barras de armado se seguirá lo indicado en la instrucción EHE-08 [1]. Así:

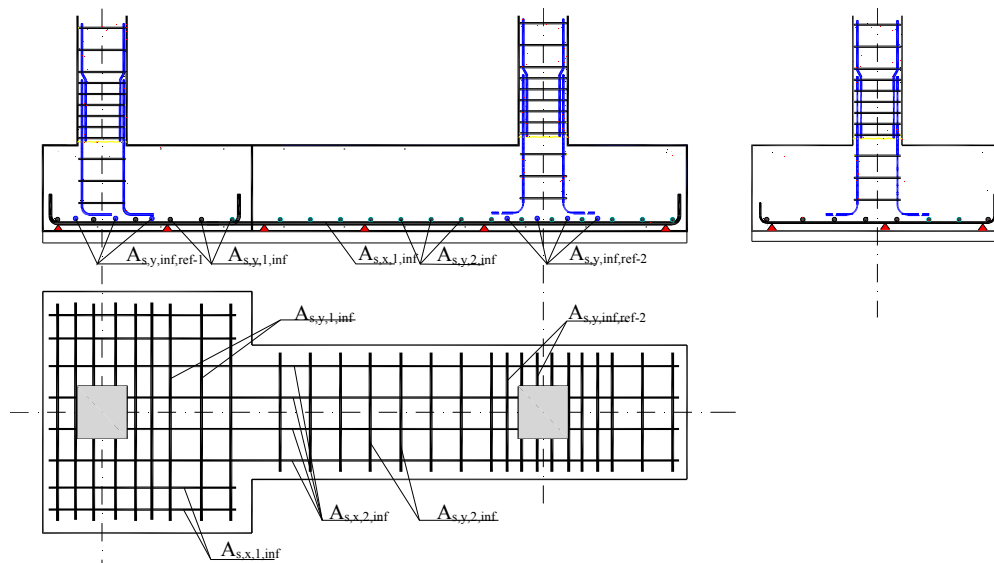
**Tabla 3.45. Modelo 3/4. Distancias Min/Max entre armaduras.**

Criterio	Distancias	Referencia
Separación máxima entre armaduras longitudinales de zapatas	30 cm	EHE.08 [1] art 58.8.2
Separación mínima entre armaduras	10 cm	Calavera [3]
Separación mínima entre cercos	$St \leq 0.75 d (1 + \cotg \alpha) < 600 \text{ mm}$ si $V_{rd} \leq 1/5 V_{ul}$ $St \leq 0.60 d (1 + \cotg \alpha) < 300 \text{ mm}$ si $1/5 V_{ul} < V_{rd} \leq 2/3 V_{ul}$ $St \leq 0.30 d (1 + \cotg \alpha) < 200 \text{ mm}$ si $V_{rd} > 2/3 V_{ul}$	EHE.08 [1] Art 44.2.3.4.1
Separación máxima transversal entre ramas de cercos	$S_{t,trans} \leq d \leq 500 \text{ mm}$	EHE.08 [1] Art 44.2.3.4.1

3.6.5.2 Patrones de armado.

Se muestra a continuación los patrones de armado adoptados para las soluciones correspondientes a los modelos de zapata combinada asimétrica. Al igual que ocurría con el modelo de zapata combinada de ancho constante, se distinguirán los casos donde se disponga o no armado superior.

Modelo 3: Modelo con y sin armadura superior.



**Figura 3.54. Modelo 3. Patrón de armado I. Sin armado sup.**

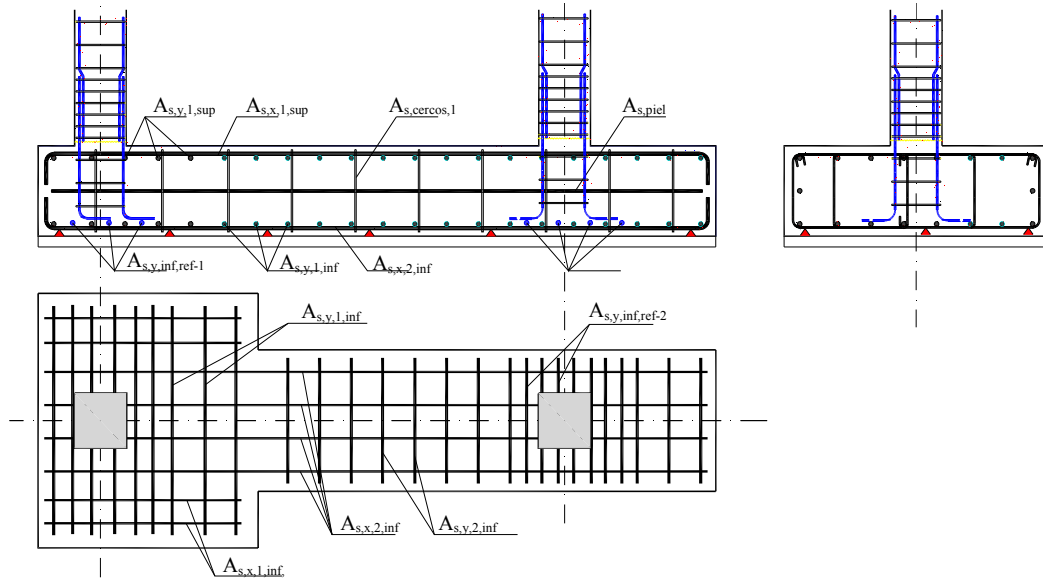


Figura 3.55. Modelo 4. Patrón de armado II. Con armado sup.

Modelo 3:

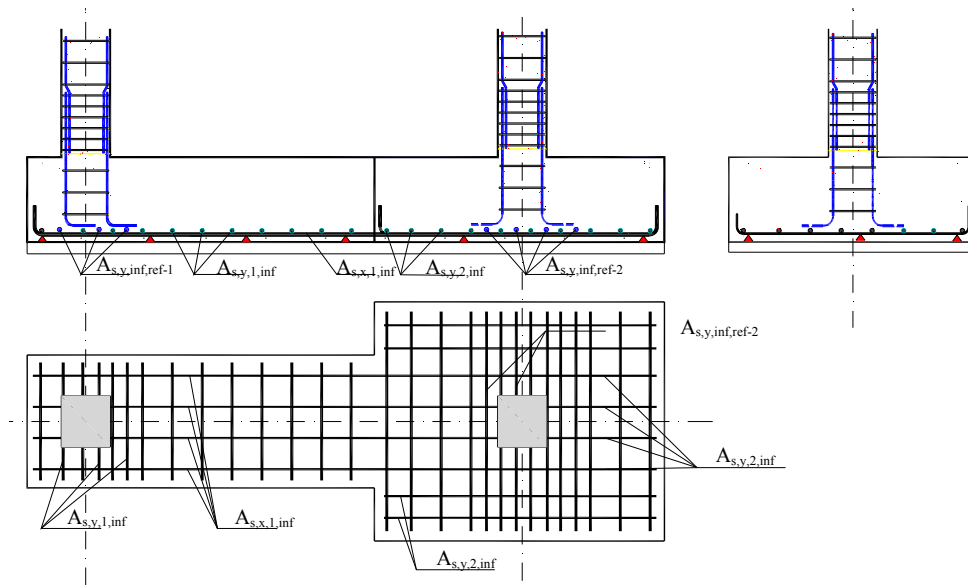


Figura 3.56. Modelo 4. Patrón de armado I. Sin armado sup.

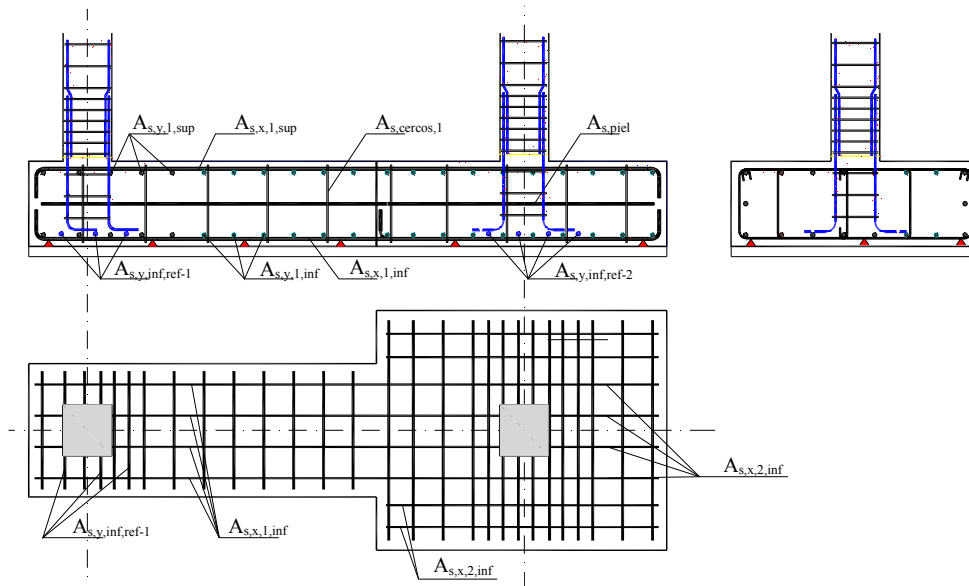


Figura 3.57. Modelo 4. Patrón de armado II. Con armado sup.

En la siguiente figura se muestran las tipologías de armado posibles para refuerzo a cortante.

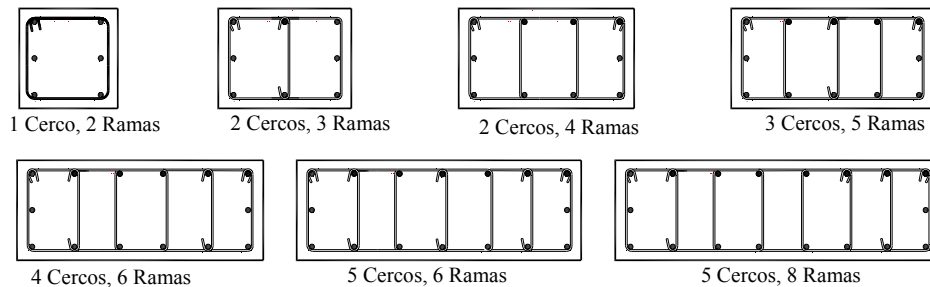


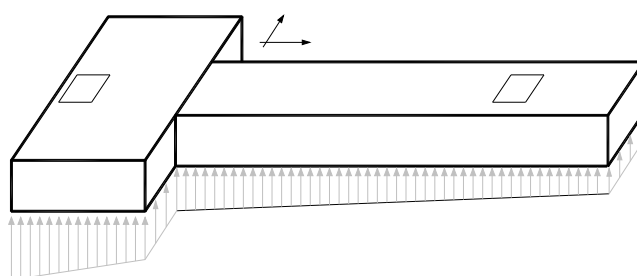
Figura 3.58. Modelos de armado a cortante de la sección del cimiento.

### 3.6.5.3 Aptitud al Servicio. E.L.S. de Tensiones en el Terreno.

Al igual que en los tipo de cimiento descritos anteriormente, se evaluarán dos modelos de comportamiento del terreno, un primer modelo de “cimiento rígido”, que presentará un comportamiento rígido para los cimientos, provocando una distribución lineal de tensiones sobre el terreno y un segundo modelo, que presentará un comportamiento elástico del terreno.

**Modelo I. Cimiento Rígido:**

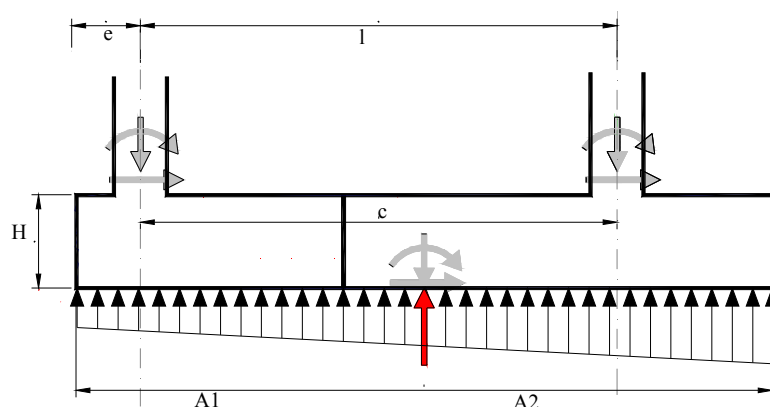
La comprobación de este estado límite seguirá los mismos pasos ya descritos en el caso de zapatas combinadas de ancho constante. Como única diferencia vendrá dada por la existencia de 2 anchos distintos según que sección se considere, lo que obliga inicialmente a calcular la posición del cdg, para trasladar los esfuerzos de los soportes a él y realizar entonces la evaluación de las tensiones transmitidas al terreno. La distribución de tensiones en el terreno se supondrá lineal y no se permitirá que existan zonas del cimiento que no transmitan tensiones al terreno.



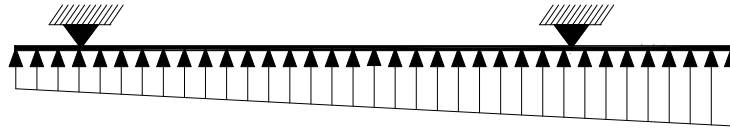
**Figura 3.59. Modelo 3/4. Tensiones en el terreno. Modelo rígido.**

Entre las condiciones impuestas al sistema, se encuentra que las tensiones transmitidas al terreno sean uniformes, para lo que se deberá verificar las mismas condiciones de rigidez ya descritas para el caso de zapatas combinadas de ancho constante.

Para el cálculo de las tensiones transmitidas al terreno, se analizará el sistema de viga biapoyada descrito a continuación, sometido a las combinaciones de cargas para Estado Límite de servicio descritas anteriormente.



**Figura 3.60. Modelo 3/4. Tensiones en el terreno.**



**Figura 3.61. Modelo 3/4. Tensiones en el terreno II.**

Se impondrán las condiciones de equilibrio al sistema, trasladando los esfuerzos al centro de gravedad de la sección.

La posición del Centro de Gravedad vendrá dado por:

$$\sum_{i=1}^n x_{cdg,i} \cdot A_i = x_{cdg} \cdot A_{Total}$$

Una vez obtenida la posición del centro de Gravedad, se obtendrá los esfuerzos equivalentes del sistema en esta posición y se calcularán las tensiones transmitidas al terreno, de la misma forma a lo expuesto para el caso de zapatas aisladas. Del mismo modo que en estas, se diferenciará entre casos donde toda la zapata transmite tensiones al terreno y casos donde hay zonas de zapata que no transmiten tensión al terreno.

Las verificaciones a realizar serán.

$$\sigma_{media} = \frac{N_{total}}{A_1 \cdot B_1} \leq \sigma_{admisible}$$

$$\sigma_{max} = \frac{N_{total}}{A_{Total}} + \frac{M_{Total,x}}{W_{cdg}} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisible}$$

#### Modelo II: Método elástico simplificado.

Al igual que se indicó para las zapatas aisladas, con este modelo se permitirán comportamientos flexible del cimient. Para la modelización del comportamiento del suelo, se supondrá una deformación del terreno proporcional a la presión transmitida por los soportes.

El modelo está basado en la hipótesis de la existencia de una relación lineal entre la presión transmitida en un punto del cimient al suelo y el asiento en este mismo punto. Cada soporte asienta de acuerdo con la deformación de la viga pero sin estar coaccionado por otros a través del cimient.

Se modelizará el suelo mediante la teoría del coeficiente de balasto de winkler, suponiendo que la presión que ejerce el terreno sobre el elemento es directamente proporcional al asiento a través de la constante de proporcionalidad, “Coeficiente de balasto K”, mediante la expresión.

$$y = \sigma / K$$

Donde K, es el Módulo de Balasto del terreno.

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{E \cdot I}$$

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} + K \cdot b \cdot y - q \cdot b = 0$$

Se trata de una ecuación diferencial lineal homogénea de cuarto orden. La solución real de dicha ecuación es:

$$w(x) = C_1 \cdot \cosh\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{L_e}\right) + C_2 \cdot \cosh\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \text{seno}\left(\frac{x}{L_e}\right) + \\ C_3 \cdot \text{senoh}\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \cos\left(\frac{x}{L_e}\right) + C_4 \cdot \text{senoh}\left(\frac{x}{L_e}\right) \cdot \text{seno}\left(\frac{x}{L_e}\right)$$

Donde:

$L_e$ : Es la longitud elástica, definida como:

$$L_e = \left(\frac{4 \cdot E \cdot I}{B \cdot K}\right)^{1/4}$$

La integración de la ecuación diferencias, dará como resultado la ecuación de la deformada.  $y=f(x)$ . A partir de ella se obtendrá la ley de presiones sobre el terreno:

$$\sigma = K \cdot f(x)$$

Y a partir de ella, la ley de momentos actuantes:

$$M = -E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dx^2}$$

$$M(x) = -E \cdot I \cdot \left( \frac{2 \cdot \left( \cosh\left[\frac{x}{L_e}\right] \cdot \left( D \cdot \cos\left[\frac{x}{L_e}\right] - C \cdot \text{seno}\left[\frac{x}{L_e}\right] \right) + \left( B \cdot \cos\left[\frac{x}{L_e}\right] - A \cdot \text{seno}\left[\frac{x}{L_e}\right] \right) \cdot \text{senoh}\left[\frac{x}{L_e}\right] \right)}{L_e^2} \right)$$

Así como la ley de cortantes actuantes:

$$Q(x) = E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dx^3}$$



$$Q(x) = E \cdot I \cdot \left[ \frac{2 \cdot \left( \cosh \left[ \frac{x}{L_e} \right] \cdot \left( (B - C) \cdot \cos \left[ \frac{x}{L_e} \right] - (A + D) \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{L_e} \right] \right) - \left( (A - D) \cdot \cos \left[ \frac{x}{L_e} \right] + (B + C) \cdot \operatorname{seno} \left[ \frac{x}{L_e} \right] \right) \cdot \operatorname{senoh} \left[ \frac{x}{L_e} \right]}{L_e^3} \right]$$

Para su resolución, se plantea en dirección x un modelo compuesto por 4 barras apoyadas sobre el terreno, conforme al siguiente esquema. Las cargas actuantes se dispondrán en los nudos 2 y 5 según esquemas inferiores. Los resultados alcanzados se han comparado con los obtenidos en modelos en 2d, realizados con el programa SAP 2000 [13], utilizando elementos finito tipo placa, obteniéndose en todos los casos resultados similares, tanto de esfuerzos como de deformaciones.

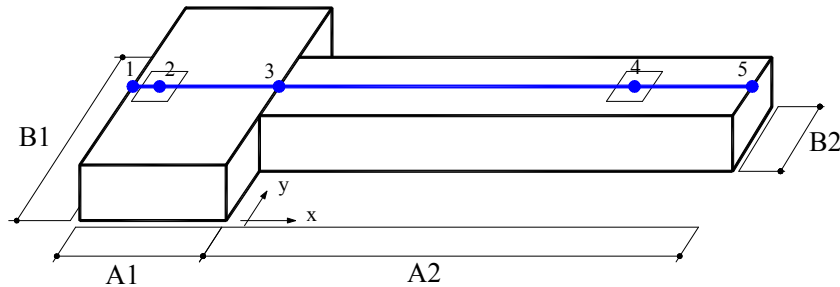


Figura 3.62. Zapata Asimétrica. Modelo Elástico Simplificado.

Modelo de barras, Dirección x:

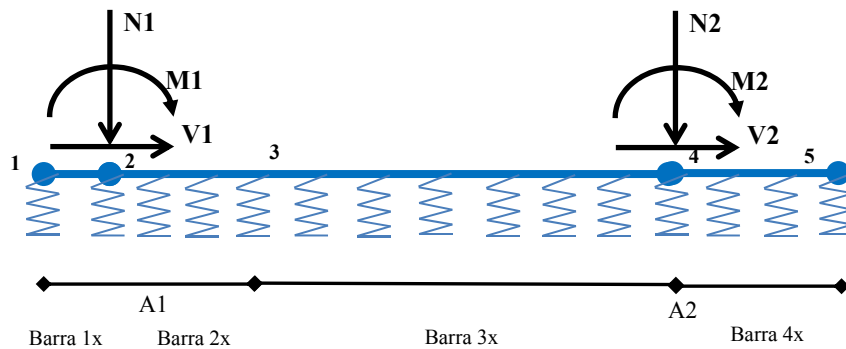


Figura 3.63. Zapata Asimétrica. Modelo de barra.

Las hipótesis de partida del modelo serán:

- Todos los materiales presentarán un comportamiento lineal.
- Se estará en el ámbito de pequeños desplazamientos.
- No se consideran efectos locales, como cambios bruscos de sección
- No se considera el efecto de cortante en la flexión.

- Las vigas son de sección constante.
- La presión en cada punto depende del asiento en el mismo, siendo independiente del resto de puntos.
- No existe interacción entre elementos de terreno contiguos, por lo que no se tiene en cuenta el efecto de cortante del terreno. Por ello se infravalora la resistencia del mismo, obteniéndose asientos superiores a los reales.
- El modelo no permite asientos positivos, es decir despegues de ningún punto en la cimentación.

Para la resolución del modelo, se recurrirá al método matricial de estructuras, de la misma forma que se indicó para el modelo de zapatas aisladas.

En este caso, la matriz de rigidez global del modelo será:

Dirección x:

$$\begin{bmatrix} K_{I,I}^{1x} & K_{I,II}^{1x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_{II,I}^{1x} & K_{II,II}^{1x} + K_{I,I}^{2x} & K_{I,II}^{2x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{II,I}^{2x} & K_{II,II}^{2x} + K_{I,I}^{3x} & K_{I,II}^{3x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{II,I}^{3x} & K_{II,II}^{3x} + K_{I,I}^{4x} & K_{I,II}^{4x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{II,I}^{4x} & K_{II,II}^{4x} + K_{I,I}^{5x} & K_{I,II}^{5x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{II,I}^{5x} & K_{II,II}^{5x} \end{bmatrix}$$

Al igual que se indicó para el modelo de zapatas aisladas, con la resolución del sistema de ecuaciones planteado, se obtendrán los giros y desplazamientos de cada uno de los nudos del sistema, y a partir de estos valores, se podrán completar las leyes de deformaciones y esfuerzos a lo largo de cada una de las barras.

Con los valores de asiento obtenidos, se calcularán las tensiones transmitidas al terreno a lo largo del cimiento:

$$\sigma = y \cdot K$$

Y con ella, se verificarán las condiciones impuestas en el ELS de tensiones en el terreno:

- Condición 1:  $\sigma_{media} \leq \sigma_{admisible}$
- Condición 2:  $\sigma_{maxima} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admisible}$

**3.6.5.4 Aptitud al Servicio. E.L.S. de Fisuración.**

Las verificaciones a realizar serán las mismas ya descritas en el caso de zapata combinada de ancho constante.

**3.6.5.5 Seguridad Estructural. E.L.U. Estabilidad al vuelco.**

El cálculo se realizará tal y como se describió para el modelo de zapata aislada con la única salvedad de que en el análisis de momentos se tendrán en cuenta los esfuerzos actuantes en ambos soportes.

**3.6.5.6 Seguridad Estructural. E.L.U. Estabilidad al deslizamiento.**

El cálculo se realizará tal y como se describió para el modelo de zapata aislada con la única salvedad de que en el análisis se tendrán en cuenta los esfuerzos verticales y horizontales actuantes en ambos soportes.

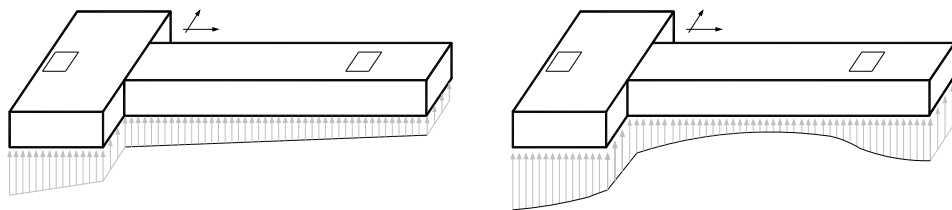
**3.6.5.7 Seguridad Estructural. E.L.U. de Flexión.**

El cálculo de esfuerzos para la comprobación del ELU a Flexión se realizará del mismo modo ya descrito en apartados anteriores, para el caso de zapata combinada de ancho constante.

El cálculo de los esfuerzos actuantes dependerá del modelo escogido para la transmisión de presiones al terreno, (Modelo 1 de Cimiento Rígido, o modelo II, Método elástico simplificado), del mismo modo ya comentado en los casos de zapata combinada de ancho constante.

De igual forma, las secciones de referencia para el cálculo de los esfuerzos de diseño, serán las mismas comentadas para el modelo de zapata combinada de ancho constante.

El cálculo de los esfuerzos de diseño en dirección 'y', seguirá en ambos modelos (3 y 4), el procedimiento descrito para el caso de 'cimiento rígido'.



**Figura 3.64. Zapata Asimétrica. Modelo Rígido y Elástico simplificado.**

Respecto a los criterios de armado se describe a continuación el proceso de cálculo:

– Armado Longitudinal

El criterio de armado dependerá de la existencia o no de esfuerzos de tracción en la cara superior del cimiento.

Sin tracciones en la cara superior:

En este caso solo existirá armadura inferior.

Inicialmente se armará inferiormente la sección de ancho menor. La sección se armará en función del momento obtenido bajo el soporte situado en la zona estrecha de la zapata (Soporte de medianera en el caso del tipo 3 y soporte interior para el caso 4), verificando a su vez que se cumplen con las cuantías mínimas geométricas indicadas en EHE-08 [1].

Seguidamente se armará la zona restante del cimiento que dispone del ancho mayor (B1-B2), donde se dispondrá el armado adicional necesario para cubrir el momento generado en bajo el soporte en esta zona y que verifica a su vez la cuantía mínima geométrica.

Con tracciones en la cara superior:

En este caso, será necesaria armadura tanto inferior como superior. La disposición de la armadura se realizará de la misma forma ya descrita anteriormente, añadiendo un último punto correspondiente al armado superior.

Se armará superiormente la zapata para el máximo momento positivo existente considerando el ancho menor del cimiento. Para la zona de cimiento de ancho mayor se completará el armado con el mismo número de redondos dispuestos en esta zona en la zona inferior pero con un diámetro de 10 mm.

La armadura resultante se dispondrá de lado a lado de la zapata respetando las reglas de anclaje.

– Armado Transversal

El modelo de armado transversal de la sección será el mismo ya descrito para las zapatas combinadas de ancho constante, con la única salvedad que el mismo estará diferenciado entre las dos zonas del cimiento, que presentan anchos distintos.

*3.6.5.8 Seguridad Estructural: E.L.U. de Cortante.*

La comprobación del ELU de Cortante será la misma ya descrita en el apartado 3.5.4.8 para el caso de zapatas combinadas de ancho constante con la única salvedad de considerar en cada comprobación el ancho correspondiente.

Para el caso donde en el dimensionado de las secciones se compruebe que es necesario armadura de refuerzo a cortante y no se dispone de armadura longitudinal superior, se forzará la disposición de esta en el mismo número de la dispuesta para el armado inferior.

*3.6.5.9 Seguridad Estructural. E.L.U. de Punzonamiento.*

La comprobación del ELU de punzonamiento será la misma ya descrita en el apartado 3.5.4.9 para el caso de zapatas combinadas de ancho constante con la única salvedad de considerar en cada comprobación el ancho correspondiente.

*3.6.5.10 Seguridad Estructural: E. L.U. de Anclaje.*

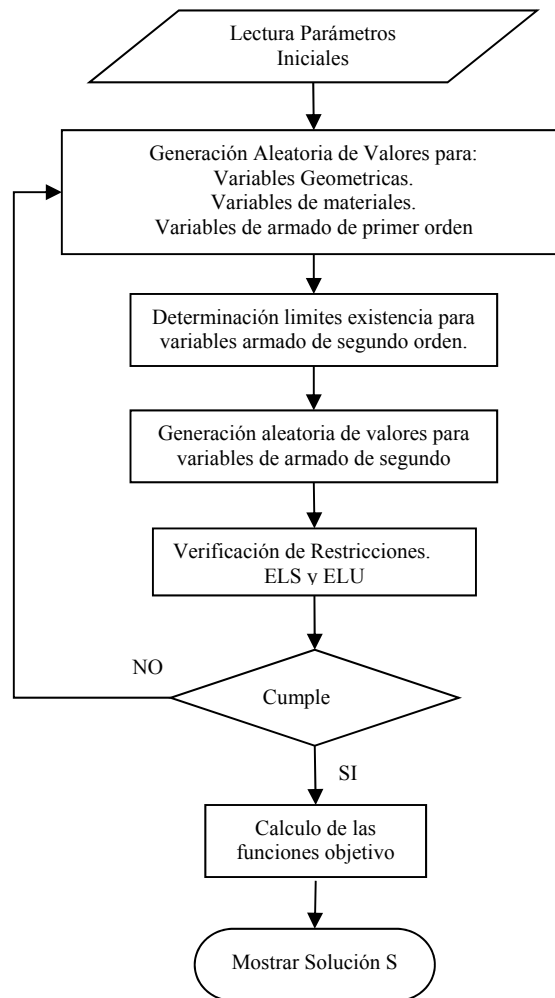
Las comprobaciones a realizar seguirán lo descrito en el mismo apartado relativo a zapatas aisladas.

El armado longitudinal inferior se dispondrá de lado a lado de la zapata, disponiéndose las correspondientes longitudes de anclaje. Caso de disponerse armado superior este se dispondrá en toda la longitud donde es necesaria dicha armadura disponiéndose a partir de ahí las correspondientes longitudes de anclaje.

En relación al armado transversal este se anclara tal y como se describió en el apartado 3.5.2.10 para zapatas aisladas.

### **3.7 Diagrama de cálculo.**

Se incluye a continuación diagrama esquemático con las fases a seguir en el cálculo de cada uno de los modelo de cimentación propuestos.



### **3.8 Referencias bibliográficas**

- [1]. Ministerio de Fomento. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). Real Decreto 1247/2008
- [2]. Ministerio de la Vivienda, (2006). Real Decreto 314/2006. Código Técnico de la Edificación, Parte II: Documento Básico: DB SE Seguridad Estructural. Boletín oficial del estado.
- [3]. J. Calavera. (2000). Cálculo de estructuras de Cimentación. Edición 4. Instituto Tecnico de Materiales de Construccion.
- [4]. Banco BEDEC. Banco de datos de elementos constructivos año 2015. Instituto Tecnico de la Construccion ITEC.
- [5]. J. Calavera & E. Gonzalez Valle & J. Fernandez Gomez & F. Valenciano. (1997) Manual de Ferralla. Anifer. Asociacion Nacional de Industriales de ferralla.
- [6]. V. K. A. Koumoussis, S.J. & Vasiloglou, V. B. (1995). Detailed design of reinforced concrete buildings using logic programming. *Advances in Engineering Software*, vol. 25, pp. 161-176.
- [7]. Kamal C. Sarma & Hojjat Adeli. 1998. Cost Optimization of concrete structures. *Journal of structural engineering*.
- [8]. Bledsoe, J. D. (1992). *Successful estimating methods*, R.S. Means Co., Kingston, Mass.
- [9]. Means. (1990). *Means estimating handbook*, Kingston, Mass.
- [10]. Yu Wang. 2008. Economic design optimization of Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE..
- [11]. Ministerio de Fomento. 1988. NBE AE-88. Norma básica de la edificación. Acciones en la edificación. Real Decreto 1370/1988.
- [12]. Ministerio de Fomento España. (1991). Real Decreto 1039/1991 de 28 de Junio, Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado. (EH-91). Centro de publicaciones. Secretaria General técnica. Ministerio de Fomento España
- [13]. Software ®SAP 2000. Computers & Structures Inc.

# Capítulo 4

## Estado del arte

## Optimización

## Estructuras

### 4.1 Introducción

Se incluye a continuación la revisión bibliográfica realizada sobre el problema estudiado, con objeto de poder evaluar los trabajos realizados por otros investigadores en el ámbito del presente estudio.

La revisión del estado del arte realizada sobre la optimización de estructuras se ha dividido en los siguientes capítulos.

- Optimización con métodos exactos
- Optimización Mono-objetivo con métodos aproximados.
- Optimización Multi-objetivo con métodos aproximados.

Se describen a continuación la bibliografía detectada en cada uno de los apartados:

### 4.2 Optimización de estructuras.

Tradicionalmente, el proceso de construcción de una estructura ha sido un trabajo que ha presentado poca exactitud, dado fundamentalmente por las condiciones de trabajo que suelen existir en una obra, al contrario de lo que habitualmente ocurre en un proceso industrial. Esto, unido a la falta de respetabilidad que se da en la construcción, que suele ser un hecho único, y a la complejidad del cálculo estructural, ha ocasionado que mientras que en el mundo industrial la consecución de la optimización fuera un hecho



relevante, en la construcción inicialmente no fuera uno de los objetivos a conseguir. Con la llegada de los ordenadores y los avances alcanzados en el conocimiento del comportamiento de los materiales de construcción, permitieron que se desarrollaran los primeros métodos de optimización a estructuras sencillas a mediados del siglo XX. Actualmente, dada la situación económica y la falta de algunos recursos, los criterios de optimización tanto económicos como medioambientales se han vuelto de gran relevancia, desarrollándose numerosa bibliografía en el entorno de la optimización de estructuras.

Históricamente, las primeras referencias que se pueden atribuir a la optimización de estructuras, se podrían datar en el siglo XV, donde Leonardo da Vinci y Galileo Galilei (Grierson y Adeli [1]) buscaban disminuir al máximo el peso de estructuras elementales de madera. También Galileo [2], incluyó en sus trabajos referencias sobre cálculos de deflexión de vigas.

Ya en el siglo XIX, Maxwell [3] en 1869, Levy en 1874 [4] y Mitchel [5] a comienzos del siglo XX, aportaron estudios para el diseño óptimo de estructuras metálicas de arcos y cerchas, donde se buscaba la minimización del peso de la solución. En estos estudios se desarrolló una metodología de cálculo capaz de aportar solución óptimas, si bien las soluciones alcanzadas no siempre era posible construirlas (Navarrina 1987 [6]).

En 1955 Klein [7], introdujo el problema de optimización estructural como un problema de optimización condicionada, criterio que se pudo implementar gracias a la aparición de los primeros ordenadores. En 1960, sería Schmidt [8] quien haría uso de la técnica de elementos finitos y la programación lineal para la optimización matemática, definiéndolo como “síntesis estructural”. La falta de potencia inicial de los ordenadores no permitió abordar la no linealidad del problema, siendo necesario en los inicios, la linealización matemática del problema, con cambios de variable o simplificaciones en el comportamiento de los materiales. Bajo estos supuestos, Karush [9] en 1939, Kuhn [10] en 1951 y Tucker (Kuhn [10]), aportaron estudios de búsqueda de óptimos. A partir de los años setenta, aparecen técnicas de resolución mediante la aplicación de multiplicadores de Lagrange o mediante el gradiente generalizado, apareciendo con posterioridad y hasta nuestros días numerosos métodos de resolución que han mejorado notablemente las técnicas de optimización.

Seria en 1986 cuando Goldberg y Samtani (Goldberg[11]), aplicaría por primera vez métodos metaheurísticos (Algoritmos Genéticos), para la resolución óptima de una celosía articulada de 10 barras. Con posterioridad Hajela [12][13], Jenkins [14][15], Rajeev [16] y Krishnamoorthy (Rajeev [16]), desarrollaron la aplicación de los algoritmos definidos por Goldberg[11] (simple genetic algorithm SGA) a problemas sencillos de diseño estructural.

### **4.3 Optimización mediante Métodos exactos.**

Se incluye a continuación el resumen del estado del arte en lo relativo a las investigaciones realizadas mediante métodos exactos para la optimización de estructuras. Se distinguirá entre los estudios relativos a las estructuras de hormigón y las relativas a las cimentaciones, objeto de la presente tesis.

#### **4.3.1 Estructuras de hormigón armado y pretensado.**

- En 1966, Torres et al. [17] estudia el cálculo de tableros de puente mediante vigas prefabricadas pretensadas, utilizando la programación lineal por niveles para la obtención del diseño más económico. Para la evaluación del coste económico se incluían además de los materiales, el coste debido al transporte y a la colocación de las vigas.
- En 1971 Goble y Lapay [18] utilizando un método de optimización de gradiente proyectado estudian el óptimo de coste económico de vigas prefabricadas pretensadas en T. En la función objetivo evaluada (coste económico) se incluyen los costes de encofrado, hormigón y acero dispuesto en la solución de viga obtenida. La conclusión del estudio, indican que la solución óptima alcanzada no se ve afectada por el precio relativo de los materiales, aspecto que otros autores confirmarían con posterioridad.
- En 1972 Johnson Jr. [19], aporta una aplicación de cálculo automático para tableros, con la que podía buscar la configuración óptima para las soluciones de vigas y pretensado del tablero. El estudio no incluye como función objetivo el coste económico.
- En 1972, Terrel [20], estudia el diseño óptimo de placas macizas de hormigón armado mediante el empleo de tablas de diseño de forjados, que le permitía encontrar las soluciones más económicas, a través de diversas combinaciones de los parámetros que definen el sistema de placa. En la función objetivo evaluada (coste económico), se incluyen los costes de encofrado, hormigón y acero dispuesto en la solución.
- En 1972 y 1973, Kirsch [21], aplicando programación lineal, estudia la optimización de estructuras continuas pretensadas de varios vanos. Entre las variables de cálculo se incluye el trazado de las vainas de pretensado.
- En 1974, Bond [22], estudia el diseño óptimo de edificios de hormigón armado y tableros de puente a base de losas de hormigón pretensado, mediante la aplicación del principio de optimización lineal. La conclusión del estudio es la necesidad de disponer de computadores de mayor rendimiento a la disponible en el momento del estudio, para poder así abordar los problemas en estudio.

- En 1976 Naaman [23] compara, la obtención de diseños distintos de vigas biapoyadas de sección rectangular, tomando dos funciones objetivo distintas: mínimo coste y mínimo peso de vigas. Se aplican precios al hormigón, al pretensado y al encofrado. La optimización la lleva a cabo mediante una técnica de búsqueda directa. Se alcanzan resultados análogos para ambos casos, cuando el precio del metro cúbico de hormigón es del orden de 35.6 veces el precio del kilo de acero activo.
- Ramamurthy [24] en 1978 , estudia la optimización de losas similares a las de Naaman. En este caso aplica la programación geométrica generalizada. Como variables del diseño incluye el canto de la losa y la armadura activa siendo la función objetivo analizada el coste económico, en el que no se incluye el encofrado de la solución . Como conclusión indica un límite para el valor del canto a partir del cual el óptimo se alcanza añadiendo armadura pasiva así como la influencia en la relación coste acero activo/pasivo en la conveniencia de emplear este último en la mejora la resistencia a flexión. También concluye que el coste económico se ve afectado por variaciones en las relaciones de costes de los materiales, en la línea sugerida por Goble y Lapay
- Moragues [25], en 1980 estudia la optimización de estructuras de pórticos de vigas y pilares, sometidas a cargas verticales. La función objetivo analizada será el coste económico. Se verifican las restricciones de ELU de agotamiento por solicitaciones normales pero no los ELU de cortante, pandeo ,etc.. ni los Estados Limite de Servicio. Se aportan así mismo, criterios de predimensionamiento de los elementos.
- En 1984 Cohn et al. [26], estudian la optimización de vigas en T o doble T de hormigón armado o pretensando y con armadura pretesa o postesa mediante el método de direcciones conjugadas factibles. Se evalúan las funciones objetivo de coste económico, peso. Se incluyen como restricciones las verificaciones de tensión, fisuración, fatiga, flechas, flexión y ductibilidad. Como conclusión, aportan que el óptimo económico en el caso de vigas postesadas se alcanza con pretensado parcial, siempre que la relación entre el coste unitario del acero activo y el pasivo sea superior a 4.
- Saouma y Murad [27], en 1984, estudian la optimización e vigas doble T pretensadas, mediante la aplicación de funciones de penalización eliminan las restricciones, lo que permite aplicar el método cuasi-Newton del IMSL. Se estudian vigas con luces entre 6.0 a 42.0 m de luz concluyendo que el óptimo económico se obtiene con el pretensado parcial que es ligeramente mejor económicamente que el pretensado total.
- En 1985, Jones [28] estudia la optimización económica sobre vigas prefabricadas pretensadas en sección cajón, utilizando técnicas de programación entera, obteniendo valores óptimos locales del problema, lo que puede considerar-

se como una técnica heurística. El análisis incluye la verificación de restricciones de ELU flexión, flechas y fisuración. Además considera los efectos diferidos en los límites de tensiones en el hormigón. En la evaluación del coste se incluye el precio de hormigón y acero activo.

- Plaut en 1987 [29], estudia diversos casos de cimentaciones de vigas de sección uniforme y placas circulares apoyadas sobre suelo elástico, sometidas a cargas uniformes. La función objetivo a minimizar será el factor de cumplimiento. Las soluciones óptimas son para las vigas un único soporte elástico o bien una zona de cimentación rodeada de apoyos elásticos (con excepción de los extremos libres). Para las placas, hay una región central, circular con una base uniforme, delimitado por un soporte circular elástico.
- En 1988 Prakash [30], estudia la optimización de diversos elementos estructurales, vigas planas y descolgadas en T y columnas con carga excéntrica. La función objetivo analizada es el coste económico o el peso de la solución. Indica la necesidad de considerar además los costes de mantenimiento y beneficios funcionales, si bien estas evaluaciones añaden demasiada complejidad al análisis para considerarlo en la práctica. Como conclusiones aporta que para edificios altos es mejor el criterio de peso mínimo, donde el mismo componente se repite en altura mientras que para edificios bajos es mejor el criterio económico. Un correcto tratamiento de la relación de costo de acero respecto a la cantidad de hormigón se muestra como una variable que permite obtener los diseños óptimos
- En 1989 Karihaloo [31], presenta un trabajo de búsqueda de diseños óptimos, peso mínimo, de pórticos planos bajo múltiples cargas. Cada caso de carga externa aplicada consiste en cargas concentradas y distribuidas, así como el peso propio. La condición impuesta es que la normal y los esfuerzos cortantes, las deformación transversal máxima y que la carga de pandeo no deben superar los límites marcados bajo cualquier combinación de cargas. Sin embargo, con el fin de simplificar el procedimiento de solución y obtener diseños que sean factibles en la práctica, la variación de la masa (rigidez) a lo largo de las barras se limita a splines (curvas regladas) de orden cero, uno o dos. Dentro de estas limitadas clases de variación, el problema de optimización se reduce a una programación no-lineal del problema cuya solución es buscada por varios métodos. El problema de optimización matemática puede reducirse a un problema de programación no-lineal (NLP). Este proceso de reducción se ve facilitada por la aplicación del criterio mínima variacional a las tensiones diferenciales. La solución de la NLP es buscada a través de diversos métodos: programación convexa secuencial con movimientos limitados; programación lineal secuencial con movimientos limitados; minimización secuencial técnica sin restricciones (SUMT).

- En 1989 Arenas y Villegas (Arenas 1989) presentaron el proceso de análisis y dimensionamiento de las pilas del viaducto de Cruzul. Realizaron la optimización de las mismas mediante un proceso prueba-error. Los cálculos se realizaron teniendo en cuenta la doble no linealidad, la geométrica y la mecánica. En este trabajo representan la distribución de las fuerzas transversales y las longitudinales entre las diferentes pilas.
- En 1991 Kanagasundaram [32], estudia la optimización económica de estructuras de hormigón armado. Como restricciones se verifican los requisitos de resistencia, estabilidad, facilidad de montaje, resistencia a fuego y durabilidad contenidos en la norma australiana AS3600-1988. El problema del coste mínimo se plantea como un problema de programación no-lineal cuya solución se trató mediante dos técnicas de programación una lineal secuencial (SLP) y otra denominada de programación secuencial convexa (SCP).
- En 1991 Samartín y Utrilla [33], estudian la optimización de losas trapezoidales pretensadas para tableros de puente, aplicando programación lineal. El objetivo es localizar el trazado y fuerza de tesado en los tendones. Definido el trazado, queda como variables de decisión la posición de los puntos de tangencia.
- En 1991, Gasch [34], estudia la optimización de forjados reticulares sometido a cargas verticales. El estudio incluye inicialmente la optimización de la topología (número de soportes) mientras que a posteriori se optimizaba la geometría (posición de soportes y dimensiones de forjado y soportes).
- En 1992, Chakraberty [35], aplica métodos de optimización a vigas de hormigón armado en distintas condiciones. Indica la gran variedad posible de costes de una solución en función de los costes unitarios de materiales y encofrado, dimensiones de viga y cuantías de armado. Incluye un modelo de programación geométrica con el que se alcanzan óptimos de coste mínimo.
- En 1992, Erbatur et al.[36], emplean el método simplex para la optimización de peso y coste de vigas de hormigón pretensado biapoyadas, aplicable a cuatro posibles secciones, sometidas a limitaciones de flexión (ELU y ELS), limitaciones de flechas en tres momentos de la vida de la viga, e incluso una comprobación de pandeo, que se justifica por la importante esbeltez de las soluciones óptimas. Las variables de decisión se reducen al ancho de la sección y la fuerza de pretensado. Los resultados muestran que las únicas restricciones que limitan el óptimo son los criterios tensionales. Realizan además un estudio de sensibilidad a los costes unitarios, del que se concluye que para vigas rectangulares con luces inferiores a 25.9 m el óptimo en peso y coste coinciden. Lo mismo sucede con secciones en T si la relación entre los costes del acero (activo) y hormigón es inferior a 25, y en secciones en I si este cociente

es inferior a 35. La interpretación de estos cocientes es difícil, pues no se especifican las unidades a emplear en su determinación.

- En 1993 Lounis et al. [38], aplicaron por primera vez la optimización multiobjetivo de un tablero de vigas prefabricadas pretensadas. Señalan la importancia de esta consideración para resolver estructuras reales. Emplean algoritmos de lagrangiano con dos funciones objetivo: coste total y contraflecha inicial. Su estrategia consistente en ordenar por su importancia las funciones objetivo, tomando la principal como función objetivo, y estableciendo restricciones para cumplir con la otra función, que pasa a ser considerada como una nueva limitación. Los óptimos pasan a ser un conjunto de óptimos de Pareto. Se imponen restricciones en ELU y ELS.
- En 1994 Cohn y Lounis [37][39], aportan una metodología de optimización entre diversas tipologías de puente. Las tipologías analizadas son: : vigas prefabricadas, cajón mono o bicelular, y losas aligeradas o macizas. Para ello proponen una optimización a tres niveles. En el primero se optimizan los componentes individuales del tablero (vigas, losa, etc.), el segundo se refiere a la configuración óptima de estos componentes en la estructura total (número de vigas, separación de almas, etc.), y el tercero se refiere a la tipología más adecuada. Emplean restricciones correspondientes a estados límites de tensiones y fisuración, fatiga, y flexión en rotura. El método admite una o varias funciones objetivo: mínimo coste, mínimo pretensado, mínimo volumen de hormigón, máxima separación entre vigas, mínimo canto para una luz dada, máxima esbeltez para luz variable, máxima luz para un canto dado o mínima flecha. Se plantea la optimización de modo multi-criterio y multinivel. Se aplican técnicas de algoritmos de lagrangiano para la optimización del primer nivel, y a partir de este punto, técnicas de búsqueda cribada en los niveles 2 y 3. Los resultados proporcionan valiosa información referente a los costes finales por unidad de superficie de tablero para las cinco tipologías, en función de las anchuras, número de vanos y luces en varios casos. También proporciona información relativa a cuantías de acero, disposiciones geométricas, esbelteces y estados límites activos en el óptimo. Para luces inferiores a 50 m., los tableros con vigas I y las losas aligeradas, resultan ser los más económicos
- Cohn et al.[40], en 1994 estudian diversos problemas de optimización analizados hasta el momento. Establecen como conclusión la carencia de factibilidad de algunas de las soluciones aportadas, recomendándose el análisis de problemas con geometrías y cargas reales. Indican en su estudio que el 92% de los casos analizados se refieren a estructura metálicas, siendo necesario la inclusión de más estudios sobre estructuras de hormigón así como la utilización de métodos heurísticos para su análisis puesto que en la mayoría de los casos se recurría a métodos exactos.

- En 1995, Al-Gahtani et al. [41], estudian la optimización económica de vigas continuas pretensadas. Como restricciones se incluyen las correspondientes a los estados límites de tensiones y fisuración, flexión en rotura y cuantías mínimas. La sección transversal se define como una envolvente de las diferentes formas habituales en la práctica, de tal modo que haciendo nulas algunas de sus dimensiones, esta forma puede transformarse en una viga rectangular, en T, en I, en T invertida, en doble T o en cajón, entre otras. Obtiene resultados análogos a los obtenidos para vigas biapoyadas por Cohn y MacRae, en los que son más económicas las soluciones para pretensado parcial que para pretensado total. Además, confirma que la función objetivo debe ser el coste, y no el peso o el volumen de los materiales.
- Aparicio et al. [42], en 1996 presentaron un programa informático que obtenía diseños automatizados de puentes de carretera de hormigón pretensado. Calcula y diseña completamente toda la estructura para distintas tipologías de tableros, pilas y estribos. El programa determina en qué casos son más eficaces unas tipologías sobre otras, considerando varios tipos de puentes losa, cajón o de vigas prefabricadas I. En el ejemplo presentado, diseñan completamente un puente de 4 vanos de 60-115-115-60 m de luz a partir de los datos relativos a luces, definición de superestructura, alturas de pilas y estribos, modo de construcción y datos sísmicos. Este tipo de programas permite obtener soluciones diferentes para una estructura en particular, siendo una ayuda significativa para el ingeniero en la toma de decisión de la elección del diseño del puente más adecuado al problema.
- En 1997 Balling et al. [43], estudian la optimización económica de pórticos de hormigón armado. El análisis no incluía como variable la resistencia del hormigón, ni consideraba el cálculo de las armaduras de cortante, aunque sí realizaba ciertas comprobaciones para asegurar que la sección de hormigón era suficiente para resistir este esfuerzo. Para la optimización se utilizan tres métodos distintos. El primer método es un método exacto basado en técnicas del gradiente, el segundo es un método multinivel donde inicialmente se realizaba una optimización mediante un algoritmo de SA para a continuación realizar una exploración exhaustiva del espacio de soluciones para la definición de las armaduras de flexión. La última técnica utilizada partía de suponer que las restricciones relativas a las cuantías mínimas de armadura y al cumplimiento del ELU de agotamiento por solicitaciones normales rigen los diseños óptimos, eliminando así el armado como incógnita. Se concluía que el último de los métodos era con el que conseguían los óptimos de forma más rápida así como que el método multi-criterio proporcionaba las soluciones de menor coste.

- En 1997 Lounis et al. [44], estudian la optimización de vigas pretensadas prefabricadas dispuestas en vanos isostáticos o continuos con postesado en obra o con disposición de armadura pasiva. Aplican un programa no lineal de optimización sobre un conjunto de vigas y concluyen que las vigas con forma de ‘bulbo’ en la zona inferior, se muestran más óptimas en tramos continuos que las vigas en ‘I cuasi simétrica’.
- En 1998 Koumoussis [45], aplica la técnica de algoritmos genéticos para la optimización de elementos de hormigón armado de edificios de varias plantas. El estudio incluye una búsqueda multi-criterio, entre las funciones objetivo de peso mínimo, máxima uniformidad de armado y el número mínimo de barras para un grupo de miembros. Se muestran diseños diferentes con la variación de los factores de ponderaciones de cada función.
- En 2000 Rizzo [46], se acerca a la búsqueda exhaustiva del diseño óptimo de estructuras de hormigón armado (RC), sometido a cargas cuasi estáticas externas variables y repetitivas que permiten plantear la búsqueda exhaustiva o la adaptación, cuando las restricciones se imponen sobre los momentos de flexión y / o los parámetros de deformación, con el fin de simular el ductilidad limitada a la flexión del material, en presencia de tensión combinada flexión y compresión. Se presenta un nuevo algoritmo de cálculo, denominada estrategia de evolución. Este algoritmo, derivado de la analogía con la evolución biológica, se basa en operadores que de forma aleatoria aportan valores a las áreas de los refuerzos de acero en cada sección transversal RC de la estructura, como variables de diseño de tipo discreto, y para utilizar aproximaciones no-lineales refinadas de los diagramas de diseño de capacidad a momento–axil (M-N) de cada sección transversal RC.
- En 2003 Ferreira [47], estudia la optimización de vigas en T bajo cargas de flexión. La optimización se basa en la consecución del óptimo de área de refuerzo de acero y su localización. El comportamiento bajo estado límite último del material se define de acuerdo a los códigos de diseño, tales como EC2 y el Código Modelo de 1990. El propósito de este trabajo es obtener el diseño óptimo analítico de la armadura de una sección T, en términos de capacidad a estado límite último.
- Torrano [48], en 2003 estudia la optimización económica de diversas secciones de hormigón armado con forma arbitraria y distintas distribuciones de armado. Para ello aplica un método de optimización cuadrática sucesiva. Los elementos estudiados son: una sección cuadrada y otra en ‘L’ sometida a esfuerzos de flexión compuesta esviada, una sección rectangular con un agujero centrado solicitado a flexión compuesta recta, una viga biapoyada de sección variable sometida a una carga vertical uniformemente repartida y una sección que representa un sistema de pantallas sometidas a flexión compuesta esviada.



- En 2003, Barakat et al. [49], retomaron el trabajo de 1994 de Al-Harthy et al. [50]. De nuevo aplicaron la optimización combinada con el análisis de fiabilidad para optimizar vigas prefabricadas pretensadas doble T, de forma que las restricciones consideradas (tensiones, flechas, momentos de agotamiento y cortante) son tratadas desde el punto de vista de la fiabilidad estructural. El problema incluye como variables la geometría de las vigas y su pretensado empleando un algoritmo basado en el método de las direcciones factibles. Realizan un estudio sobre 16 casos, con valores de luz y cargas distintas, concluyendo que la restricción condicionante es siempre el Estado Limite de Servicio de Tensiones. El valor de la esbeltez para las vigas óptimas varía entre un valor de 9 (carga pesada) a 12 (carga ligera), estimando para el predimensionado un valor de 10.5.
- En 2004 Bayramov [51], estudia la optimización de los parámetros de fractura de hormigones reforzados con fibras de acero. La función objetivo es la localización una sección con el comportamiento más dúctil que la del hormigón en masa. Se investigaron mediante la medición de la energía de fractura (GF) y la longitud característica (Ich), los efectos de la relación de aspecto (L / D) y la fracción de volumen de fibras de acero (Vf) en las propiedades de fractura de hormigón en flexión. Para la optimización se utilizaron, de tres niveles de diseño factorial completo y el método experimental de superficie de respuesta. Los resultados muestran que son muy significativos los efectos derivados de las variaciones en la fracción del volumen de fibras, la relación de aspecto en la energía de fractura y la longitud característica.
- En 2004, Barakat et al. [52], continúan con trabajos anteriores, realizando en este caso un estudio de optimización multi-criterio. Las funciones objetivo evaluadas serán los costes, criterios de seguridad y límites de servicio. Permite seleccionar criterios de fiabilidad estructural, conociendo las repercusiones económicas de su decisión. Dada la no linealidad y la no convexidad del problema, consideran que el método resultaría más eficaz si se aplicarían otras técnicas de optimización, como algoritmos genéticos o cristalización simulada.
- En 2005 Sirca et al. [53], formulan la optimización del tablero de vigas I prefabricadas pretensadas, incluyendo el número de vigas y su pretensado. Para ello, plantean un problema mixto discreto no lineal, en cuya resolución intervienen las redes neuronales para la evaluación de los multiplicadores de Lagrange en cada iteración. Demuestran con el ejemplo presentado la aplicación práctica del método, que además contiene una excelente convergencia y robustez.
- En 2005 Rodrigues et al [54], estudian la optimización económica de los soportes de un edificio de 16 plantas, sometido a cargas verticales y horizontales. Se aplica un método multinivel. Inicialmente se obtienen las dimensiones de

los soportes y en una segunda etapa se obtienen los armados. Los valores relativos a la definición de las vigas y del hormigón no se estudian como variables. En el análisis se incluyen las restricciones de ELU de inestabilidad de soportes, cuantías, desplazamientos horizontales y derivas en los pisos, no incluyendo verificaciones de ELU cortante. Como conclusión se aporta que los óptimos económicos se obtienen disponiendo secciones diferentes por planta en los soportes.

- En 2006 Zou[55], Este trabajo desarrolla una metodología de optimización basada en la fiabilidad de la optimización del diseño (RBDO), diferenciando la optimización y el análisis de la fiabilidad en las iteraciones de las formulaciones en las que se encuentran anidadas. Esto se logra mediante la aproximación a las limitaciones de fiabilidad en base a los resultados de fiabilidad del análisis. El enfoque propuesto no utiliza análisis inverso de primer orden en el análisis de fiabilidad, tal como lo hacen otros métodos existentes desconectados, hace uso del análisis de fiabilidad directa. Esta estrategia permite un enfoque modular y el uso de métodos más precisos, incluidos los de simulación Monte-Carlo (MCS), basados en métodos de restricciones de confiabilidad no-lineales, donde la aproximación de primer orden puede no ser exacta. La eficiencia de la propuesta enfoque RBDO se mejora aún más mediante la identificación de las limitaciones de fiabilidad potencialmente activos al comienzo de cada análisis de fiabilidad.
- En 2007 Hong [56], estudia el mantenimiento, reparación y rehabilitación (MR & R) óptima de tableros de hormigón para puentes. Aplica el modelo de evaluación de mantenimiento, reparación y rehabilitación (MEMRRES) propuesto por el mismo en su tesis doctoral en 2003.
- En 2007 Aschheim [57], estudia los dominios de diseño óptimos para determinar el refuerzo de secciones rectangulares de hormigón armado bajo axil y flexión, de acuerdo a lo dispuesto en el Eurocódigo 2. Se identifican las características de las soluciones óptimas de refuerzo para cada dominio, establece las expresiones analíticas para los límites de los dominios, y un procedimiento de solución de dos etapas para la determinar el refuerzo superior e inferior requerido para resistir una combinación arbitraria de carga axial y momento. El enfoque de diseño de dos pasos proporciona una solución directa para el refuerzo óptimo y requiere menos cómputo que el enfoque obtención del refuerzo a través de los ábacos de diseño tradicionales. Las soluciones de refuerzo óptimo permiten un ahorro significativo en las cuantías de acero de refuerzo.
- Srinivas et al. [58], en 2007, estudian la optimización económica de tableros de vigas pretensadas mediante la aplicación de algoritmos genéticos y una red neuronal para predecir la factibilidad de soluciones. Como ventaja del método propuesto indican la gran velocidad de cálculo, puesto que no es necesario el

cálculo de las restricciones del problema, pretensado por tanto un buen comportamiento por parte del método de redes neuronales en la resolución de problemas de optimización de gran tamaño.

- En 2008 Kwak [59], presenta un nuevo enfoque al construir un sistema de dos fases, una primera de construcción de una base de datos de secciones de vigas y pilares de hormigón armado, que se organizan en base a su capacidad resistente con el fin de alcanzar un diseño óptimo de la estructura de hormigón armado. Todas las variables de diseño de una sección RC están interconectadas por una variable de diseño representativa, que es el número identificativo de la sección. En una segunda, y seleccionada una sección de la base, se calcula la estructura, si la sección propuesta cumple, se acepta, de no ser así la solución no estará lejos en la base de datos de sección, por lo que se busca y selecciona. Sigue un método de búsqueda directa que mediante algoritmos de optimización discreta, buscan rápidamente una solución óptima. Por tanto, desde un punto de vista práctico, el problema puede ser definido como la optimización de elementos RC con variables discretas en vez de con variables continuas.
- En 2008 Geyer [158], la optimización a menudo se centra sólo en la variación de los parámetros dejando de lado la consideración de sistemas alternativos. Sin embargo, la reordenación de los componentes de un diseño ofrece una mejora importante. Propone optimizar el diseño introduciendo un enfoque multidisciplinar para la optimización del diseño (MDO). Se lleva a cabo la vinculación de las características cualitativas al análisis cuantitativo del modelo de estructura, así a los componentes se les asignan cualidades arquitectónicas, los recursos económicos y ambientales, tales como los costos y el consumo de energía y por lo tanto se incluyen parámetros no numéricos, a las características cualitativas dentro de optimización numérica. El enfoque se ha desarrollado con la ayuda de un diseño de edificios basados en pórticos y demuestra las modificaciones del sistema del modelo de optimización bajo un conjunto de reglas específico. El conjunto de reglas se centra en el diseño estructural, pero considera que los efectos de las otras disciplinas esenciales implicados en el caso de diseño.
- En 2009 Narashiman [60], El diseño de la durabilidad de estructuras de hormigón se basa tradicionalmente en los requisitos implícitos y preceptivos de los materiales, componentes materiales y las dimensiones estructurales. Con el uso de dichas normas, no es posible visualizar una relación explícita entre una mayor durabilidad durante la vida útil de una estructura y determinar lo que constituye una durabilidad aceptable a un coste óptimo. Se presenta en este documento un procedimiento de diseño de durabilidad explícito para el diseño de elementos estructurales de hormigón armado. El procedimiento trata de integrar directamente las consideraciones de durabilidad en el proceso de diseño estructural, al tiempo que garantiza la optimización de toda la vida útil. La

evaluación de la durabilidad se hace sobre la base de la vida de servicio que se determina basándose en el principio del cumplimiento los estados límite definidos - un concepto comúnmente utilizado en el diseño estructural. Se tienen en cuenta la durabilidad considerándola corrosión del refuerzo inducida por la entrada de cloruro del agua de mar. La vida de servicio decide la magnitud y el calendario de los futuros costos incurridos durante la vida útil de la estructura. Se examinan las ventajas y desventajas entre los costos iniciales y los costos futuros para determinar la alternativa óptima de diseño desde una perspectiva de coste del ciclo de vida. También se evalúa la influencia del diseño y diversas variables de entorno en el coste del ciclo de vida y por lo tanto la durabilidad de la estructura.

- En 2009 Biondini [61], presenta un enfoque de la optimización de hormigón armado (EHA) basado en la fiabilidad de las secciones transversales en un entorno agresivo. El rendimiento de por vida estructural se evaluó mediante el uso de una metodología general para el análisis en el tiempo de las estructuras de RC objeto de ataques por difusión de los agentes agresivos a la corrosión de la armadura. La optimización vida probabilística se formula en el plano transversal, y está destinado a minimizar el coste del material bajo una restricción dependiente del tiempo en la fiabilidad estructural. El problema de optimización se resuelve mediante la combinación de un método de optimización de gradiente discreto en una simulación de Monte Carlo. Los resultados obtenidos demuestran que en un diseño de por vida orientado a la cuantía y posición de la armadura de acero y el valor del recubrimiento de hormigón juegan un papel crucial para el logro óptimo del rendimiento estructural con relación a la vida útil.
- En 2010 S. Hernández et al. [62], diseñan un software para optimizar vigas pretensas en los tableros de puentes de carreteras. Presentan un ejemplo donde muestran la interactividad del programa. El usuario propone de un modo muy sencillo las dimensiones de las vigas y obtiene el trazado de los tendones (tres niveles) para la menor fuerza de tesado. La optimización del trazado del pretensado está formulado como un problema de formulación lineal. Proporciona salida gráfica para planos. Se puede aplicar también para tableros losa.
- H. Maleky et al [63], en 2010, presentan un programa informático para el diseño óptimo de tableros de puentes de carreteras. Se evalúan: 2 diseños de tableros de hormigón armado, 4 de hormigón postesado, 2 de hormigón pretensado, 1 de vigas postesadas, 1 de cajón en avance en voladizo y 2 mixtos con vigas metálicas en I y artesas. En primer lugar trasladan los requerimientos del problema en requerimientos de diseño mediante la técnica del Despliegue de la Función de Calidad (FQD). En segundo lugar aplican la técnica del Soporte para la toma de Decisiones (TOPSIS), que permite ordenar en base al peso de los materiales el mejor diseño.

### 4.3.2 Cimentaciones de hormigón armado.

- En 1993 Hannan [64], se estudia una estrategia para seleccionar el volumen mínimo para una cimentación de hormigón armado capaz de soportar una estructura bajo la acción de viento. Se plantea un modelo de diseño matemático de estos sistemas con las restricciones que aseguran que no existe vuelco y que la tensión transmitida al apoyo no exceda la admisible, así como el agotamiento del elemento de hormigón. Las soluciones óptimas se obtienen aplicando un algoritmo de gradiente conjugado con funciones parabólicas de penalización. Los resultados indican que, para las estructuras de carga ligera, el diseño óptimo de zapata tiende a ser un pozo (gran profundidad con relación al canto), mientras que para una estructura con un mayor nivel de carga el diseño óptimo es más "placa como" (gran longitud en relación al canto).

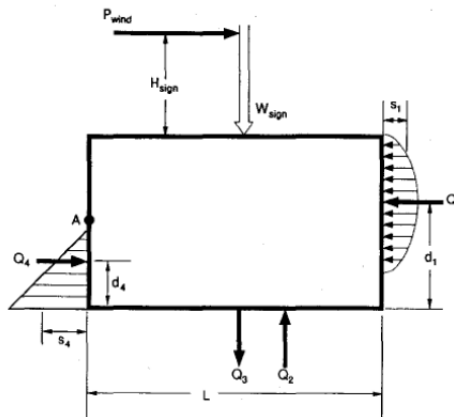


Figura 4.1. Modelo de cálculo para zapata. Hannan [64].

- En 1996, Saribas y Erbatu [138] realizan un estudio sobre la optimización de muros de contención de hormigón armado. Las funciones objetivo evaluadas son el coste económico y el peso de la solución. Para la resolución, se emplea un **algoritmo con funciones de penalización**. Se aplica la optimización a dos ejemplos, donde se evalúa la sensibilidad de las soluciones con respecto a parámetros como las cargas actuantes, peso de muro, espesor de muro, Angulo de rozamiento del terreno o el tipo de acero dispuesto.

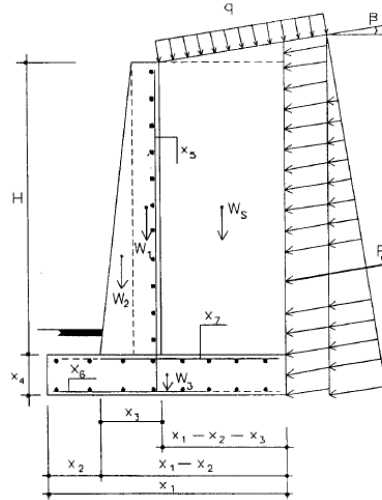


Figura 4.2. Modelo de cálculo muro contención. Saribas et al. [138].

- En 1999 Fadaee [65], presentan un método para obtener un diseño óptimo de encepados de hormigón armado para pilotes. Las variables de diseño son las dimensiones del encepado, el área de los refuerzos longitudinales y transversales del encepado y el diámetro de los pilotes. El método parte de fijar el número de pilotes, y una vez fijado el mismo se reparte la carga axial transmitida por el pilar de forma proporcional a los pilotes dispuestos, para fijar entonces la reacción efectiva de cada pilote. El diámetro del pilote se obtiene a partir de la reacción efectiva con la condición que la tensión en la cabeza del mismo no supere la tensión máxima admisible. Un sistema secuencial de operaciones cuadráticas (SQP) se aplica para minimizar el coste del hormigón y acero requerido por el conjunto estructural.

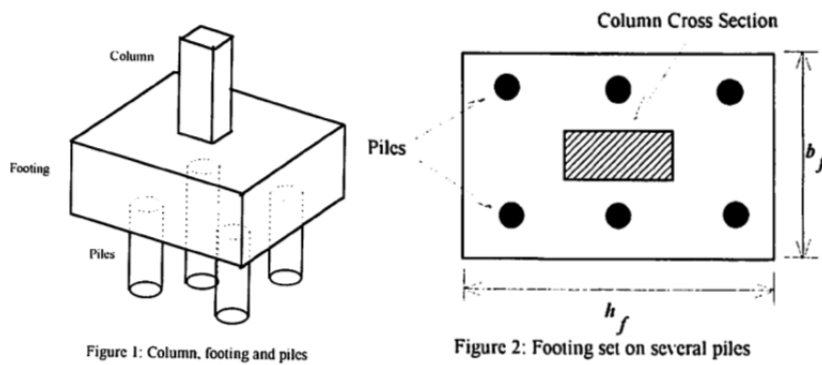


Figure 1: Column, footing and piles

Figure 2: Footing set on several piles

Figura 4.3. Diseño óptimo de encepados. Fadaee [65].

- En 1999, Fadaee y Grierson [139], publican su estudio sobre el diseño óptimo de una cimentación con encepados y pilotes. Para ello, se usa un sistema secuencial de operaciones cuadráticas “**Sequential Quadratic Programming (SQP)**”, con el que se busca el óptimo económico de la solución de cimentación. El estudio incluye un ejemplo de encepado sometido a carga vertical. Como conclusión se establece la efectividad y rapidez del método aportado en relación con el usado en la práctica profesional, que se basa en el método de ensayo-error y que además no garantiza la obtención del óptimo de diseño.

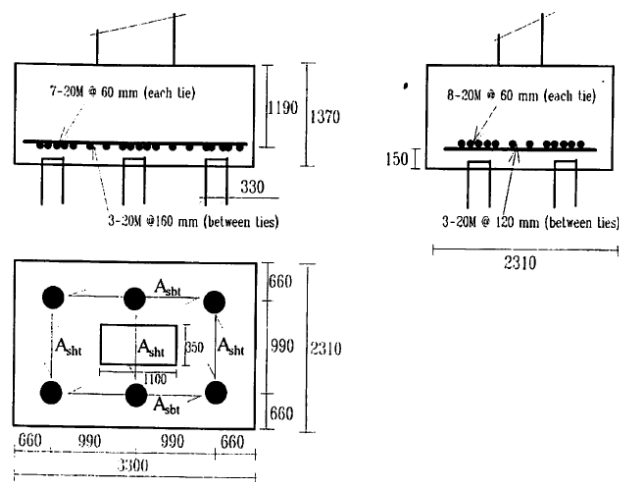


Figura 4.4. Modelo de armado encepado. Fadaee et al. [135].

#### 4.4 Optimización mediante Métodos Heurísticos.

Las primeras referencias localizadas en el uso de métodos metaheurísticos para la optimización de estructuras se remontan a Goldberg y Samtani [11] en 1986. En su estudio se aplicaba la técnica de algoritmos genéticos (simple genetic algorithm SGA), para la optimización de una celosía articulada de 10 barras. Posteriormente, Hajela [12][13], Jenkins [14] o Rajeev y Krishnamoorthy [16], aplicaron estos mismos algoritmos de optimización a sencillos problemas estructurales y problemas típicos de entramados metálicos.

##### 4.4.1 Estructuras metálicas.

Inicialmente, la mayoría de estudios de optimización mediante métodos heurísticos se realizaron sobre estructuras metálicas, incluyéndose a continuación un breve resumen del avance de las mismas:

- En 1991 Balling [66], estudia la optimización mediante la aplicación del algoritmo ‘Simulated Annealing (SA)’, de pórticos tridimensionales metálicos. Los

resultados obtenidos se comparan con los alcanzados por métodos exactos, concluyendo que la técnica de SA aporta soluciones óptimas de calidad en tiempos reducidos.

- Adeli et al [67], en 1994 estudian la optimización del peso de estructuras de barras mediante la aplicación de Algoritmos Genéticos ‘Genetic Algorithm (GA)’. Las conclusiones del estudio es la de que el algoritmo de optimización de GA es válido para la localización de soluciones óptimas.
- En 1994 Coello [68], y 1997 Coello et al, [69], estudian la optimización del peso de estructuras metálicas de barras mediante la aplicación de GA. Resuelven el mismo problema incluido en otros estudios, obteniendo mejores resultados que otros autores.
- Chattopadhyay [70], en 1994 aplica la optimización multi-objetivo. Se incluyen objetivos de diseño múltiples y contradictorios como la reducción de la vibración, la energía disipada, el poder y un índice de rendimiento, mediante la utilización de una formulación eficaz de optimización multi-objetivo. Los materiales piezoeléctricos se utilizan como actuadores en el sistema de control. Un algoritmo de recocido simulado (SA) se utiliza para la optimización y una técnica de aproximación se utiliza para reducir el esfuerzo computacional
- En 1995 Adeli y Kumar [67], presentaron un GA para la búsqueda de estructuras óptimas con gran número de variables aprovechando la adaptabilidad de los mismos a una programación en paralelo. Se dan dos propuestas diferentes: una utilizando funciones de penalización y otra aplicando el método lagrangiano. La técnica es aplicada a diferentes estructuras de barras llegando a la conclusión de la efectividad de utilizar estrategias de paralelización en GA.
- En 1999 Manoharan et al. [71], realizan un estudio de optimización sobre estructuras de barras aplicando varios métodos ‘Tabu Search (TS), SA, GA y un método exacto’. Como conclusión indican que los métodos metaheurísticos utilizados llegan a soluciones buenas en tiempos razonables, obteniéndose mediante la técnica de TS, soluciones de igual o mejor calidad que con las otras técnicas, pero en tiempos menores. Además la aplicación del método exacto resulta difícil y costosa para estructuras con muchas barras.
- En 2002 Hasancebi y Erbatur [72] estudian la optimización simultánea de la topología (definición de número de barras y de la posición de los nudos) y las secciones de la estructura. Estudian dos problemas (una pirámide espacial y una estructura articulada plana) mediante la aplicación del algoritmo de Simulated Annealing. La función objetivo trata de minimizar el peso de la estructura.
- Kaveh et al. [73], en 2003, estudian la optimización de estructuras metálicas articuladas planas y espaciales mediante la aplicación de GA. Para la verifica-



ción de las restricciones se emplea un software comercial de cálculo de estructuras. Como conclusión se establece la idoneidad del método para la obtención de soluciones óptimas si bien los tiempos de ejecución resultan elevados.

- En 2004 Camp y Bichon [74] estudian la optimización de problemas de vigas metálicas en estructuras planas y espaciales, aplicando la técnica de ‘Ant Colony Optimización (ACO)’. Los ejemplos incluidos, son los mismos ya contemplados por otros autores que aplicaron técnicas con GA y métodos exactos por lo que se pueden comparar los resultados obtenidos. Las conclusiones muestran una alta robustez del método para obtener soluciones óptimas, proporcionando en todos los intentos soluciones similares y de mejor calidad que las obtenidas con los algoritmos de GA o métodos exactos.
- En 2005 Schmidt y Thierauf [75], combinaron el TA con un algoritmo evolutivo, definiendo un algoritmo evolutivo híbrido, y lo aplicaron a la resolución de dos problemas extraídos de la bibliografía: la optimización de un pilar de acero y la de una estructura articulada de 10 barras. El algoritmo principal es evolutivo, realizando la mejora local de las soluciones aplicando TA en cada etapa. Los resultados obtenidos se comparan con los de otros autores para los mismos problemas, llegando a la conclusión de que el método muestra un comportamiento robusto con tiempos de ejecución bajos.
- En 2005 Lagaros et al. [76], aplicaron estrategias evolutivas al diseño óptimo de una estructura tipo tubo de 36 plantas. Utilizan una base de datos para dar los valores a las diversas variables de modo que la estructura sea construible, la elección de esta base debe ser adecuada al problema de modo que las variables puedan acceder a los valores necesarios. Este método da buenos resultados cuando el tamaño del programa crece.
- En 2005 Gong et al. [77], aplicaron técnicas de colonia de hormigas para optimizar estructuras de barras planas con cargas en los nodos y la estructura de una antena. Se compararon los resultados con los obtenidos mediante GA y SA llegando a la conclusión que los obtenidos con la técnica de colonias de hormigas eran mejores.
- Degertekina et al. [78], en 2007 estudian la optimización no lineal de estructuras de barras metálicas mediante la aplicación de TS y GA. La función objetivo será el peso de la estructura, disponiendo de una base de datos de barras para la elección. En las conclusiones del estudio se comparan los resultados obtenidos mediante cada una de las heurísticas.
- En 2008 Degertekina et al. [78], plantean la optimización mediante cálculo no lineal de estructuras metálicas tridimensionales de edificación, mostrando ejemplos que alcanzan hasta 84 vigas/pilares. Aplican TS y GA.

- Kaveha & Talatahari [157], en 2010 presentan una mejora en la heurística de ACO (IACO) para la optimización del diseño de pórticos planos de edificación de múltiples plantas y vanos. El algoritmo tiene dos fases, en una primera aplica colonia de hormigas para realizar una aproximación global, basada en los principios de desratización de los elementos finitos, borrando los sub-espacios no factibles, reduciendo así el espacio de soluciones y consecuentemente el tiempo; y en una segunda fase de búsqueda local, se obtiene un diseño final óptimo a partir de secciones tipo próximas a las secciones obtenidas en la fase anterior. Se compara este método con el ACO estándar, GA y búsqueda armónica, y se comprueba su robustez y la reducción de tiempo obtenido.

#### **4.4.2 Estructuras de hormigón**

Se incluyen a continuación las referencias bibliográficas más relevantes localizadas en el ámbito de optimización mediante técnicas heurísticas de estructuras de hormigón armado o pretensado, con la excepción de las relativas a elementos de cimentación y muros de contención, que se mostrarán en un apartado específico. Las heurísticas aplicadas para la optimización de estructuras de hormigón están basadas, al igual que para las estructuras de acero, en métodos de búsqueda local, en poblaciones, o en una combinación de ambas.

- El primer estudio sobre la optimización mediante técnicas heurísticas de estructuras de hormigón lo aporta Chakrabarty [79], en 1992, que estudia la optimización del coste de una viga de hormigón armado sometido a flexión.
- Adamu [80], en 1994, presenta un procedimiento para el diseño óptimo, económico, de vigas de hormigón armado bajo varias restricciones de diseño, en la base a criterios de optimización discretizados tipo continuo (DCOC). Los costes que se reducen al mínimo involucran el hormigón, el acero de refuerzo y el encofrado. Las limitaciones de diseño incluyen los límites de flecha máxima en un período dado, capacidad a flexión y cortante, además de los límites superior e inferior de las variables de diseño. Basándose en las condiciones de Kuhn-Tucker se plantea una derivación matemática explícita de los criterios de optimización, seguido de un procedimiento iterativo para los diseños siendo las variables de diseño la profundidad y la cuantía de acero, o bien solo la profundidad.
- En 1996 Kocer y Arora [81], estudian la optimización de postes de líneas eléctricas resueltos con hormigón pretensado, aplicando la técnica de GA y otro procedimiento denominado ‘Ramificación y Poda’.
- Koumoussis [82], en 1996, realiza un estudio de optimización multi-objetivo de un entramado de vigas y soportes. Las funciones objetivo evaluadas son ‘peso mínimo’, ‘máxima uniformidad de armado’ y ‘número mínimo de barras de refuerzo’. Variando los factores de ponderación, es posible generar el conjunto

óptimo de Pareto del problema. El rendimiento del sistema se ilustra con una serie de ejemplos. Como conclusión se aportan ciertos valores para los factores de ponderación de cada función objetivo.

- En 1997 Krakovski [83], demuestra cómo la teoría del diseño experimental junto con el principio de dividir las variables pueden ser aplicada a la optimización de estructuras de hormigón reforzado. Las ventajas de este enfoque son la sencillez y versatilidad. La optimización es llevada a cabo de forma interactiva. Los conjuntos de variables están especificados de forma manual, mientras que la mayor parte de los cálculos se realiza con software comercial (SAP90). De esta manera, la parte intuitiva y las decisiones técnicas pueden ser incorporados en el proceso de optimización.
- Coello et al. [84], estudia la optimización de vigas biapoyadas de hormigón armado sometidas a flexión mediante la aplicación de GA. Se consideran como variables el armado y la geometría de la viga. La conclusión del estudio indica la idoneidad de la técnica de GA para la obtención de óptimos, indicando que el ajuste de los parámetros de configuración del algoritmo permitía llegar de forma rápida a soluciones de baja calidad y de forma más lenta a mejores soluciones.
- En 1998 Koumousis [45], aplica la técnica de GA para el diseño óptimo de pórticos de hormigón armado de varios pisos. El objetivo es convertir la armadura necesaria en área, centímetros cuadrados, en un número de secciones transversales, en un conjunto de barras de refuerzo de un diámetro determinado y la longitud específica y su posición en lugares específicos a lo largo del elemento estructural calculado, teniendo en cuenta diferentes criterios y las reglas de diseño. Se tienen en cuenta las longitudes de anclaje, y las barras se cortan en los lugares adecuados. Para este tipo de problemas, los métodos de enumeración conducen a soluciones costosas, mientras que los algoritmos genéticos tienden a ofrecer soluciones casi óptimas en el tiempo de cálculo razonable. Los algoritmos genéticos utilizados en este trabajo se basan en un sistema de ruleta de la reproducción, cruce único, múltiple punto, y uniforme, y en sistemas de mutación constante o variable. Es utilizada una estrategia elitista constante o variable que pasa los mejores diseños de la generación a la siguiente. El método decide el diseño detallado sobre la base de un objetivo multi-criterio que representa un compromiso entre un diseño de peso mínimo, una máxima uniformidad, y el número mínimo de barras para un grupo de miembros. Variando los factores de ponderación, se obtienen diseños con resultado.
- Leite y Topping [85], en 1998 estudian la mejora del GA en problemas de optimización de estructuras de hormigón pretensado. Se muestra como ejemplo de aplicación, el ejemplo ya tratado por Cohn y Lounis (Lounis) (1993) de vi-

gas continuas de tres vanos, que resuelve en tres casos. En el primero se mantiene fija la geometría y se minimiza el acero en pretensado y armadura pasiva de flexión. En este caso se obtienen diferencias respecto al óptimo de Cohn inferiores al 1.0 %. En el segundo caso se liberan las dimensiones de la pieza, y permitiendo reducciones en los espesores del alma y de las alas superiores e inferiores de la viga, se obtienen mejoras del 19%. Y en el tercero, añadiendo tres variables más y nuevas restricciones para el dimensionamiento completo de la viga, aumentan hasta un 21%.

- Rafiq y Southcombe [86], en 1998 estudian la optimización de soportes sometidos a flexocompresión esviada mediante la aplicación de la técnica de GA. Las soluciones se obtienen tanto mediante un método simplificado aportado por la BS8110 como de manera exacta a través de un software de cálculo estructural. Como conclusiones señalan que el método simplificado debe ir acompañado de otro que compruebe las secciones, especialmente en columnas con grandes secciones transversales, el método desarrollado minimiza las barras de refuerzo optimizando las secciones para los esfuerzos que la solicitan
- En 1998 Rajeev et al. [16], estudian la optimización de dos pórticos planos de hormigón armado mediante la aplicación de GA. Estudian una configuración de tres vanos y cuatro plantas y de dos vanos y seis plantas. Se tienen en cuenta aspectos de construcción con la colocación de armaduras en vigas y pilares. No se incluyen como variables la calidad del hormigón ni la armadura de cortante. Como conclusión del estudio indican la bondad de la técnica de GA para la resolución de este tipo de problemas, insistiendo en la necesidad de que las soluciones obtenidas sean ‘construibles’.
- En 1998 Imam [87], se presenta un estudio de optimización de la forma del shell de simetría axial en forma de paraguas de espesor variable con el peso propio como la carga dominante. Se pone de relieve la importancia de la selección apropiada de las variables de diseño. Se describe un algoritmo de forma desarrollado para la este caso particular, que genera las formas y las mallas representativas de elementos finitos, mientras que excluye las formas inaceptables. El criterio de diseño adoptado para el hormigón implica limitaciones en los esfuerzos principales en los puntos críticos, y la evaluación del requisito de resistencia a la compresión uniaxial utilizando un criterio de fallo. Las formas óptimas se obtienen de 4 m de diámetro lo que demuestra que la optimización es necesaria como una herramienta indispensable para obtener un diseño más viable para este tipo de problemas. Se lleva a cabo un estudio de la sensibilidad de las variables implicadas en el problema de optimización, del que se desprende que las variables fundamentales van ligadas al caso de carga estudiado, si cambia el caso de carga, las variables activas de diseño son otras.

- En 1998 Fadaee [88], estudia la optimización económica de estructuras de hormigón armado en tres dimensiones mediante la aplicación del método Optimality Criteria (OC). Las variables consideradas son la geometría y armado en vigas, espesor y área de armadura de refuerzo vertical, distancia horizontal entre estribos verticales y área de refuerzo a flexión vertical en las pantallas. Para la evaluación de la función objetivo se consideran el coste de hormigón, acero y encofrado de estructura.
- En 1999 Park [89], muestra un procedimiento de cálculo para el diseño óptimo conceptual multi-criterio de edificios sujetos a especificaciones y requisitos. Se consideran dos funciones objetivo, coste económico a través de la minimización de una función que define los costos combinados del sistema estructural del edificio y los terrenos para la obra, y la flexibilidad de uso suelo-espacio, que es un criterio cualitativo que se da una forma cuantitativa mediante la minimización de una función exponencial que relaciona zona de carga en relación a la separación de pilares. Se aplica un algoritmo genético multi-criterio (MGA). Se aplica para resolver el diseño conceptual biobjetivo edificio y problema de diseño, utilizando la teoría de Pareto. Se demuestra que el proceso de MGA es similar al algoritmo genético simple, excepto que la evaluación de la aptitud de los diseños candidatos se basa en una distancia métrica relacionada con el conjunto Pareto óptimo. Una técnica variable de mutación se introdujo para mantener la diversidad genética y para acelerar la búsqueda estocástica para alcanzar el óptimo global.
- En 2003 Leps y Sejnoha [90], estudian la optimización económica de vigas de dos vanos de hormigón armado, mediante la aplicación de la técnica de Augmented Simulated Annealing que combina el SA con el GA, utiliza el principio del SA pero trabajando con una población de soluciones (en vez de con una única solución) y las nuevas soluciones se obtienen a partir de las existentes mediante la aplicación de los operadores genéticos (y no mediante movimientos). La aplicación de este método la justifican ante la posibilidad de poder mejorar los resultados obtenidos utilizando únicamente GA. En el coste de la estructura no consideran el encofrado ni las cimbras, las comprobaciones se realizan para un único estado de carga y no consideran como variable el tipo de hormigón ni contemplan la posibilidad de que las armaduras longitudinales se adapten a los momentos flectores según las secciones, siendo este armado constante y simétrico.
- En 2003 Lee y Ahn [91] utilizaron GA, incluyendo una estrategia elitista, para el diseño optimizado de pórticos de hormigón armado. Los casos de carga utilizados son los de la normativa norteamericana (International Conference of Building Officials, 1997). El algoritmo sólo puede utilizar ciertas vigas y pilares dispuestos en una base de datos, lo que reduce el espacio de soluciones y la posibilidad de variación de la armadura en una viga o pilar a lo largo del mis-

mo. Sólo se consideran los esfuerzos de flexión de ELU, sin considerar ni el cortante, ni los ELS de deformación y fisuración.

- En 2003 Camp et al. [92], optimizaron diversas estructuras planas de hormigón armado mediante GA. A diferencia de Lee y Ahn (2003), las flechas de las vigas se verifican a través de la imposición de un canto mínimo, y tampoco consideran, ni ELS de fisuración, ni la posibilidad de disponer varios tipos de hormigón. Disponen los pilares de una misma alineación, iguales para todas las plantas y mismo armado longitudinal para todas las vigas de una misma planta.
- En 2004 Fairbairn [93], estudian la aplicación de técnicas de GA para la optimización de estructuras de hormigón en masa. La función objetivo evaluada es el coste económico. Se aplica al caso de una presa de gravedad, resuelta con hormigón en masa.
- En 2004 Kong [94], estudia la optimización del peso de un edificio de hormigón armado. Las variables consideradas son la geometría de vigas y soportes pero no el armado de ambos. La única restricción considerada es el desplazamiento relativo entre plantas.
- En 2004 Miyamoto et al. [95], aplicaron algoritmos inmunes (IA) y GA en la optimización de losas de hormigón armado comparando los resultados obtenidos. Los IA nacen de la idea de que en GA la diversidad de la población desaparece rápidamente en el proceso de búsqueda e intentan mantenerla para evitar que la solución converja de manera prematura. Los resultados obtenidos mediante IA son satisfactorios.
- En 2004 Carrera [96] y en 2005 Carrera et al. [97] y [98], utilizaron FB (Gradiente First Best), SA y TA (Threshold Accepting) para optimizar pórticos de hormigón armado de carretera. Los pórticos optimizados presentan cuantías de acero y esbelteces superiores a las habituales en este tipo de estructuras, por lo que se considera necesario realizar la comprobación a fatiga, deformaciones y vibraciones, lo que no es habitual en este tipo de estructuras. Obtienen los mejores resultados con el SA.
- En 2005 Liu [99], estudia el caso del mantenimiento de puentes de carretera, donde los administradores se enfrentan a cada vez a la tarea dar prioridad las acciones de mantenimiento adecuadas al ciclo de vida útil previsto, para los mismos, con presupuestos limitados, y mantener de forma rentable la funcionalidad. Un escenario óptimo de mantenimiento debe cumplir con los requisitos especificados de equilibrio óptimo entre la vida útil, el cálculo de costos y el desempeño estructural. Este artículo presenta un procedimiento general de cálculo para dar prioridad a los esfuerzos de mantenimiento de una base anual para el deterioro de puentes de hormigón armado crucetas en un horizonte de

tiempo designado. El efecto de las incertidumbres asociadas a los procesos de deterioro del puente de cruceta con y sin intervenciones de mantenimiento se consideran por medio de la simulación de Monte Carlo, que permite predecir el rendimiento probabilísticamente estructural y ciclo de vida de los costes de mantenimiento. El problema resultante de optimización combinatoria se automatiza mediante un algoritmo genético multi-objetivo. Se obtiene un grupo de diferentes secuencias de las intervenciones de mantenimiento anuales que llevan a una solución de compromiso entre las condiciones, optimizando, la seguridad y ciclo de vida de los objetivos de costes.

- En 2004 y 2006 Perea [100] y [101] y Perea et al. [102] en 2007, estudian la optimización de marcos de hormigón armado de carreteras, mediante la aplicación de los algoritmos FB, Simulated Annealing, Tabu Search, TA, Old Bachelor Acceptance (OBA) y GA. Como conclusión establecen los marcos óptimos tienden a altas esbelteces y armados que obligaría a considerar restricciones no habitualmente consideradas en la práctica como la comprobación de deformación, fatiga y vibraciones. Se estudia un caso con el que se consiguen ahorros significativos.
- Perea et al. [104], en 2008, continua el estudio de optimización de marcos de hormigón armado de carreteras mediante el uso de algoritmos de SA, TA y un algoritmo híbrido que los combina con otro de TS. Los resultados obtenidos son los mismos ya incluidos en el estudio anterior. Finalmente se incluye un estudio paramétrico de diversos casos variando las variables de luz y cargas actuantes. Se incluyen dos ejemplos reales (ver Perea et al. (Perea de Dios)), sobre los que se alcanzan ahorros económicos en torno al 10%.
- En 2005 Carbonell [108] estudia la optimización del coste de estructuras de bóvedas de hormigón armado para pasos de carretera mediante la técnica de Simulated Annealing. Se incluye un ejemplo de aplicación donde se consiguen soluciones que presentan mejoras en el coste del orden de un 7.6%, en comparación con la misma estructura proyectada por un ingeniero experimentado.
- En 2007 Díaz [109], estudia en su tesis el diseño de losas y estructuras tipo cascara de hormigón armado. Inicialmente se presenta un breve resumen del estado del arte de los principales métodos propuestos para el cálculo de cada uno de estos tipos de elementos, así como de los modelos constitutivos desarrollados para simular el comportamiento 2D del HA. A continuación se describe un procedimiento que permite simular, a nivel de elemento diferencial 2-D, la relación esfuerzos-deformaciones, es decir, las matrices constitutivas de la laja y de losa de HA. Como aplicación de este procedimiento se propone un método de dimensionamiento basado en la minimización de la cuantía total de acero que es necesario disponer para resistir con seguridad un determinado conjunto de esfuerzos conocidos *a priori*. Finalmente, se implementa la ma-

triz constitutiva, obtenida anteriormente, dentro de una programación de elementos finitos para llevar a cabo un cálculo coherente de esfuerzos considerando el comportamiento real del material. El modelo teórico ha sido íntegramente programado en lenguaje matemático MatLab. En el trabajo se presentan un conjunto de ejemplos prácticos que reflejan la potencia y capacidad del modelo para analizar los diferentes tipos de elementos bidimensionales, es decir, lajas, losas y membranas, y se valora la forma en que es tratado el cálculo de este tipo de estructuras en las distintas normativas referentes a estructuras de HA.

- En 2007 y 2008 Carbonell et al. [110] [11], y en 2009 Carbonell [112], en su Tesis Doctoral, estudian la aplicación de los algoritmos de optimización de Simulated Annealing (SA) y TA en el diseño de bóvedas de hormigón armado para pasos de carretera. Se tienen en cuenta en el análisis hasta 21 variables de diseño entre las que se encuentra el tipo de hormigón a disponer. Como conclusiones se establece que los mejores resultados se obtienen con la técnica de . En el trabajo de Carbonell en 2009 se incluye un estudio de parametrización, modificando los valores de altura de tierras y luces.
- Sahab et al. [113] en 2005 realiza estudios de optimización de coste económico sobre estructuras de forjados tipo losa, transformando la estructura de tres dimensiones en una plana, mediante el uso de GA. El proceso de optimización tiene tres etapas: en la primera se obtiene el número óptimo de pilares mediante una búsqueda exhaustiva, en la segunda, empleando un algoritmo híbrido, se realiza la optimización de las dimensiones de las columnas y espesores de las losas, y en la tercera se busca el armado óptimo para la estructura. Este método se aplica a tres edificios diferentes, comparando los resultados obtenidos con los de un diseño convencional. La norma aplicada es el British Code of Practice (BS8110). No se consideran acciones horizontales aplicadas ni diferentes tipos de hormigón. Realizan un estudio comparativo entre los costes de pilares y forjados, dividiéndolos en hormigón, acero y mano de obra.
- En 2005 Govindaraj et al. [114] estudian la optimización económica de vigas de hormigón armado mediante la aplicación de GA. Las restricciones consideradas incluyen las condiciones de rotura, servicio, ductilidad, durabilidad y constructibilidad de las soluciones. Se incluyen como variables el canto de las vigas, seleccionando el armado correspondiente mediante la búsqueda en un catálogo de armados para posteriormente se arma a cortante. Las características del hormigón a utilizar permanecen constantes. Se incluyen ejemplos de un vano y de dos vanos continuos comparando los resultados obtenidos con los alcanzados por otros autores. Se incluye como conclusión que el método utilizado es adecuado para el cálculo de soluciones óptimas.



- En 2006 Rafiq et al. [115] desarrollaron una aplicación informática interactiva para la optimización de pilares sometidos a una carga axial y momentos en las dos direcciones mediante GA. La aplicación realiza, en primer lugar, una optimización del armado de la sección para los esfuerzos solicitantes mediante GA y a continuación el ingeniero proyectista puede modificar iterativamente esta configuración definiendo la zona del espacio de soluciones donde se debe centrar la búsqueda. Concluyen que aplicaciones de este tipo pueden servir de ayuda a los proyectistas y ser útiles como herramientas para conocer mejor el funcionamiento de las estructuras.
- Martínez en 2007 [116] y en 2008 [117] en su Tesis Doctoral, estudian la optimización de pilas rectangulares huecas de hormigón armado empleadas en viaductos, utilizando algoritmos de GA, ACO y TA. Las conclusiones arrojan los mejores resultados para el algoritmo de ACO. Como continuidad de estos trabajos Martínez et al. (Martínez Martín), en 2010 aportan un estudio comparativo entre la aplicación de los algoritmos de GA y TA con dos nuevas variantes del ACO. La mejor solución, comparada con un diseño realizado por experto, es un 33% más económica.
- En 2005 y 2007 Payá [121] y en 2006 y 2008 Payá et al. [120] [122], estudiaron la optimización de pórticos de edificación de hormigón armado mediante FB, SA, TA, GA y SMOSA (Método de Suppapitnarm para la Optimización Multiobjetivo mediante Cristalización Simulada). Los mejores resultados se obtienen mediante SA, heurística que utiliza para la realización de un estudio paramétrico de pórticos con diferente número de plantas y de vanos, dando las diversas características de los mismos. Realizan un estudio multiobjetivo mediante SMOSA en el que además de realizar la optimización desde el punto de vista de coste de la estructura, tienen en cuenta otros aspectos como la facilidad constructiva, la sostenibilidad ambiental (emisión de CO<sub>2</sub>) y un índice de seguridad global de la estructura. Como conclusiones del trabajo llegan a que el empleo de vigas planas supone un aumento considerable en el coste de las estructuras y que en el entorno de la solución optimizada, desde el punto de vista del coste económico, son posibles estructuras más fáciles de construir, más sostenibles y más seguras con incrementos de coste aceptables en la práctica. Payá et al. [123] de 2009 recoge los resultados de un algoritmo de cristalización simulada multiobjetivo para seis pórticos diferentes. En sus conclusiones estos autores destacan el importante sobre coste que suponen las vigas planas. Por el contrario, se detecta que es posible mejorar mucho el diseño en cuanto a facilidad constructiva, sostenibilidad y seguridad, sin que ello tenga una repercusión económica importante.
- En 2009 Martínez et al [156], estudian la aplicación de los algoritmos de TA y SA para la optimización económica de tableros de pasarelas de vigas artesa de hormigón pretensado. Como restricciones se tienen en cuenta lo ELU y ELS

contemplados en la instrucción española para el cálculo de las secciones. Como variables se incluyen distintos tipos de hormigones para viga y losa e incluye 4 niveles de pretensado. Para la evaluación del coste económico no se incluye el coste del transporte ni el de la colocación de la viga. Los resultados obtenidos se concluye que son fácilmente construibles.

- En 2009 Atabay [125] presentó la optimización de las dimensiones de muros de arriostamiento horizontal de edificios de hormigón armado. El autor pone un especial énfasis en las ventajas derivadas de emplear un método como los GA, que permiten la formulación discreta del problema. Además no necesitan la evaluación de derivadas ni integrales, lo que los simplifica notablemente.
- En 2009 Barakat et al. [126], estudian la optimización económica de depósitos cónicos de contención de agua, aplicando métodos de GA, SA y una técnica conocida como Shuffled Complex Evolution. En sus conclusiones los autores proporcionan reglas de diseño para este tipo de estructuras, detectando una importante sensibilidad a los precios de los materiales.
- En 2010 Alcalá [127] estudia la aplicación de técnicas de optimización mediante TA, SA y OBA para estructuras de tableros de puente con losa de hormigón postesado. Las restricciones consideradas incluyen los ELU, ELS y fatiga. En la evaluación de costes se incluyen los costes del cimbrado y encofrado. Como conclusión establece la obtención de resultados similares con las técnicas de TA y SA. También se incluye un estudio paramétrico, variando los valores de las luces y número de vanos en tipologías de pasos superiores de carreteras y ferrocarriles.
- En 1997 Koskisto [128] presenta un modelo de decisión para reducir al mínimo el coste del ciclo de vida de los elementos prefabricados de hormigón y de las estructuras, teniendo en cuenta el diseño del edificio, la fabricación, la construcción y procesos en su vida útil como un todo. El modelo de decisión usa los principios de análisis de ingeniería económica en condiciones de incertidumbre considerando de los costos y beneficios de la construcción, mantenimiento, reparación, y las consecuencias del fracaso. Los conceptos se ilustran para la planta de prefabricados de placas alveolares. Las variables de decisión pueden incluir parámetros relacionados con la calidad del hormigón, la tecnología de proceso de fabricación y mantenimiento. La solución óptima identifica los valores de las variables de decisión que resultan con un mínimo costo total esperado. Las restricciones de rendimiento, en forma de límites a la probabilidad de fallo a la flexión, el fallo por cortante, fisuras y deformación excesiva se formulan utilizando los principios de la teoría de la fiabilidad estructural.
- En 2004 Catallo [129], plantea la evaluación de la fiabilidad de las estructuras aporticadas prefabricadas de hormigón. Debido a las incertidumbres inevita-

bles tales como las dimensiones geométricas y las propiedades mecánicas que definen el problema estructural no puede evaluarse como cantidades deterministas. En este trabajo, estas incertidumbres se modelizan mediante un enfoque basado en la teoría difusa. El problema se formula en términos de factores de seguridad: la función de pertenencia en el intervalo de error se busca para varios Estados límites dados. Para cada nivel de incertidumbre, el problema de la confiabilidad se ve como un problema de lucha contra la optimización, donde las peores soluciones seguras se consiguen utilizando algoritmos genéticos.

- En 2004 Sgambi [130] plantea el diseño automático de placas alveolares. El diseño se basa en un procedimiento de optimización capaz de evaluar la forma de la sección transversal más eficaz. Este procedimiento hace uso explícito de los algoritmos genéticos, y en este proceso en particular, se tienen en cuenta tanto las tensiones causadas por las variables de sobrecargas, como los debidos a las fuerzas de pretensado. El primero se evaluó utilizando un modelo global de elementos finitos, mientras que el segundo se evaluó utilizando un modelo local de elementos finitos. La estructura del análisis se realizaron en el lenguaje de programación Fortran.
- Ahmadkhanlou [131], en 2005, presenta una formulación general para la optimización del coste de losas de uno o varios vanos de hormigón armado (RC) con condiciones de contorno variadas (apoyo simple, apoyo final con continuidad en un extremo, en ambos extremos, y final en voladizo) bajo el cumplimiento de todas las condiciones propuestas en el código de diseño del ACI. El problema se formulada como un problema de optimización variable entero - discontinuo con tres variables de diseño: el grosor de la losa, diámetro de las barras de acero de refuerzo, y la separación de las barras de refuerzo. La solución se obtiene en dos etapas. En la primera, el modelo de dinámica neural de Adeli y Park se use para obtener una solución óptima asumiendo variables continuas. Después, el problema es formulado como un problema de optimización entero - discontinuo mezclado y solucionado usando una técnica de perturbación para encontrar valores prácticos para las variables de diseño.
- Castilho [132], en 2005 estudia la optimización de forjados de placas alveolares mediante el uso de algoritmos genéticos (GA). Los resultados se presentan y se analizan para apoyar una discusión acerca de las ventajas y desventajas de las variaciones GAs propuestas en la búsqueda de la solución del problema
- En 2005 Hossain [133], aborda el proceso de predicción con elementos finitos aplicado al desarrollo de gráficos para determinar con exactitud la carga máxima de losas de hormigón armado con carga uniformemente distribuida, simplemente apoyadas. A través de una serie de estudios paramétricos, utilizando un modelo simple de hormigón, se lleva a cabo la simulación de cuatro losas simplemente apoyadas. Estas sirvieron como base para establecer un conjunto

de parámetros y condiciones óptimas de cómputo, lo que garantizaba una solución aceptable. La fiabilidad en los valores de los parámetros establecidos para fines de predicción fue verificada por la simulación directa de 11 losas de otros autores. Tras la verificación de la confiabilidad con éxito, el modelo de elementos finitos se utilizó para el análisis de 270 "modelos informáticos", de losas, con los resultados de las mismas se desarrollaron tablas. Estas tablas sirven para la determinar la carga de forma rápida y fiable pico de arbitrarias las losas simplemente apoyadas. Se observa que la predicción gráfica tiene una precisión de 4% en los resultados testados. También se estableció una estrategia para la determinación de desplazamiento, con el mismo grado de éxito.

- Castilho [155] en 2007, estudia la optimización de forjados de viguetas pretensadas con el uso de la técnica de algoritmos genéticos (GA), describiendo el uso de un GA modificado. Inicialmente se identifican todos los costes asociados a la producción de estos elementos. Los resultados obtenidos se comparan con los alcanzados con un método de optimización convencional.
- En 2008 Sahab [141], investiga la influencia del costo unitario de acero, hormigón y el encofrado y las características resistentes óptimas para el acero y el hormigón armado de forjados de losa. La optimización de los forjados de losa se basa en la aplicación de los criterios del British Code of Practice. La función objetivo evaluada es el coste económico total del edificio incluyendo el coste de los forjados, pilares, cimientos y excavación e incluye costes de material y mano de obra. El proceso de optimización se desarrolla en dos fases, una primera fase en la que se buscan las dimensiones óptimas para las secciones transversales de los elementos de hormigón armado, a través de un algoritmo híbrido basado en un algoritmo genético. En el segundo nivel se desarrolla una búsqueda exhaustiva para determinar el tamaño óptimo y el número de barras de acero para cada tipo individual de los elementos estructurales.
- En 2009 Noorzai et al. [134] hace hincapié en que la tecnología de prefabricados de hormigón forma una parte importante en el camino hacia una plena aplicación del Sistema de Construcción Industrializada (IBS). El IBS exige que los componentes de construcción así como sus dimensiones deben ser estandarizados y preferentemente construidos en plantas industriales. Así mismo asegura que las losas son los principales elementos estructurales de los edificios, sin olvidarse de las vigas y columnas. Una estandarización en las losas y la optimización puede mejorar significativamente a las industrias de la construcción en el logro de la plena aplicación del IBS. Sin embargo, esto requiere de técnicas de computación para lograr losas estandarizadas y optimizadas que pueden satisfacer todos los requisitos de diseño de edificios, incluidas las normas de diseño arquitectónico y estructural. Este estudio propone una técnica que analiza y diseñado cinco tipos diferentes de placas que cumplen todos los requisitos de diseño. Las placas más comúnmente utilizados que se incluyen

en este estudio fueron placas macizas unidireccionales, placa maciza con capacidad en dos direcciones, placas nervadas y losas mixtas. Las técnicas informáticas permiten el diseño de las secciones más optimizadas para cualquiera de los tipos de losas bajo cualquier condición de carga y duración de la misma. El software desarrollado también proporciona detalles de los refuerzos necesarios para las losas.

- En 2010 Marzouk [135] estudia la construcción de proyectos de vivienda de bajo coste como un proceso de repetitivo. Esta investigación presenta un esquema, mediante simulación por ordenador, que ayuda a las autoridades gubernamentales y contratistas en la planificación de proyectos de vivienda de bajos costes. Se evalúa el tiempo y costo requerido para la construcción de viviendas con prefabricado de placas alveolares y con muros de carga de bloques huecos. Se incluye un módulo de optimización donde se hace uso de un algoritmo genético.
- En 2012 Augusto [136] estudia el diseño integrado de estructuras de pisos prefabricados. En el diseño se incluye todas las fases del mismo, la conceptual, la de realización y la de definición de detalle. Se presenta un sistema integrado de diseño con herramientas de optimización, llamado DSSPF (Decision Support System para pisos prefabricados), con un algoritmo GA y considera el impacto de los costes en todas las fases de construcción tales como fabricación, transporte y montaje. A través de un ejemplo se muestra que los resultados DSSPF son muy buenos comparados los resultados de un diseño existente.
- En 2014 Donghun et al. [153] estudia la optimización de un pórtico de un vano, sometido a cargas verticales y horizontales debidas a viento. Se evalúan las funciones objetivo de coste económico y emisiones de CO<sub>2</sub>, determinándose que la reducción en la huella de CO<sub>2</sub> obtenida en la optimización en relación a los óptimos económicos, es del orden de un 5% a 15%. La reducción es menor para estructuras de poca altura, mientras que para edificios en altura, con fuertes cargas de compresión la reducción puede ser más significativa.
- En 2015 Marti, Yepes & Gonzalez [154], aplican Algoritmos Meméticos para la optimización en el diseño de puentes de carretera pretensado, valorando la influencia de la disposición de fibras. Se incluye la consideración de 41 variables en el problema, incluyendo materiales, geometrías y acero activo y pasivo. El uso de fibras en las vigas implica una reducción media del 0.86% y del 2.41% en el espesor de la losa y en el canto de las vigas respectivamente.

#### **4.4.3 Cimentaciones y muros de contención.**

Por último, se incluyen las referencias bibliográficas más relevantes en el ámbito de la optimización mediante técnicas heurísticas de cimentaciones o muros de contención de

hormigón armado, que son las que presentan mayor relación con el tema de estudio de la presente tesis.

- B. Ceranic, C. Fryer y R.W. Baines [140], en 2001, publican un estudio sobre la aplicación del algoritmo Modificado de **Simulated Annealing**, para el diseño óptimo de muros de contención de hormigón armado. La función objetivo adoptada es la de minimizar el coste económico de la solución. El modelo de cálculo adoptado incluye la disposición de una ley de presiones sobre el terreno de tipo lineal. Las conclusiones del estudio indican que se han obtenido buenos resultados utilizando una temperatura inicial en el algoritmo, estimada mediante experimentos aleatorios, mostrando un ritmo más rápido de convergencia. Por otro lado la bondad del algoritmo depende más de la velocidad relativa de enfriamiento que de la reducción de la temperatura absoluta.

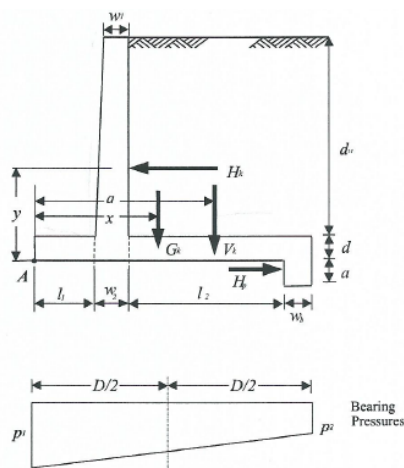


Figura 4.5. Modelo de cálculo muro contención. Ceranic et al. [140].

- En 2004 Sahab et al [141], presentan un algoritmo de optimización basado en la técnica de GA para la optimización de estructuras con forjados tipo losa. En una primera fase se obtiene el número óptimo de soportes mediante la aplicación de técnicas de GA modificada, mientras que en una segunda fase se localizan las dimensiones óptimas de la solución mediante la aplicación de GA. La función objetivo evaluada es el coste económico para lo que se considera el coste del hormigón, mano de obra, acero de refuerzo, y excavación de las cimentaciones. El coste de la cimentación se estima aproximadamente asumiendo que todas las zapatas son iguales. No se considera como variables el tipo de hormigón ni las acciones horizontales en la estructura.

- En 2005 Alcalá et al. [105] estudian la optimización mediante técnicas de FB y SA de muros ménsula de hormigón armado. Establecen como conclusión la bondad del algoritmo de SA para la obtención de buenas soluciones así como los valores relevantes de esbeltez obtenidos en las soluciones alcanzadas, con valores por encima de la práctica habitual para este tipo de estructuras. Como consecuencia de ello determinan la necesidad de limitar la flechas admisibles en cabeza de muros. Como continuación de este trabajo, Yepes et al. [107] presentan en 2007 un estudio paramétrico de muros ménsula, dando tablas de predimensionamientos para muros con diferentes alturas de tierras y distintos terrenos. Se establece como conclusiones del trabajo la poca influencia del tipo del terreno en el coste final del muro.
- En 2005 y 2007 Yepes et al. [105] [106] [107], aplicaron la cristalización simulada para la optimización de muros ménsula de hormigón armado. Para la definición del problema se incluyen 22 variables, que incluyen las asociadas a la geometría del muro, los materiales de acero y hormigón y los armados a disponer. Se incluye entre las restricciones el análisis de los límites de flechas. Como conclusión, indican la necesidad de disponer hormigones de baja resistencia (25 MPa) y aceros de alta resistencia (500 Mpa), así como la no necesidad de armadura de cortante en todos los casos. Finalmente se incluye un estudio paramétrico que aporta reglas para el predimensionado de estas estructuras, en función de la altura, las condiciones de empujes del relleno y las condiciones de cimentación.
- En 2008, Wang [142], publica un estudio sobre la optimización económica en el diseño de cimentaciones resueltas mediante zapatas aisladas sometidas a cargas verticales. La función objetivo evaluada es el coste económico, donde se incluyen los costes económicos relativos a la excavación, encofrado, armado, hormigonado y relleno y compactación de cada solución de cimiento. El diseño se realiza verificando los Estados límites de Servicio (Capacidad última del terreno y asiento máximo del mismo). Las variables consideradas son la geométrica de la solución, (Ancho, Largo y canto) y para su resolución se hace uso de la aplicación informática ‘solver’ de Excel. Esta aplicación hace uso del **Método no lineal del gradiente para su resolución (GRC2)**, desarrollado por Leon Lasdon, de la Universidad de Texas en Austin, y Alan Waren, de la Universidad de Cleveland. En el artículo se desarrollan varios ejemplos y se realiza un estudio de sensibilidad de diversos parámetros del terreno como son el coeficiente de poisson, módulo de Young, Angulo de rozamiento del terreno o peso específico del mismo. Las conclusiones del estudio confirman la obtención de soluciones hasta un 30% más óptimas que las obtenidas con métodos de diseño convencionales y determinan que los coeficientes que condicionan la obtención del óptimo son el Módulo de Young y el Angulo de rozamiento interno del terreno.

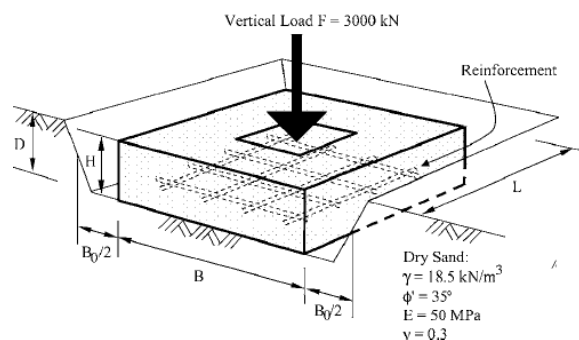


Figura 4.6. Modelo de cálculo zapata. Wang [142].

- En 2009, Wang [143], como complemento de su anterior artículo, publica un nuevo estudio sobre la optimización económica en el diseño de cimentaciones resueltas mediante zapatas aisladas sometidas a cargas verticales de levantamiento. El desarrollo y conclusiones del mismo coinciden con las de su primer artículo realizado para zapatas aisladas bajo cargas de compresión.

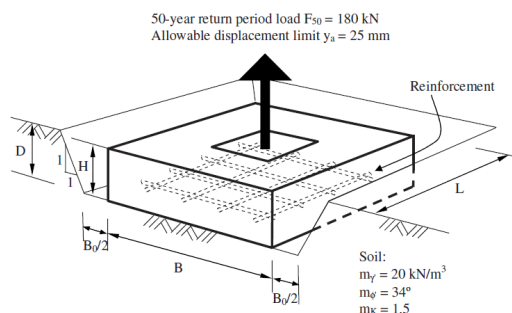


Figura 4.7. Modelo de cálculo zapata. Wang [143].

- En 2009, Chan et al. [144], aplican una metodología de optimización basada en **Algoritmos Genéticos Híbridos (Hybrid GA)**, sobre una cimentación mediante pilotes. La función objetivo evaluada es la obtención del mínimo peso de la solución. El estudio incluye varios ejemplos de aplicación, sometidos a cargas verticales y a cargas verticales más horizontales. Como conclusiones, se establece que el algoritmo de optimización presentado es capaz de localizar soluciones que minimizan el volumen total de la solución y es aplicable a los problemas de diseño reales con diferentes combinaciones de cargas.
- Khajehzadeh, Taha & El-Shafie [145] en 2011 aplican la técnica de optimización “**Modified particle swarm (MPSO)**” para la obtención de diseños óptimos de cimentaciones aisladas y muros de contención, técnica de la que desta-



can su facilidad de implantación y su rápida convergencia. Se establece como función objetivo el coste económico, evaluando los mismos parámetros indicados por Wang [142]. Se incluye un ejemplo de zapata aislada ante carga vertical ya evaluado por Wang [142], así como un ejemplo de zapata aislada sometida a carga vertical y momento en un plano y un ejemplo para muro de contención. Las conclusiones del estudio incluyen para el primer ejemplo de zapata aislada, la comparativa con los resultados obtenidos por Wang [142], verificando que mediante la técnica MPSO se obtienen mejores resultados y en tiempos de cálculo inferiores. También se incluye un análisis de sensibilidad de variables, confirmando las mismas conclusiones aportadas en su estudio por Wang [142] anteriormente.

- 1) Los parámetros más influyentes para la determinación del óptimo económico son el Módulo de Young y el Angulo de rozamiento del terreno de apoyo.
- 2) El factor de seguridad condiciona la solución óptima de zapatas cuando el Angulo de rozamiento interno del terreno es bajo, mientras que el límite de asiento condiciona la solución óptima para valores altos del mismo.
- 3) En el caso de muros de contención, el Angulo de rozamiento es el parámetro condicionante especialmente cuando la altura del muro se incrementa.

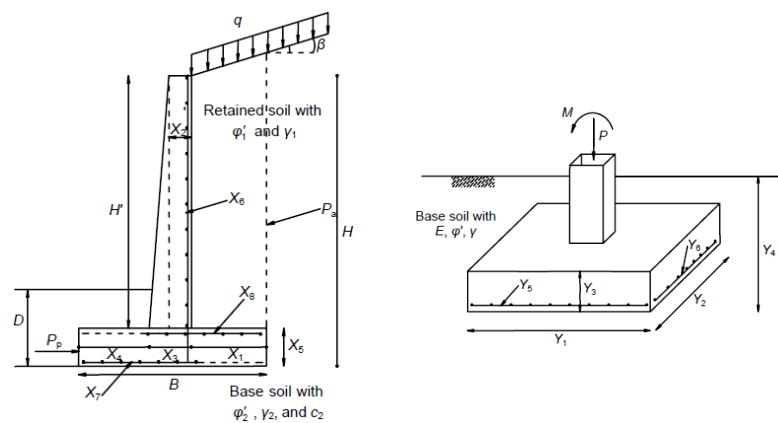


Figura 4.8. Modelo de cálculo zapata/muro contención. Khajehzadeb et al. [145].

- En 2011, Mohammad Khajehzadeh & Mohd, Raihan Taha & Ahmed El-Shafie & Mahdiyeh Eslami [146], publican el artículo ‘Economic design of foundation using harmony search algorithm’, donde analizan la aplicación de la técnica heurística ‘**Harmony Search (HS)**’ para la obtención del óptimo econó-

mico de una zapata aislada sometida a un esfuerzo axial y un momento. En el análisis estructural del cimiento se tienen en cuenta tanto los requerimientos geotécnicos como los estructurales. Para la evaluación del óptimo económico se tienen en cuenta los costes de la excavación, encofrado, hormigón, acero y relleno y compactación. Se incluyen dos ejemplos de análisis, uno sometido únicamente a carga vertical y otro sometido a carga vertical y momento, aplicándose tanto la heurística (HS), como la resolución por Algoritmos Genéticos (GA). Se concluye, que el algoritmo propuesto (HS), es un método efectivo para la localización del óptimo económico, presentando mejor exactitud y eficiencia que el algoritmo GA.

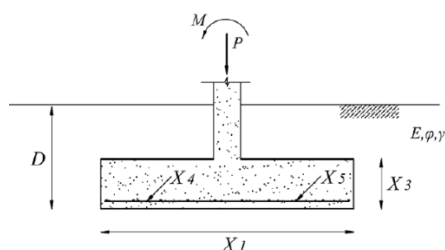


Figura 4.9. Variables de diseño. Algoritmo HS. Khajezadeh [146].

- En 2012, Mohammad Khajezadeh & Mohd Raihan Taha & Ahmed El-Shafie & Mahdiyeh Eslami [147], estudian la aplicación del algoritmo **Gravitational Search Algorithm (GSA)**, para la localización del óptimo económico de una zapata aislada sometida a carga vertical y momento. En el análisis estructural del cimiento se tienen en cuenta tanto los requerimientos geotécnicos como los estructurales. Para la evaluación del óptimo económico se tienen en cuenta los costes de la excavación, encofrado, hormigón, acero y relleno y compactación. Se incluyen dos ejemplos de análisis, uno sometido únicamente a carga vertical y otro sometido a carga vertical y momento, aplicándose tanto la heurística (GSA), como la resolución por Algoritmos Genéticos (GA). Se concluye que el algoritmo propuesto (GSA), es un método efectivo para la localización del óptimo económico, presentando mejor exactitud y eficiencia que el GA.

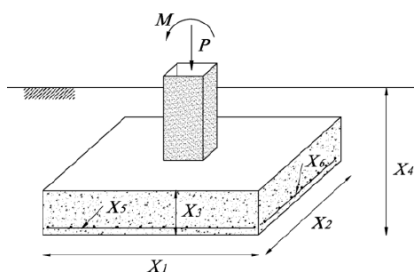


Figura 4.10. Variables de diseño. Algoritmo GSA. Khajezadeh et al. [147].

- Camp & Akin [148], en 2012 publican un estudio de optimización de muros de contención mediante la aplicación de la técnica heurística, **Big Bang Big Crunch (BB-BC)**. Las funciones objetivo evaluadas son el mínimo coste económico y el mínimo peso de la solución. Como conclusión, se establece que el algoritmo estudiado es eficiente y capaz de generar soluciones óptimas. Del estudio de sensibilidad realizado se establece que la función objetivo coste económico, es muy sensible a los cambios en las variables, sobrecargas actuantes, Angulo de rozamiento interno del terreno y pendiente del relleno. Además, las soluciones presentan una ligera disminución de coste en los casos en que se disponen una ‘llave de cortante’.

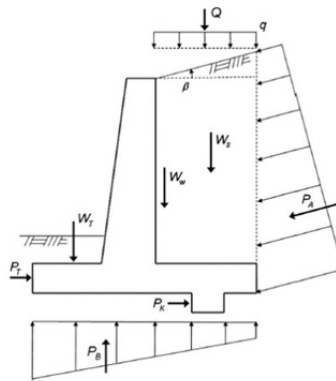


Figura 4.11. Modelo de cálculo zapata. Camp et al. [148]

- En 2013, Camp & Assadollahi [149], publica un artículo sobre la optimización multiobjetivo de cimentaciones sometidas a cargas uniaxiales. En él se consideran dos funciones objetivo, coste económico y emisiones de CO<sub>2</sub>, aplicando el algoritmo de optimización **Hybrid Big Bang Big Crunch**. Para ambas funciones objetivo, se tienen en cuenta los costes de excavación, encofrado, acero de refuerzo, hormigón y relleno y compactación final. El análisis se realiza sobre zapatas aisladas rectangulares sometidas a cargas verticales, suponiendo una distribución lineal de tensiones en el terreno. Se incluye el análisis de un ejemplo de zapata aislada, coincidente con el recogido por Wang [142] en su estudio. El estudio concluye demostrando la capacidad del algoritmo de localizar los óptimos, tanto económicos como de emisiones de CO<sub>2</sub>. Se demuestra, a sí mismo, la relación existente entre las funciones de coste económico y emisiones de CO<sub>2</sub>. Finalmente, el estudio de sensibilidad realizado concluye que las dos funciones objetivo analizadas son muy sensibles a las variables, Carga aplicada, módulo de elasticidad del terreno, máximo asiento permitido y resistencia del hormigón.

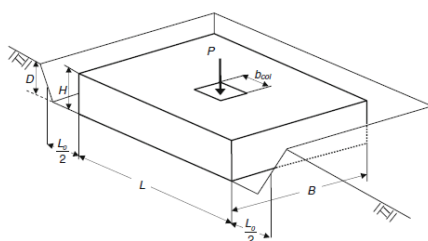


Figura 4.12. Modelo de cálculo zapata. Camp et al. [149]

- En 2013, Khajehzdeh & Raihan & Esiami [150] estudian la aplicación de un nuevo algoritmo heurístico, “**Hybrid Firefly algorithm (FaSqp)**”, para la optimización de cimentaciones a base de zapatas aisladas sometidas a cargas verticales y momentos en un plano. El algoritmo combina la heurística “Firefly FA” y el algoritmo SQP. El modelo de cálculo se basa en la distribución lineal de tensiones, no permitiendo que existan zonas del cimiento sin tensión. El estudio evalúa dos funciones objetivo, el coste económico y la emisión de CO<sub>2</sub>. Se desarrollan dos ejemplos, uno en el que solo actúan cargas verticales y un segundo ejemplo sometido a carga vertical y momento, resueltos tanto con el algoritmo original FA y la nueva propuesta FaSqp. Como resultado se establece que el nuevo algoritmo presenta grandes ventajas en cuanto a la precisión, ratio de convergencia, estabilidad y robustez en relación al original FA.

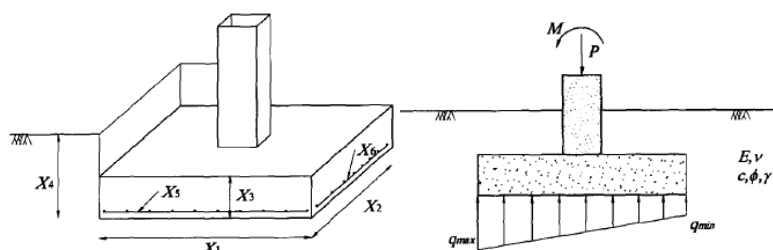
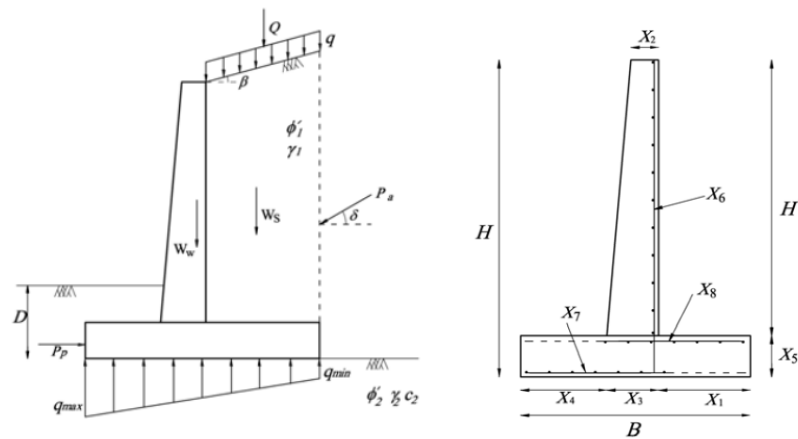


Figura 4.13. Modelo de cálculo zapata. Khajehzdeh et al [145].

- 2013. Mohammad Khajehzadeh, Mohd Raihan Taha & Mahdiyeh Eslami [151], estudian la aplicación de una nueva versión del algoritmo ‘Gravitational search (GSA)’, basada en el aprendizaje de opuestos, denominada ‘**Opposition-based gravitational search (OBGSA)**’ para la optimización de soluciones de muros de contención. El estudio evalúa tres funciones objetivo, el peso total de la solución, el coste económico y las emisiones de CO<sub>2</sub>. El desarrolla dos ejemplos, aplicando tanto la heurística (OBGSA) como la (GSA), concluyendo que el algoritmo (OBGSA) presenta mejores parámetros precisión, de ratio de convergencia, estabilidad y robustez que el algoritmo tradi-

cional (GSA). En cuanto a las funciones objetivo, se concluye que las funciones ‘Coste económico’ y ‘Emisiones de CO<sub>2</sub>’ están relacionadas.



Fuente: Mohammad Khajezadeh (2013)

Figura 4.14. Variables y Modelo de cálculo. Khajezadeh et al. [151].

- En 2015, Camp & Assadollahi [152] publica un artículo sobre la optimización multiobjetivo de cimentaciones sometidas a cargas uniaxiales, continuación del ya publicado en 2013. En él se consideran dos funciones objetivo, coste económico y emisiones de CO<sub>2</sub>, aplicando el algoritmo de optimización ‘**Big Bang Big Crunch**’. Para ambas funciones objetivo se tienen en cuenta los costes de excavación, encofrado, acero de refuerzo, hormigón y relleno y compactación final. El análisis se realiza sobre zapatas aisladas rectangulares sometidas a cargas en un solo plano (Axil y momento), suponiendo una distribución lineal de tensiones en el terreno y se evalúan mediante dos modelos de cálculo, uno simplificado, que se indica es habitualmente utilizado en la práctica, donde se impone que toda la zapata este en compresión y un segundo análisis que si permite que existan zonas de zapata que no estén en compresión. El estudio concluye con la obtención de un ahorro tanto económico como de emisiones de CO<sub>2</sub> para las soluciones obtenidas mediante el segundo modelo de análisis. Por otro lado se demuestra la relación existente entre las dos funciones objetivo analizadas.

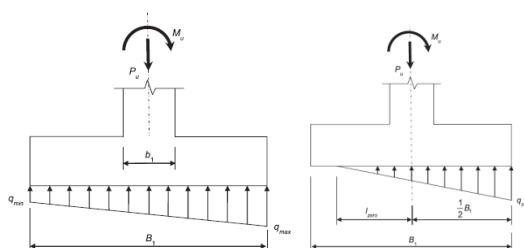


Figura 4.15. Modelo de tensiones transmitidas por zapata. Camp et al. [152].

#### 4.5 Resumen y conclusiones.

Tras la revisión realizada acerca del estado del arte de la optimización de estructuras de cimentación, permite concluir que al contrario de lo que ocurre con otros elementos o sistemas estructurales, la optimización de cimentaciones ha sido muy limitada, centrándose los estudios mayoritariamente en la optimización de zapatas aisladas sometidas a cargas verticales o a cargas verticales y momentos. Por otro lado, en todos los casos, los estudios se han realizado aplicando un modelo de cimiento rígido, incluyendo la optimización de funciones objetivo de coste económico o funciones medioambientales.

#### 4.6 Referencias bibliográficas.

- [1]. H. C. Adeli, & N.T. (1994). *Augmented lagrangian genetic algorithm for structural optimization*. ASCE Journal of Aerospace Engineering, vol. 7.
- [2]. G. Galilei linceo. (1638). *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenenti alla meccanica i movimenti locali*. Leida.
- [3]. C. Maxwell,. (1869). *Scientific Papers 2*. DoverPublications, pp. 175-177.
- [4]. M. M. Levy. (1874). *La statique et ses applications aux constructions*. Paris: Gauthier-Villars.
- [5]. A. G. M. Mitchell. (1904). *The limits of economy of material in frame structures*. Philosophical Magazine, vol. 6, pp. 589-597.
- [6]. F. Navarrina Martínez. (1987). *Una metodología general para optimización estructural en diseño asistido por ordenador*. Departament de Matemàtica Aplicada III, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- [7]. B. Klein. (1955). *Direct use of extremal principles in solving certain optimization problems involving inequalities*. Journal of the Operations Research Society of America, vol. 3, pp. 168-176.

- 
- [8]. L. A. Schmidt. (1960). *Structural design by systematic synthesis*. in 2nd Conference on Electronic Computation, New York, pp. 105-132
- [9]. W. Karush. (1939). *Minima of functions of several variables with inequalities as side constraints*, in Department of Mathematics, ed. Chicago
- [10]. H. W. T. Kuhn A. W.. (1951). *Nonlinear programming*. in Proceedings of 2nd Berkeley Symposium, Berkeley
- [11]. . D. E. S. Goldberg, M.P. (1986). *Engineering optimization via genetic algorithms*. ASCE Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computation, pp. 471-483.
- [12]. P. L. Hajela, E. (1995). *Genetic algorithms in truss topological optimization*. International Journal Solids Structures, vol. 32, pp. 3341-3358.
- [13]. P. Hajela. (1990). *Genetic Search - An Approach to the Nonconvex Optimization Problem*. AIAA Journal, vol. 26, pp. 1205-1211.
- [14]. W. M. Jenkins. (1991). *Structural optimisation with the genetic algorithm*. The Structural Engineer, vol. 69, pp. 418-423.
- [15]. W. M. Jenkins. (1991). *Improving structural design by genetic search*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 13, pp. 5-11.
- [16]. S. K. Rajeev, C.S. (1998). *Genetic algorithm-baesd methodology for design optimization of reinforced concrete frames*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,, vol. 13, pp. 63-74..
- [17]. G. G. B. B. Torres, J.F. & Cornell, C.A. (1966). *A program for the optimum design of prestressed concrete highway bridges*. PCI Journal, vol. 11, pp. 63-71.
- [18]. G. G. Goble. (1971). *Optimum design of prestressed beams*. Journals Proceedings ACI, vol. 68, pp. 712-719.
- [19]. F. R. Johnson Jr. (1972). *An interactive design algorithm for prestressed concrete girders*. Computers & Structures, vol. 2, pp. 1075-1089.
- [20]. P. Terrell Nash. (1972). *A parametric study of concrete slab system design*. Faculty of Texas Tech University, Texas Tech University.
- [21]. U. Kirsch. (1972). *Optimum design of prestressed beams*. Computers and Structures, vol. 2, pp. 573-583-
- [22]. D. Bond. (1974). *The optimum design of concrete structures*. Engineering Optimization, vol. 1, pp. 17-28.
- [23]. A. E. Naaman. (1976). *Minimum cost versus minimum weight of prestressed slabs*. ASCE J Struct Div, vol. 102, pp. 1493-1505.

- [24]. S. Ramamurthy. (1978). *Optimum design of prestressed concrete slabs using primal geometric programming*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 13, pp. 229-247.
- [25]. J. J. Moragues Terrades (1980). *Diseño óptimo de estructuras aporricadas de hormigón armado*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [26]. M. Z. M. Cohn, A.J. (1984). *Optimization of structural concrete beams*. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 110, pp. 1573-1589.
- [27]. V. E. M. Saouma, R.S. (1984). *Partially prestressed concrete beam optimization*. Journal of Structural Engineering, vol. 110, pp. 589-605.
- [28]. H. L. Jones. (1985). *Minimum cost prestressed concrete beam design*. Journal of Structural Engineering, vol. 111, pp. 2464-2479.
- [29]. R. H. Plaut. (1987). *Optimal beam and plate foundations for minimum compliance*. Journal of Applied Mechanics, vol. 54, pp. 255-257.
- [30]. A. A. Prakash, S. K. & Singh, K. K.. (1988). *Optimum design of reinforced concrete sections*, Computers & Structures, vol. 30, pp. 1009-1011.
- [31]. B. L. K. Karihaloo, S. (1989). *Minimum-weight design of structural frames*. Computers & Structures, vol. 31, pp. 647-655.
- [32]. S. K. Kanagasundaram, B. L. (1991). *Minimum-cost design of reinforced concrete structures*, Computers & Structures, vol. 41, pp. 1357-1364..
- [33]. M. A. Samartín A. & Utrilla, *Optimization of prestressed concrete bridge decks (technical note)*. Computers & Structures, vol. 41, pp. 553-560.
- [34]. M. Gasch Salvador- (1991). *Optimización de estructuras de forjados reticulares*, Departamento de Mecánica del Medio Continuo y Teoría de Estructuras Universidad Politecnica de Valencia, Valencia.
- [35]. B. K. Chakraberty. (1992). *Models for Optimal Design of reinforced Concrete Beams*. Computers & Structures, vol. 42, pp. 447-451.
- [36]. F. Z. Erbatur, R. Al & Dahman, N. A. (1992). *Optimization and sensitivity of prestressed concrete beams*. Computers & Structures, vol. 45, pp. 881-886.
- [37]. M. Z. L. Cohn, Z. (1993). *Optimum limit design of continuous prestressed concrete beams*. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 119, pp. 3551-3571.
- [38]. Z. C. Lounis, M.Z. (1993). *Multiobjective optimization of prestressed concrete structures*. Journal of Structural Engineering, vol. 119, pp. 794-808.



- [39]. M. Z. L. Cohn, Z (1994). *Optimal design of structural concrete bridge systems*. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 120, pp. 2653-2673.
- [40]. M. Z. Cohn, & Dinovitzer, A.S. (1994). *Application of structural optimization*. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 120, pp. 617-651.
- [41]. A. S. A.-S. Al-Gahtani, S.S. & Abul-Feilat, E.A. (1995). *Design optimization of continuous partially prestressed concrete beams*. Computers & Structures vol. 55, ed, 1995, pp. 365-371
- [42]. A. C. C. Aparicio, J.R. & Ramos, G. (1996). *Computer aided design of prestressed concrete highway Bridges*. Computers & Structures, vol. 60, pp. 957-969.
- [43]. R. Y. Balling, X. (1997). *Optimization of reinforced concrete frames*. ASCE Journal of Structural Engineering vol. 123, pp. 193-202.
- [44]. Z. M. Lounis, M. S. & Cohn, M.Z. (1997). *Segmental and conventional precast prestressed concrete I-bridge girders*. Journal of bridge engineering, vol. 2, pp. 73-83.
- [45]. V. K. A. Koumoussis, S.J. (1998). *Genetic algorithms in optimal detailed design of reinforced concrete members*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 13, pp. 43-52.
- [46]. S. S. Rizzo, R. & Giambanco, G.. (2000). *Shakedown optimal design of reinforced concrete structures by evolution strategies*. Engineering Computations, vol. 17, pp. 440-458.
- [47]. C. C. B. Ferreira & M.H.F.M. & Barros & A.F.M. (2003). *Optimal design of reinforced concrete T-sections in bending*. Engineering Structures, vol. 25, pp. 951-964.
- [48]. M. Torrano. (2003). *Diseño óptimo de secciones y elementos estructurales de hormigón armado*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Murcia.
- [49]. S. K. Barakat, N; Taha, M.Q. (2003). *Single objective reliability-based optimization of prestressed concrete beams*. Computers & Structures, vol. 81, pp. 2501-2513.
- [50]. A. A. F. Al-Harthy, D.M. (1994). *Reliability-based design of prestressed concrete beams*. Journal of Structural Engineering, vol. 120, pp. 3156-3178-
- [51]. F. T. Bayramov, C. & Tasdemir, M.A.. (2004). *Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method*. Cement & Concrete Composites, vol. 26, pp. 665-675.

- [52]. S. B.-H. Barakat, K. & Taha, M.Q. (2004). *Multi-objective reliability-based optimization of prestressed concrete beams*. Structural Safety, vol. 26, pp. 311-344.
- [53]. G. F. A. Sirca Jr., H. (2005). *Cost optimization of prestressed concrete bridges*, Journal of Structural Engineering, vol. 131, pp. 380-389.
- [54]. S. E. V. Rodrigues Junior, L. & Barbosa Guimaraes, G. (2005). *Optimum design of tall buildings in reinforced concrete subjected to wind forces*. in 6th Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro.
- [55]. T. M. Zou, S. (2006). *A direct decoupling approach for efficient reliability-based design optimization*. Struct Multidisc Optim, vol. 31, pp. 190-200.
- [56]. T. H. Hong, M. (2007). *Evaluation and determination of optimal MR&R strategies in concrete bridge decks*. Automation in Construction, vol. 16, pp. 165-175.
- [57]. M. H.-M. Aschheim, E. & Gil-Martín, L.M. (2007). *Optimal domains for strength design of rectangular sections for axial load and moment according to Eurocode 2*. Engineering Structures, vol. 29, pp. 1752-1760.
- [58]. V. R. Srinivas, K. (2007). *An integrated approach for optimum design of bridge decks using genetic algorithms and artificial neural networks*. Advances in Engineering Software, vol. 38, pp. 475-488.
- [59]. H. G. K. Kwak, J. (2008). *Optimum design of reinforced concrete plane frames based on predetermined section database*. Computer-Aided Design, vol. 40, pp. 396-408..
- [60]. H. C. Narasimhan, M.Y.L. (2009). *Integration of durability with structural design: An optimal life cycle cost based design procedure for reinforced concrete structures*. Construction and Building Materials, vol. 23, pp. 918-929.
- [61]. F. F. Biondini, D.M. (2009). *Lifetime reliability-based optimization of reinforced concrete cross-sections under corrosion*. Structural Safety, vol. 31, pp. 483-489.
- [62]. S. F. Hernandez, A.N. & Diaz, J.; Marcos, D. (2010). *VTOP. An improved software for design optimization of prestressed concrete beams*. Advances in Engineering Software, vol. 41, pp. 415-422.
- [63]. H. Malekly. (2010). *A fuzzy integrated methodology for evaluating conceptual bridge design*. Expert Systems with Applications, vol. 10.1016

- 
- [64]. M. R. Hannan & Johnson, G.E. & Hammond C. R. (1993). *A general strategy for the optimal design of reinforced concrete footings to support wind loaded structures*. Journal of Mechanical Design, vol. 115, pp. 751-756.
- [65]. M. J. G. Fadaee, D. E. (1999).. *Optimum design of pile-supported reinforced concrete footings*. Optimization and Control in Civil and Structural Engineering, pp. 147-151
- [66]. R. Balling. (1991). *Optimal steel frame design by simulated annealing*, ASCE Journal of Structural Engineering vol. 117, pp. 1780-1795.
- [67]. H. K. Adeli, S. (1995). *Distributed genetic algorithm for structural optimization*. ASCE Journal of Aerospace Engineering, vol. 8.
- [68]. A. Coello Coello. (1994). *Uso de Algoritmos Genéticos para el Diseño Optimo de Armadura*. presented at the Congreso Nacional de Informática “Herramientas Estratégicas para los Mercados Globales”.
- [69]. A. C. Coello, A. D. & Santos Hernández, S. (1997). *A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams*. Engineering with Computers, vol. 13, pp. 185-197.
- [70]. A. S. Chattopadhyay, C. E. (1994). *A Simulated annealing technique for multiobjective optimization of intelligent structures*. Smart Mater. Struct, pp. 98-106.
- [71]. S. S. S. Manoharan. (2003). *A comparison of search mechanisms for structural optimization*. Computers & Structures, vol. 73, pp. 363-373.
- [72]. O. E. Hasancebi, F. (2002). *Layout optimization of trusses using simulated annealing*. Advances in Engineering Software, vol. 33, pp. 681-697.
- [73]. A. T. Kaveh, S. (2010). *An improved ant colony optimization for design of planar steel frames*. Engineering Structures, vol. 32, pp. 864-874.
- [74]. C. B. Camp, B. (2004). *Design of space trusses using ant colony optimization*. ASCE Journal of Structural Engineering vol. 131, pp. 369-380.
- [75]. H. T. Schmidt, G. (2005). *A combined heuristic optimization technique*. Advances in Engineering Software, vol. 36, pp. 11-20.
- [76]. N. C. Lagaros, D. & Tsompanakis, Y. & Papadrakakis M. (2005). *Structural design in the framework of cascade evolutionary optimization*. in Proc. 6th Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization. , Rio de Janeiro.
- [77]. Y. L. Gong, Q. & Xiao, Z. (2005). *The application of ant algorithm in structural optimization*. presented at the The Application of Ant Algorithm in Structural Optimization, Rio de Janeiro.

- [78]. S. O. S. Degertekina, M.P. & Hayaioglu, M.S. (2008). *Optimal load and resistance factor design of geometrically nonlinear steel space frames via tabu search and genetic algorithm*. Engineering Structures, vol. 30, pp. 197-206.
- [79]. B. K. Chakrabarty. (1992). *A model for optimal design of reinforced concrete beam*. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 118, pp. 3243-3243.
- [80]. A. K. Adamu, B.L. (1994). *Minimum cost design of RC beams using DCOC Part I: beams with freely-varying cross-sections*. Structural optimization, vol. 7, pp. 237-251.
- [81]. F. Y. A. Kocer, J. S. (1996). *Design of prestressed concrete transmission poles: optimization approach*. Journal of Structural Engineering, vol. 122, pp. 804-815.
- [82]. V. K. A. Koumoussis, S.J. & Vasiloglou, V. B. (1996). *Detailed design of reinforced concrete buildings using logic programming*. Advances in Engineering Software, vol. 25, pp. 161-176.
- [83]. M. B. Krakovski. (1997). *Optimization of RC structures using design of experiments*. Computers & Structures, vol. 63, pp. 119-132.
- [84]. C. S. H. Coello Coello, F. & Alonso Farrera, F. (1997). *Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms*. Expert Systems with Applications, vol. 2, pp. 101-108.
- [85]. J. P. B. T. Leite, B. H. V. (1998). *Improves genetic operators for structural engineering optimization*. Advances in Engineering Software, vol. 29, pp. 529- 562
- [86]. M. Y. S. Rafiq, C. (1998). *Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete columns supported by a declarative approach for capacity checking*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 69, pp. 443-458.
- [87]. M. H. Imam. (1998). *Shape optimization of umbrella-shaped concrete shells subjected to self-weight as the dominant load*. Computers & Structures, vol. 69, pp. 513-524.
- [88]. M. J. G. Fadaee, D. E. (1998). *Design optimization of 3D reinforced concrete structures having shear walls*. Engineering with Computers, vol. 14, pp. 139-145.
- [89]. K. W. G. Park , D.E. (1999). *Pareto-optimal conceptual design of the structural layout of buildings using a multicriteria genetic algorithm*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 14, pp. 163-170

- [90]. M. S. Leps, M. (2003). *New approach to optimization of reinforced concrete beams*, Computers & Structures, vol. 81, pp. 1957-1967.
- [91]. C. A. Lee, J. (2003). *Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm*. ASCE Journal of Structural Engineering vol. 129, pp. 762-775.
- [92]. C. P. Camp, S. & Hansson, H. (2003). *Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm*. ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 130, pp. 741-752.
- [93]. E. M. R. S. Fairbairn, M. M. & Toledo, R. D. & Alves, J. L. D. & Ebecken, N. F. F. (2004). *Optimization of mass concrete construction using genetic algorithms*. Computers & Structures, vol. 82, pp. 281-299.
- [94]. J. Kong, (2004). *Optimal drift design of tall reinforced concrete buildings using genetic algorithms*, Computational Mechanic. WCCM VI in conjunction with APCOM'04. , Beijing, China.
- [95]. A. N. Miyamoto, H. & Kruszka, L. (2004). *Application of the improved immune algorithm to structural design support system*. Journal of Structural Engineering, vol. 130, pp. 108-120.
- [96]. M. Carrera Hueso. (2004). *Optimización heurística de pórticos de paso de carretera*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [97]. M. A. A. Carrera, J. & Yepes, V. & González Vidosa, F. (2005). *Optimización heurística de pórticos de paso de carretera de hormigón armado*. Hormigón y Acero, vol. 236, pp. 85-96.
- [98]. M. A. A. Carrera, J. & Yepes, V. & González Vidosa, F. (2005). *Optimización por cristalización simulada de pórticos de paso de carretera de hormigón armado*, in III Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras, Zaragoza, noviembre Zaragoza, 2005, pp. 707-717.
- [99]. M. F. Liu, D. M. (2005). *Bridge annual maintenance prioritization under uncertainty by multiobjective combinatorial optimization*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol. 20, pp. 343-353.
- [100]. C. Perea de Dios.(2004). *Heuristic optimization of reinforced concrete road box frames*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [101]. C. Perea de Dios. (2006). *Optimización heurística de marcos de carretera de hormigón armado*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.

- [102].C. Perea de Dios. (2007). *Heuristic optimization of reinforced concrete frame bridges*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [103].C. Y. P. Perea de Dios & V. Alcalá, J. & Hospitaler Pérez, A. & González Vidosa, F. (2010). *A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, vol. 17, pp. 427-438.
- [104].C. A. Perea, J. & Yepes, V. & González-Vidosa, F. & Hospitaler, A. (2008). *Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization*. Advances in Engineering Software, vol. 39, pp. 676-689.
- [105].J. G. V. Alcalá González, Fernando & Yepes Piqueras, Victor. (2005). *Cristalización simulada aplicada a la optimización económica de muros ménsula de contención de hormigón armado*. Hormigón y Acero, vol. 236, pp. 97-108, abril-junio.
- [106].J. C. Alcalá González, M.A. & Perea de Dios, Cristian & Yepes Piqueras, Victor & González Vidosa, Fernanado. (2005). *Cristalización simulada aplicada a la optimización económica de muros de contención*, presented at the Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras, Zaragoza.
- [107].V. A. Yepes, J. & Perea de dios, C. & González Vidosa, F. (2007). *A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing*. Engineering Structures, vol. 30, pp. 821-831.
- [108].A. Carbonell Lombardero. (2005), *Optimización heurística de bóvedas de paso de carretera*, Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005d
- [109].P. I. Díaz. (2007). *Optimización del Diseño de Estructuras Bidimensionales de Hormigón Armado*. Mecanica de los Medios Continuos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- [110].A. M. Carbonell, F.J.& Yepes, V. & Hospitaler, A. & González-Vidosa, F. (2007). *Threshold accepting optimization of road vaults and rectangular hollow bridge piers*. in Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering (OPTI-2007), 2007, pp. 141-150
- [111].A. Y. Carbonell, V. & González-Vidosa, F. (2008). *Heuristic optimization of reinforced concrete road vault underpasses*. in Proceedings Sixth International Conference on Engineering Computational Technology, Athens (Greece).

- [112].A. Carbonell Lombardero. (2009). *Optimización heurística de bóvedas de paso de hormigón armado*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [113].V. V. Sahab M.G. & Ashour A.F. & Toropov. (2005). *A hybrid genetic algorithm for reinforced concrete flat buildings*. Computers & Structures, vol. 83, pp. 551-560
- [114].V. R. Govindaraj, J.V. (2005). *Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms*. Computers & Structures, vol. 84, pp. 34-49.
- [115].M. Y. P. Rafiq, I.S.J. & Easterbrook, D.J. & Denham, S.L. (2006). *Visualizing search and solution spaces in the optimum design of biaxial columns*. ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, pp. 88-99.
- [116].F. Martínez Martín. (2007). *Optimización heurística de pilas rectangulares huecas de hormigón armado*. Hormigón y Acero, vol. 244, pp. 67-80.
- [117].F. Martínez Martín. (2008). *Optimización heurística de pilas rectangulares huecas de hormigón armado*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [118].F. G. V. Martínez Martín, F. & Hospitaler Pérez, A. & Alcalá, J. (2011). *Design of tall bridge piers by ant colony optimization*. Engineering Structures, pp. 2320-2330.
- [119].F. G. V. Martínez Martín, F & Hospitaler Pérez, A & Yepes Piqueras, V. (2010). *Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections*. Computers & Structures, vol. 88, pp. 375-387.
- [120].I. Y. Payá & V. Gonzalez Vidosa. (2006). *Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, vol. 22, pp. 241-260.
- [121].I. Payá Zaforteza. (2007). *Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado*. Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [122].I. Y. Payá, V. & González-Vidosa, F. & Hospitaler, A. (2008). *Multiobjective optimization of reinforced concrete building frames by simulated annealing*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, , vol. 23, pp. 575-590.
- [123].I. Y. Payá, V. & Hospitaler Pérez, A. & Gonzalez Vidosa, F. (2009). *CO<sub>2</sub>-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing*. Engineering Structures, vol. 31, pp. 1501-1509.

- [124].I. Y. P. Payá Zaforteza, V. (2010). *On the weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing*, *Meccanica*, vol. 45, pp. 693-705.
- [125].S. Atabay. (2009). *Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm*. *Expert systems with Applications* vol. 36, pp. 3555-3566.
- [126].S. A. Barakat, S. (2009). *Application of evolutionary global optimization techniques in the design of RC water tanks*. *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 332-335.
- [127].J. Alcalá González. (2010). *Optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados*. *Ingeniería de la Construcción*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [128].O. J. E. Koskisto, R. (1997). *Reliability-based optimization of plant precast concrete structures*. *Journal of Structural Engineering*, vol. 1, pp. 298-305.
- [129].L. Catallo. (2004). *Genetic anti-optimization for reliability structural assessment of precast concrete structures*. *Computers & Structures*, vol. 82, pp. 1053-1065.
- [130].L. C. Sgambi, L. & Bontempi, F. (2004). *Ottimizzazione delle caratteristiche geometriche dei solai alveolari*, in *Atti delle Giornate AICAP*, ed. Verona.
- [131].F. A. Ahmadkhanlou, H. (2005). *Optimum cost design of reinforced concrete slabs using neural dynamics model*. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 18, pp. 65-72.
- [132].V. C. E. D. Castilho, M.K. & Nicoletti, M.C. (2005). *An investigation of the use of three selection based genetic algorithm families when minimizing the production cost of hollow core slabs*. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, vol. 194, pp. 4651-4668.
- [133].K. M. A. O. Hossain, O.O. (2005). *Design optimization of simply supported concrete slabs by finite element modelling*. *Struct Multidisc Optim* vol. 30, pp. 76-88.
- [134].J. W. Noorzaei, J.N. & Thanoon, W.A. & Jaafar, M.S. (2009). *Software development for optimal design of different precast slabs*. *Pertanika J. Sci. & Technol*, vol. 17, pp. 69-86.
- [135].M. M. O. Marzouk, O. A. & Hamid, M.S.A. & El-Said, M. E. (2010). *An optimization algorithm for simulation-based planning of low-income housing projects*. *Journal of Advanced Research*, vol. 1, pp. 291-301.



- [136].M. K. E. D. Augusto T. de Albuquerque & Antonio M.C. Melo. (2012). *A cost optimization-based design of precast concrete floors using genetic algorithms*. Automation in Construction vol. 22, pp. 348-356
- [137].M. R. Hannan & G.E.Johnson & C. Reif Hammond. (1993). *A General strategy for the optimal design of reinforced concrete footings to support wind loaded structures*. Journal of mechanical design.
- [138].Askin Saribas & Fuat Erbatur. (1996). *Optimization and sensitivity of retaining structures*. Journal of geotechnical engineering.
- [139].M. J. Fadaee & D. E. Grierson. (1999). *Optimum design of pile-supported reinforced concrete footings*. Civil-Comp Ltd, Edinburgh. Scotland.
- [140].B. F. Ceranic, C. & Bines, R. W. (2001). *An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures*. Computers & Structures, vol. 79, pp. 1569-1592.
- [141].M. G. Sahab. (2008). *Sensitivity of the optimum design of reinforced concrete flat slab buildings to the unit cost components and characteristic material strengths*. Asian journal of Civil Engineering (Building and Housing), vol. 9, pp. 487-503.
- [142].Yu Wang & Fred H. Kulhawy. (2008). *Economic design optimization of foundations*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- [143].Yu Wang. (2009). *Reliability-based economic design optimization of spread foundations*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- [144].C. M. Chan & L. M. Zhang & Jenny T. M. Ng. (2009). *Optimization of pile groups using hybrid genetic algorithms*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering.
- [145].Mohammad Khajehzadeh & Mohd Raihan Taha & Ahmed El-Shafie & Mahdiyeh Eslami. (2011). *Modified particle swarm optimization for optimum design of spread footing and retaining wall*. Journal of Zhejiang University.
- [146].Mohammad Khajehzadeh & Mohd Raihan Taha & Ahmed El-Shafie & Mahdiyeh Eslami. (2011). *Economic Design of Foundation Using Harmony Search Algorithm*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences.
- [147].Mohammad Khajehzadeh & Mohd Raihan Taha & Ahmed El-Shafie & Mahdiyeh Eslami. (2012). *Optimization of Shallow Foundation Using Gravitational Search Algorithm*. Research Journal of Applied Sciences Engineering and Technology.

- [148]. Charles V. Camp & Andrew Assadollahi. (2015). *CO2 and cost optimization of reinforced concrete footings subjected to uniaxial uplift*. Journal of building engineering
- [149]. Charles V. Camp & Andrew Assadollahi. (2013). *CO2 and cost optimization of reinforced concrete footings using a hybrid big bang-big crunch algorithm*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [150]. Mohammad Khajehzadeh & Mohd Raihan Taha & Mahdiyeh Esiami. (2013). *A new hybrid Firefly algorithm for foundations optimization*. The National Academy of Sciences, India
- [151]. Mohammad Khajehzadeh & Mohd Raihan Taha & Mahdiyeh Eslami. (2013). *Efficient gravitational search algorithm for optimum design of retaining walls*.
- [152]. Charles V. Camp & Andrew Assadollahi. (2015). *CO2 and cost optimization of reinforced concrete footings subjected to uniaxial uplift*. Journal of Building Engineering.
- [153]. DongHun Yeo, & Florian A. Potra. (2014). *Sustainable Design of Reinforced Concrete Structures through CO2 Emission Optimization*. ASCE. J. Struct. Eng.
- [154]. José V. Martí & Victor Yepes & Fernando González-Vidoso. (2015). *Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement*. ASCE. J. Struct. Eng-
- [155]. Vanessa Cristina de Castilho, Mounir Khalil El Debsa, Maria do Carmo Nicoletti. (2007). *Using a modified genetic algorithm to minimize the production costs for slabs of precast prestressed concrete joists*. Engineering Applications of Artificial Intelligence 20 (2007) 519–530.
- [156]. Martí, J.V., González-Vidoso & F., Alcalá, F. (2009). *Heuristic Optimization of prestressed concrete precast pedestrian bridges*. (2009). 11th International Conference on Optimum Design of structures and materials in Engineering. OPTI 2009
- [157]. A. Kaveha, & S. Talatahari (2009). *A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables*. Journal of Constructional Steel Research 65 (2009) 1558\_1568.
- [158]. Philipp Geyer. (2008). *Multidisciplinary grammars supporting design optimization of buildings*. Res Eng Design (2008) 18:197–216..

# Capítulo 5

## Métodos Heurísticos de Optimización.

### 5.1 Introducción.

El presente estudio trata de optimizar el problema relativo a la consecución de la solución estructural de la cimentación correspondiente a dos soportes confrontados, cuando uno de ellos se sitúa en una medianería y por tanto tiene limitada la dimensión de su cimiento en esa dirección. Como ya se indicó en el Capítulo 3, un problema de optimización se definirá como:

$$f(\mathbf{X}) \rightarrow \text{min o máx.} \quad \text{con } \mathbf{X} \in D$$

Condicionado por:

$$G_j(x_i) \leq 0 \quad j=1, \dots, m$$
$$x_{i,\min} < x < x_{i,\max} \quad i=1, \dots, n$$

Donde:

$\mathbf{P}=(p_1, \dots, p_k)$  son los parámetros del problema.

$\mathbf{X}=(x_1, \dots, x_i)$  es el vector de variables del problema.

$G_j(x_i) \leq 0$  y  $x_{i,\min} < x < x_{i,\max}$  son las Restricciones, a las que están sometidos

$f(x_i)$  es la función objetivo a optimizar, (maximizar o minimizar)

$D$ , es el espacio de soluciones factibles del problema.

Para conocer la dificultad del problema, se evalúa inicialmente el espacio de soluciones del mismo. Tal y como se describió en el punto 3.4., el número de variables vendrá condicionado por la tipología de la solución adoptada, reflejándose en la siguiente tabla los valores para los modelos de cimentación estudiados:

**Tabla 5.1. Variables en cada modelo de cimentación.**

<b>VARIABLES DE LOS MODELOS DE CIMENTACION</b>				
	<b>Máximo (mm)</b>	<b>Mínimo (mm)</b>	<b>Incremento (mm)</b>	<b>Rango de Valores</b>
<b>VARIABLES GEOMÉTRICAS (1er Orden)</b>				
A <sub>1</sub> , B <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> : Dimensión de zapatas	5.000	1.000	±100	40
H <sub>1</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> : Canto de la zapatas y VR	2.000	250	±50	35
B <sub>3</sub> : Ancho viga riostra	5.000	400	±100	46
<b>VARIABLES MATERIALES (1er Orden)</b>				
Hormigón HA-	35	25	±5	3
Acero B-	500	400	±100	2
<b>VARIABLES ARMADOS (1er Orden)</b>				
Diámetros de armado de ZAP. y VR	25	12	±discreto	4
Diámetros de armado de cercos de ZAP. y VR	12	6	±discreto	4
<b>VARIABLES ARMADOS (2º Orden)</b>				
Número Barras de armado en ZAP y VR	(x)	2	±1	(x)
Número de cercos de armado	(xx)	2	±1	(xx)
Número de ramas de cerco	8	2	±1	6

(x) (xx) El número máximo de barras de armado, dependerá de las dimensiones máximas dispuestas así como de las limitaciones geométricas y de armado definidas anteriormente.

De este modo, a partir de las variables existentes para cada uno de los modelos, así como su rango de valores posible descrito en la anterior tabla, se puede establecer el espacio de soluciones posibles. El número de posibles soluciones para cada uno de los modelos analizados se describen en la siguiente tabla.

**Tabla 5.2. Espacio de soluciones para cada modelo.**

	<b>Espacio Soluciones</b>
Modelo 2	4.76 10 <sup>26</sup>
Modelo 3	1.91 10 <sup>38</sup>
Modelo 4	1.91 10 <sup>38</sup>
Modelo 5	2.70 10 <sup>21</sup>

Considerando un tiempo de cálculo medio de 0.02 seg por solución, el análisis de todo el espacio de soluciones al problema haría necesario un tiempo de 4.2 10<sup>13</sup> siglos, en el caso más favorable. El enorme abanico de posibles soluciones y la complejidad de su resolución óptima por métodos exactos, hace necesaria la aplicación de métodos aproximados para la consecución de la solución óptima o suficientemente próxima a ella, del cimiento.

El presente trabajo, estudiará la aplicación de un método heurístico para la localización de óptimos de las distintas funciones objetivos definidas en los apartados anteriores.

## 5.2 Heurísticas y Meta-heurísticas.

Definiremos como '**Heurística**', a todas aquellas técnicas que buscan de forma inmediata una solución positiva a un problema, aunque no aseguren que esta sea la óptima. La palabra heurística procede del término griego εὕρισκειν, cuyo significado es «hallar, inventar».

A los métodos que utilicen técnicas '**Heurísticas**', los denominaremos '**Metaheurística**'. El nombre combina el prefijo griego "meta" ("más allá" o "nivel superior") y "heurístico" (de εὕρισκειν, heuriskein, "encontrar").

Los métodos metaheurísticos, son una técnica de optimización que no dependen del tipo de problema, son procedimientos que buscan soluciones suficientemente próximas al óptimo, mediante estrategias de búsqueda inspiradas en procesos naturales o en la inteligencia artificial.

En el resto del documento se englobará las técnicas heurísticas y metaheurísticas bajo el concepto de optimización heurística.

## 5.3 Optimización Heurística mono-objetivo.

Las técnicas de optimización heurísticas mono-objetivo las podremos clasificar en:

- Métodos de Búsqueda Secuencial por entornos. Basados en la búsqueda secuencial en el entorno de una solución factible que mejora la inicial. Entre estos métodos estarían:
  - Búsqueda local de máximo gradiente (Descent local search, DLS).
  - Cristalización simulada (Simulated Annealing, SA).
  - Aceptación por umbrales (Threshold Accepting, TA).
  - Búsqueda Tabú (Tabú Search, TS).
  - Algoritmo del diluvio universal (Grat Deluge algorithm, GDA).
  - Algoritmo del solterón.
  - Aceptación por cercanía al líder.
  - Procedimientos de búsqueda voraz, aleatoria y adaptativa (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP)
  - Búsqueda local iterada (Iterated local Search, ILS).
  - Búsqueda de entornos variables (Variable Neighborhood Search, VNS).

- Métodos basados en Poblaciones. Son métodos evolutivos donde partiendo de una población inicial, (solución factible del problema), se consiguen poblaciones mejores, en las que destaca algún individuo. Entre estos métodos estarían:
  - Colonia de hormigas (Ant Colony, AC).
  - Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms, GA).
  - Algoritmos Meméticos (Memetic Algorithm, MA).
- Redes Neuronales. Estos métodos simulan los sistemas biológicos de las redes neuronales.

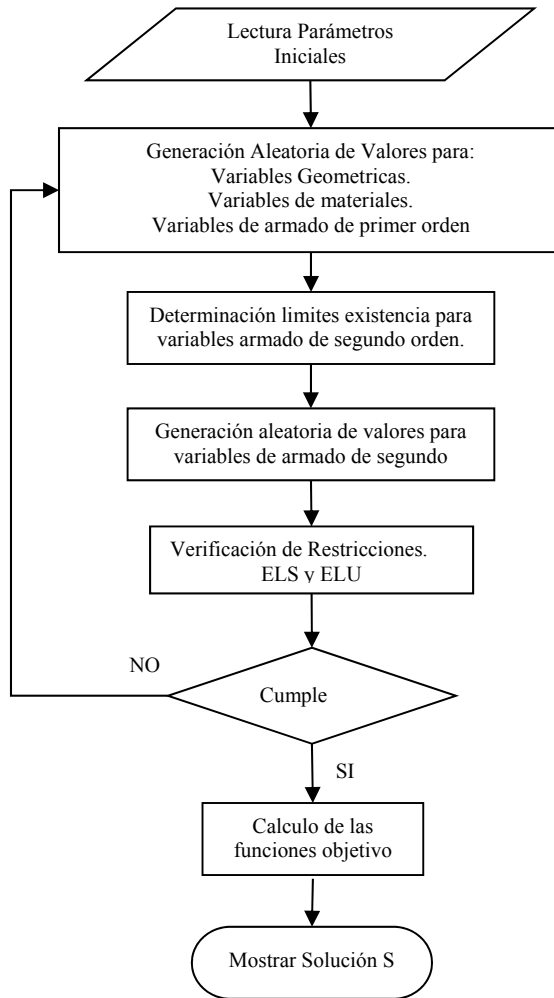
Atendiendo a la bibliografía analizada y descrita anteriormente, y en base a los buenos resultados obtenidos por Leps y Sejnoha [90], Carrera [96] y Carrera et al. [97] y [98], Perea [100], [101] y [104], y Perea et al. [102], Carbonell et al. [110] [11], y Carbonell [112], Payá [121] y Payá et al. [120] [122] y [123], Barakat et al. [126], Alcalá [127], B. Ceranic et al. [140] y Alcalá et al. [9] y [105], el presente estudio se centrará en aplicar la meta-heurística de Simulated Annealing (SA) al problema en estudio, si bien como paso previo también se estudiarán los resultados obtenidos mediante la Búsqueda Local de Descenso (DLS), que servirá para orientar tanto en los parámetros de configuración del algoritmo de SA, como para dar una visión inicial del espacio de soluciones del problema.

En los siguientes apartados se describen los dos métodos planteados, si bien antes de ellos se planteará una técnica no heurística, consistente en la búsqueda aleatoria, cuyo objetivo será el de conseguir información del espacio de soluciones del problema, así como de servir de arranque de los métodos heurísticos, aportando una primera solución factible del problema.

### **5.3.1 Estrategia de saltos múltiples aleatorios (Random Walk, RW).**

Antes de la utilización de técnicas Heurísticas para la resolución del problema de optimización, se ha evaluado una primera técnica consistente en la generación y evaluación de un conjunto de soluciones obtenidas de forma aleatoria.

Como es evidente, esta técnica presenta claros inconvenientes ante la búsqueda de soluciones óptimas, pero permite explorar el espacio de soluciones del problema y proporciona soluciones que más tarde se utilizarán como soluciones de partida para la aplicación de los métodos heurísticos. El diagrama de flujo de este método se describe en la siguiente figura.



### 5.3.2 Estrategia de búsqueda local de descenso (Descent Local Search, DLS).

La primera estrategia Metaheurística a emplear será la denominada ‘Estrategia de Búsqueda Local de Descenso, (DLS)’, la cual basa su funcionamiento en la ejecución de un proceso iterativo de búsqueda de soluciones factibles a partir de una solución inicial.

Siguiendo con la definición de un problema de optimización, como se indicó en 3.1, se tendrá:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}=\mathbf{f}(\mathbf{X}) &\rightarrow \text{min o máx.} \\ &\text{con } \mathbf{X} \in \mathbf{D} \\ &\text{Condicionado por:} \\ &\mathbf{G}_j(\mathbf{X}) \leq 0 \quad j=1, \dots, m \\ &\mathbf{X}_{i,\min} < \mathbf{X} < \mathbf{X}_{i,\max} \quad i=1, \dots, n \end{aligned}$$

Donde:

$\mathbf{P}(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_k)$  son los parámetros del problema, (valores que permanecerán constantes en el proceso de optimización y que definen el problema).

$\mathbf{X}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$  son las variables del problema, cuyo valor se modificara durante el proceso de optimización.

$\mathbf{G}_j(\mathbf{x}_i) \leq 0$  y  $\mathbf{x}_{i,\min} < \mathbf{x} < \mathbf{x}_{i,\max}$  son las Restricciones a las que esta sometidas las variables y que son condiciones cuyo cumplimiento ha de asegurarse por parte de la solución evaluada.

$\mathbf{f}(\mathbf{X})$  es la Función Objetivo a evaluar y cuyo valor se pretende optimizar.

$\mathbf{D}$  es el espacio de soluciones factibles del problema

El algoritmo partirá de una solución factible, localizada a través de un búsqueda aleatoria de soluciones.

En cada nueva iteración se provoca una modificación en los valores de un número concreto de variables del sistema y se evalúa de nuevo la solución.

Cada vector de variables  $\mathbf{x}_i \in \mathbf{D}$ , tendrá asociada una vecindad asociada  $\mathbf{V}(\mathbf{x}_i) \subset \mathbf{D}$ , definida como aquellas combinaciones posibles del valor de las variables contenidas en el vector, considerando los incrementos o decrementos permitidos de sus valores en cada iteración.

En el caso de que la función objetivo obtenida para la nueva solución empeore a la de la solución inicial, se deshecha, escogiéndose de forma aleatoria nuevas variables a las que modificar su valor inicial.

Caso de que la nueva solución de cómo resultados valores para la funcion objetivo mejores, se continuará con la modificación de las mismas variables en una nueva itera-



ción. El método finalizará cuando se cumpla el criterio de parada, correspondiente en este caso a la obtención de un número determinado de iteraciones donde no se logren mejoras.

Esta técnica, presenta como inconveniente el inconveniente la posibilidad de obtener soluciones óptimas de baja calidad, debido a una convergencia prematura a óptimos locales del sistema, tal y como muestra la siguiente figura.

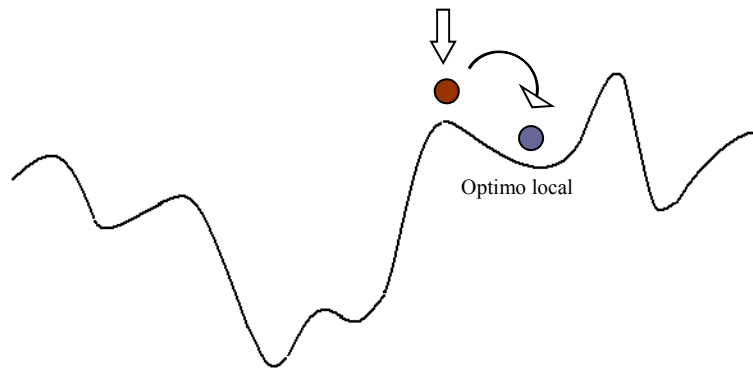


Figura 5.1. Búsqueda local del descenso.

Para evitar este inconveniente se han propuesto varias técnicas alternativas.

- A. Tras cada iteración, se realizan varias iteraciones adicionales en el entorno, escogiendo la mejor.

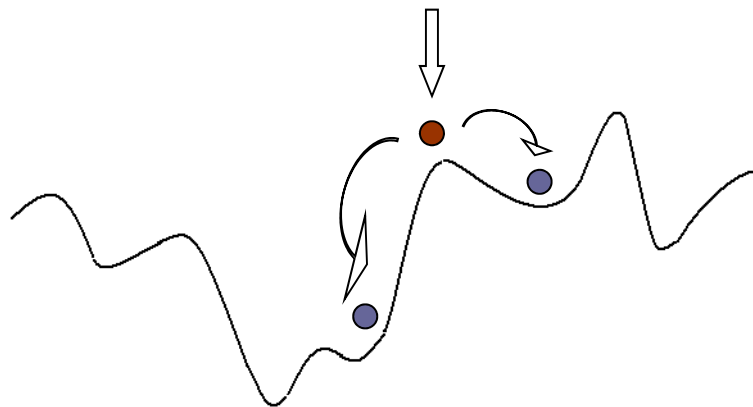


Figura 5.2. Búsqueda local del descenso. Iteraciones adicionales.

- B. Realizar re-arranques del algoritmo sobre soluciones iniciales aleatorias, lo que permite saltar zonas de óptimos locales.

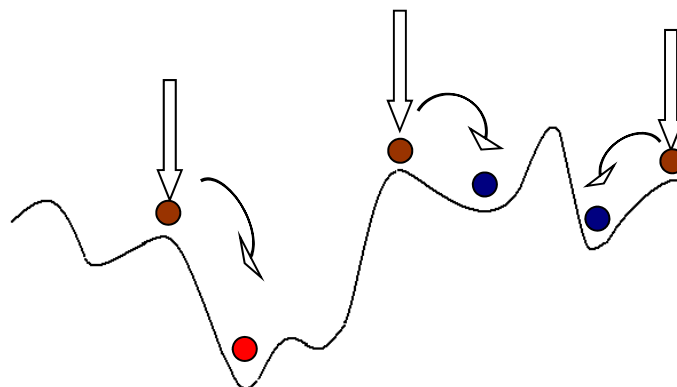


Figura 5.3. Búsqueda local del descenso. Re arranques.

En todo caso, estas alternativas no se recogerán en el presente estudio, aplicándose el proceso original de la Heurística, sin las últimas técnicas comentadas.

El método requiere de una primera solución factible, que en este estudio se determinará mediante una búsqueda aleatoria.

Esta estrategia, por tanto, precisa de la determinación de los siguientes parámetros para el ajuste del algoritmo:

- Rangos de variación de las variables.
- Número de Variables a modificar.
- Criterio de Aceptación.
- Criterio de Parada. Número máximo de iteraciones sin mejora

Se describe a continuación cada uno de los parámetros.

#### 5.3.2.1 Rangos de variación de las variables.

Los rangos de variación de las variables se han de estimar en un valor suficientemente bajo para que las nuevas soluciones sean similares a las anteriores. Grandes movimientos harían que el algoritmo pudiera no ser capaz de seguir la dirección de búsqueda del óptimo.

Se listan a continuación los rangos estimados para las variables del problema en estudio.

Tabla 5.3. Rangos de valores para las variables del problema.

RANGO DE LAS VARIABLES DE LOS MODELOS DE CIMENTACION			
	Máximo (mm)	Mínimo (mm)	Incremento (mm)
<b>VARIABLES GEOMÉTRICAS (1er Orden)</b>			
A <sub>1</sub> , B <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , B <sub>2</sub> : Dimensión de zapatas	10.000	1.000	±100
H <sub>1</sub> , H <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> : Canto de la zapatas y VR	2.000	250	±50
B <sub>3</sub> : Ancho viga riostra	5.000	400	±100
<b>VARIABLES MATERIALES (1er Orden)</b>			
Hormigón HA-	35	25	±5
Acero B-	500	400	±100
<b>VARIABLES ARMADOS (1er Orden)</b>			
Diámetros de armado de ZAP. y VR	25	12	±discreto
Diámetros de armado de cercos de ZAP. y VR	12	6	±discreto
<b>VARIABLES ARMADOS (2er Orden)</b>			
Número Barras de armado en ZAP y VR	(x)	2	±1
Número de cercos de armado	(xx)	2	±1
Número de ramas de cero	8	2	±1

(x) y (xx) Los mínimos y máximos correspondientes a los valores de las variables 'Número de barras de armado' quedarán fijados en función de las dimensiones geométricas de la solución y las restricciones de cuantía y separación entre barras descritas en el Apartado 3.5.

### 5.3.2.2 Número de variables a modificar.

El siguiente parámetro de configuración del algoritmo será el número de variables escogido para modificar su valor entre iteraciones.

En este caso, un número elevado de variables también podrá provocar que las soluciones planteadas sean muy distintas de una iteración a la siguiente, perdiéndose la información de mejora, por lo que en general funcionarán mejor las situaciones que modifican un número reducido de variables.

De la bibliografía estudiada, se puede considerar en el entorno del 20 a 30 % el óptimo de variables a modificar, si bien en este estudio se realizará primero una serie de experimentos iniciales, que permitan ajustar este parámetro hacia el óptimo.

Se estudiarán los resultados para la modificación de hasta 2, 4, 6, 8 y 10 variables, lo que representa un porcentaje de variación entre el 5.8 % a 62.5% del total, según el modelo de cimentación adoptado.

Dada la existencia de distintos modelos de cimentación propuestos, el número de variables del sistema también variará con él, por lo que se describe en la siguiente tabla el número de variables para cada modelo propuesto.

**Tabla 5.4. Número de variables del problema.**

	Variables de primer orden			Variables de Segundo Orden	TOTAL
	Geométricas	Materiales	Armado	Armado	
<b>Modelo 1</b>	6	2	4	4	16
<b>Modelo 2</b>	8	2	6	11	27
<b>Modelo 3</b>	5	2	11	16	34
<b>Modelo 4</b>	5	2	11	16	34
<b>Modelo 5</b>	3	2	7	10	22

### 5.3.2.3 Criterio de aceptación.

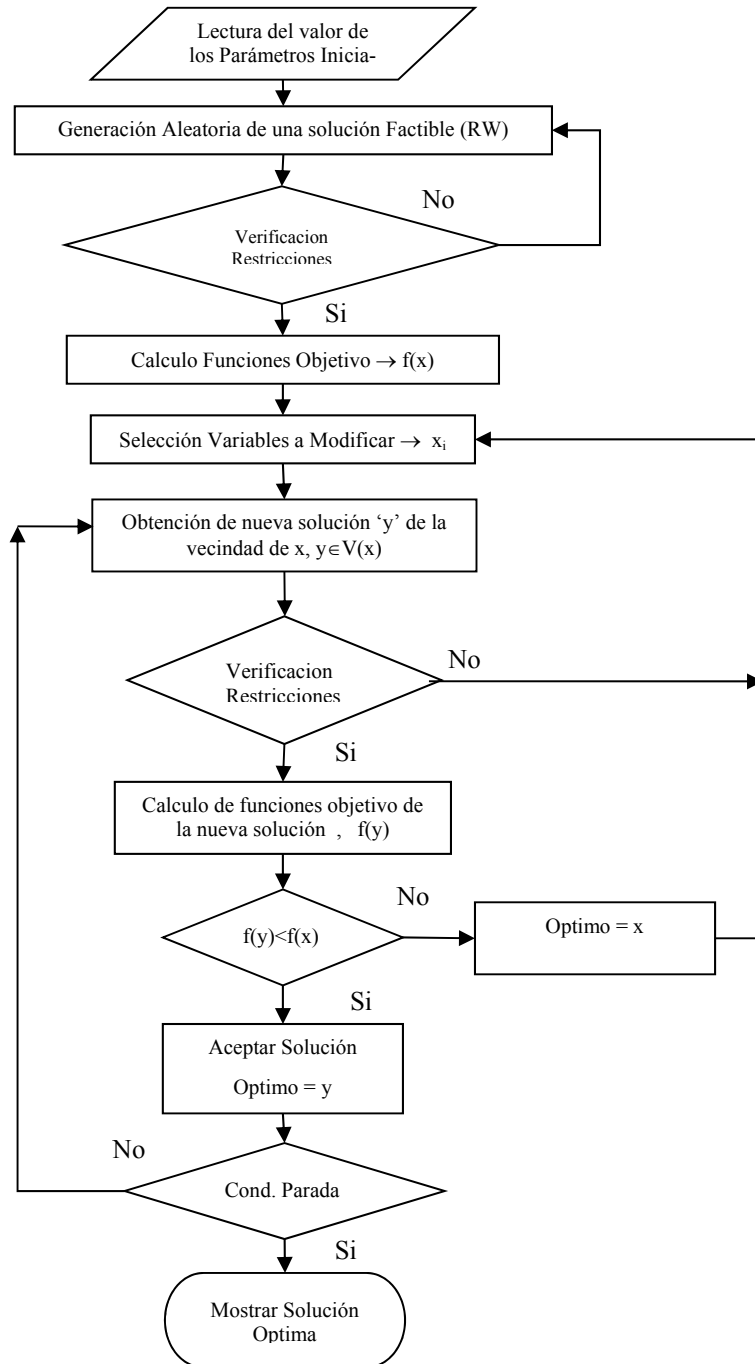
Tal y como se describió en la introducción, una nueva solución generada por el algoritmo solo se considerará eficiente en el caso de que la misma mejore a la solución anterior. Según la función objetivo escogida, los óptimos se determinarán en función de la obtención de valores máximos o mínimos.

### 5.3.2.4 Criterio de parada, Número máximo de iteraciones sin mejora.

El último parámetro de configuración del algoritmo será el relativo al criterio de parada del mismo. En el caso del presente algoritmo, el criterio de parada permanece constante, no endureciéndose conforme avanza el proceso, aspecto que si presentan otras estrategias meta-heurísticas, lo que hace que en la mayoría de los casos, este método obtenga resultados inferiores al de otras técnicas heurísticas.

Para el ajuste del algoritmo, se evaluarán diversos valores del criterio de parada, de forma que se puede escoger el más adecuado.

En el siguiente esquema se muestra el algoritmo de funcionamiento de la heurística.



### 5.3.3 *Cristalización Simulada (Simulated Annealing, SA).*

La meta heurística, Cristalización Simulada (Simulated Annealing, SA), basa su comportamiento en la analogía del proceso térmico de recocido del acero. Esta técnica consiste en calentar el material para luego enfriarlo de forma controlada, consiguiendo que se formen cristales de mayor tamaño y así reducir sus defectos. A temperaturas elevadas, las moléculas se mueven libremente y conforme se enfría el sistema, estas se solidifican formando cristales. La energía de la configuración final depende de la velocidad de enfriamiento, pues con enfriamientos lentos, los átomos disponen de mayores tiempos para situarse en su posición de mínima energía.

Este fenómeno fue modelizado por **Metropolis [1]**, que desarrolló el modelo matemático que simulaba la formación de los cristales. Así, desde un estado inicial aleatorio del sistema, se aplicaba un movimiento aleatorio a los átomos y se evaluaba la energía del nuevo sistema.

El nuevo sistema se aceptará, en caso de que la Energía del mismo sea menor a la inicial, pero si por el contrario la energía es mayor, la solución se aceptará con una probabilidad indicada por la expresión anterior.

$$p(\Delta E) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{T}\right)}$$

Donde P, es la probabilidad de aceptación,  $\Delta E$ , es el incremento de energía entre estados, T la temperatura del sistema y k la cte de Boltzmann.

A partir de este modelo, en 1983, **Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi [2]** y simultáneamente **Cerny [3]**, propusieron algoritmos basados en este modelo para la optimización de problemas.

En este caso la energía del sistema equivaldrá a la función objetivo analizada.

La diferencia de la técnica de S.A. con el resto, es su capacidad para escapar de mínimos locales, al aceptar soluciones peores a las de partida (criterio Metropolis [1]). La aceptación probabilísticas de estas soluciones se realizará en función de la expresión de Boltzmann:

$$p(\Delta E) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{T}\right)}$$

Donde;

$\Delta E$ , es el incremento de valor de la función objetivo entre dos iteraciones y T, un parámetro de control, que por analogía con el origen del algoritmo denominaremos parámetro de Temperatura.

El algoritmo se inicia con una solución válida, a la que se le aplica una perturbación (incremento de su valor), sobre los valores de un conjunto de variables escogidas aleatoriamente. Si la nueva función objetivo evaluada presenta un valor más óptimo, se acepta la solución, pero si por el contrario se ha generado un valor menos óptimo de la función objetivo, esta se podrá aceptar, en función de una probabilidad dada por la función anterior.

El proceso se repite un número de iteraciones a definir para cada escalón de temperatura, denominado ‘Cadena de Markov’, hasta que el sistema se “enfria” (Criterio de Equilibrio).

En los estados iniciales con Temperaturas elevadas, las soluciones peores serán aceptadas con una elevada probabilidad, asegurando que se realiza una exploración amplia del espacio de soluciones, mientras que conforme avanza el algoritmo y la temperatura va disminuyendo, esta probabilidad va disminuyendo, intensificándose la búsqueda hacia el óptimo local.

La heurística de Simulated Annealing, se puede interpretar como un algoritmo que continuamente intenta transformar la configuración actual en otra de su vecindad, **Laarhoven [4]**. Este mecanismo se describe matemáticamente por medio de las Cadenas de Markov, definida como una secuencia de ensayos donde el resultado de cada intento depende únicamente del resultado del anterior suceso. Así pues, definiremos la Cadena de Markov, como una sucesión de procesos aleatorios en los que la probabilidad de que aparezca un suceso depende únicamente del suceso anterior.

Las cadenas de Markov podrán ser homogéneas (la probabilidad no depende del número de orden del evento) o heterogéneas, y finitas o infinitas.

Se puede demostrar, **Laarhoven [4]** que la Heurística converge a la solución óptima, independientemente de la solución inicial, siendo sin embargo necesario un número infinito de iteraciones. La demostración requiere que exista una distribución estacionaria de las cadenas de Markov, homogéneas.

Así pues, dentro del algoritmo de SA, las cadenas de Markov serán el número de iteraciones necesarias dentro de cada escalón de temperatura.

Las temperaturas a su vez, seguirán un proceso de enfriamiento siguiendo una ley de evolución a determinar, hasta una temperatura final que fijará el criterio de congelación y que finalizará el procedimiento.

Así pues, el algoritmo vendrá definido por:

- Un espacio de soluciones del problema  $|S|$ .
- Una función objetivo a minimizar o maximizar.
- Un mecanismo de generación, que permite provocar pequeñas modificaciones al valor del conjunto de variables seleccionado.

- Un criterio de aceptación de soluciones.
- Un “Esquema de enfriamiento” que condiciona la búsqueda de óptimos y que vendrá definido por los parámetros:
  - Temperatura inicial  $T_0$ .
  - Ley de evolución de la temperatura.
  - Longitud de la Cadena de Markov. Criterio de equilibrio.
  - Criterio de congelación.

Se describen a continuación los parámetros de configuración del algoritmo.

#### 5.3.3.1 Espacio de soluciones del problema.

Definiremos el espacio de soluciones del problema, como todas aquellas combinaciones de valores para las variables del problema que definen soluciones factibles al mismo y dentro del cual, el algoritmo deberá localizar o acercarse a la combinación de valores que obtengan valores óptimos o cercanos al óptimo de la función objetivo analizada. Tal y como ya se reflejó en el punto 5.1, en los problemas del presente estudio el espacio de soluciones es muy amplio, como se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 5.5. Espacio de soluciones.**

	<b>Espacio Soluciones</b>
<b>Modelo 2</b>	$4.76 \cdot 10^{26}$
<b>Modelo 3</b>	$1.91 \cdot 10^{38}$
<b>Modelo 4</b>	$1.91 \cdot 10^{38}$
<b>Modelo 5</b>	$2.70 \cdot 10^{21}$

Por otro lado, definiremos a la ‘Vecindad’, como el espacio de soluciones factibles que es posible alcanzar desde una solución concreta, en la siguiente iteración y que es función del número de variables que es posible modificar y su rango de variación permitido en cada iteración.

#### 5.3.3.2 Funciones objetivo.

Como funciones objetivo definiremos aquellos valores que son característicos de cada solución de cimentación analizada, y cuyo valor se pretende optimizar y que fueron ya descritos en el punto 3.5.

#### 5.3.3.3 Mecanismo de generación.

El mecanismo de generación será la función encargada de modificar el valor de las variables seleccionadas en cada iteración, aplicándoles un pequeño incremento de su valor. Este mecanismo permitirá que un vector de variables  $x$ , pueda avanzar a otra posición factible de su vecindad,  $y \in V(X)$ . Inicialmente se habrá de estimar el número



de variables óptimo a modificar, situándose su valor habitual entorno al 20%, si bien en el presente estudio se realizará inicialmente una serie de experimentos para confirmar el número de variables óptimo a modificar.

Los rangos de variación y los valores de incrementos permitidos ya se describieron en el punto 3.6., para cada modelo de cimentación propuesto.

#### 5.3.3.4 Criterio de aceptación.

Tal y como se describió en la introducción, el método heurístico de Cristalización Simulada permitirá aceptar soluciones, aunque estas presenten valores de su función objetivo que no mejoren a la solución anterior.

El mecanismo de aceptación, de una nueva solución  $f(x')$  , donde  $x' \in V(x)$ , para un problema de búsqueda de mínimos será:

- Si  $f(x') \leq f(x) \rightarrow$  Aceptar Nueva Solución
- Si  $f(x') > f(x) \rightarrow$  Se aceptará la nueva solución de acuerdo a la probabilidad dada por :

$$p_{x \rightarrow x'} = \max \left[ 1, e^{-\left(\frac{\Delta E}{T}\right)} \right]$$

#### 5.3.3.5 Esquema de enfriamiento.

Tal y como se comentó en los puntos anteriores, el proceso se inicia a partir de la generación de una solución válida, que en el presente estudio se realizará a partir de un proceso aleatorio.

Para cada escalón de temperatura se realizará un número de iteraciones hasta que se verifique el criterio de equilibrio, lo que provocará la evolución de la T según la ley de evolución de temperatura escogida. Así, se repetirá el proceso en los distintos escalones de temperatura hasta que se verifique el criterio de congelación que finalizará el proceso. En la siguiente gráfica se muestra un ejemplo típico de aplicación del algoritmo.

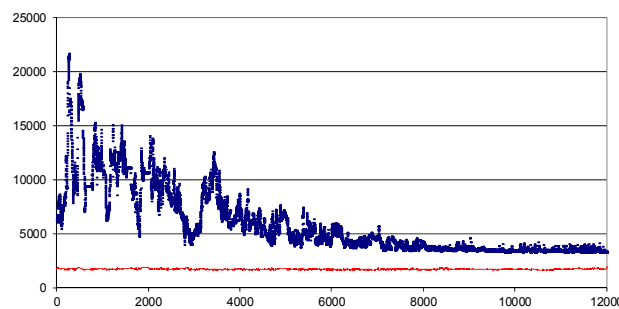


Figura 5.4. Representación evolución búsqueda óptimo. S.A.

Por tanto los parámetros de configuración del algoritmo serán:

- Temperatura inicial  $T_0$ .

La variable Temperatura,  $T$ , controla el porcentaje de soluciones vecinas, con valores de la función objetivo analizada peores a la actual, que se aceptan. Estudiando los límites de la función:

$$\begin{aligned} \text{Para } T \rightarrow \infty, \quad p(\Delta E) &= e^{-\left(\frac{\Delta E}{T}\right)} = e^0 = 1 \\ \text{Para } T \rightarrow 0, \quad p(\Delta E) &= e^{-\left(\frac{\Delta E}{T}\right)} = \frac{1}{e^\infty} = 0 \end{aligned}$$

Queda claro que para valores de  $T$  elevados, se aceptarán la mayoría de soluciones propuestas, aunque sean peores que la inicial y conforme se vaya produciendo el enfriamiento, el porcentaje de soluciones admitidas será menor. Existen distintos criterios recogidos en la bibliografía para la elección de la Temperatura inicial, si bien en todos los casos la elección de este parámetro viene condicionada por forzar a la aceptación de un número importante de transiciones en los primeros escalones analizados.

Kirkpatrick et al [2], propone una regla empírica, escoger un valor elevado de  $T_0$  y realizar cierto número de transiciones. Si se define el coeficiente de aceptación,  $\chi$ , como el cociente entre el número de transiciones aceptadas y el número de transiciones intentadas, entonces si el valor obtenido de  $\chi$  es menor de una cierta cantidad, (proponen un valor de 0.8), entonces se dobla el valor de  $T_0$ , procediendo así sucesivamente hasta verificar la condición impuesta.

Johnson [5], propone la expresión:

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta C}}{\ln(p_0^{-1})}$$

, donde se calcula el incremento de la función objetivo de una serie de transiciones, y se prefija de antemano el valor de probabilidad de aceptación a un valor elevado [0.8, 0.9].

- Ley de evolución de la temperatura.

Esta ley define la secuencia de enfriamiento del sistema. Existen numerosas propuestas descritas en bibliografía, si bien la más generalizada es una secuencia de enfriamiento con descenso constante de temperatura.

$$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad \text{o,} \quad T_{k+1} = \gamma^k \cdot T_0$$

Donde :

$T_0$ , es la temperatura inicial y  $K$ , el número de etapa o escalón

$\gamma$ , es un coeficiente de valor inferior a 1. Kirkpatrick [2] propone un valor de 0.95, adoptando otros autores como Johnson [4], valores entre 0.5 a 0.99. Nahar [6] estima como número de escalones, el valor de  $T_0$ , mientras que los valores para cada escalón se determinan de forma experimental. Skiscim, indicado en Laarhoven [4], establece un valor fijo de escalones 'K', entre los valores [0,  $T_0$ ], siendo el valor de Temperatura en cada escalón,  $T_k = T_0 (K-k/K)$  con  $k=1, \dots, K$ . Este parámetro determinará la variación de los valores de  $T$  hasta la Temperatura final. Valores altos, implican más escalones con temperaturas elevadas y por tanto con mayores probabilidades de aceptación y tiempos de análisis elevados, mientras que valores más bajos implican más escalones en la parte final del algoritmo, donde se produce una tasa de aceptación menor y el algoritmo es más rápido, si bien se analizarán menos soluciones en la parte inicial del algoritmo, pudiendo no detectarse el óptimo global.

- Criterio de Equilibrio. Longitud de la cadena de Markov.

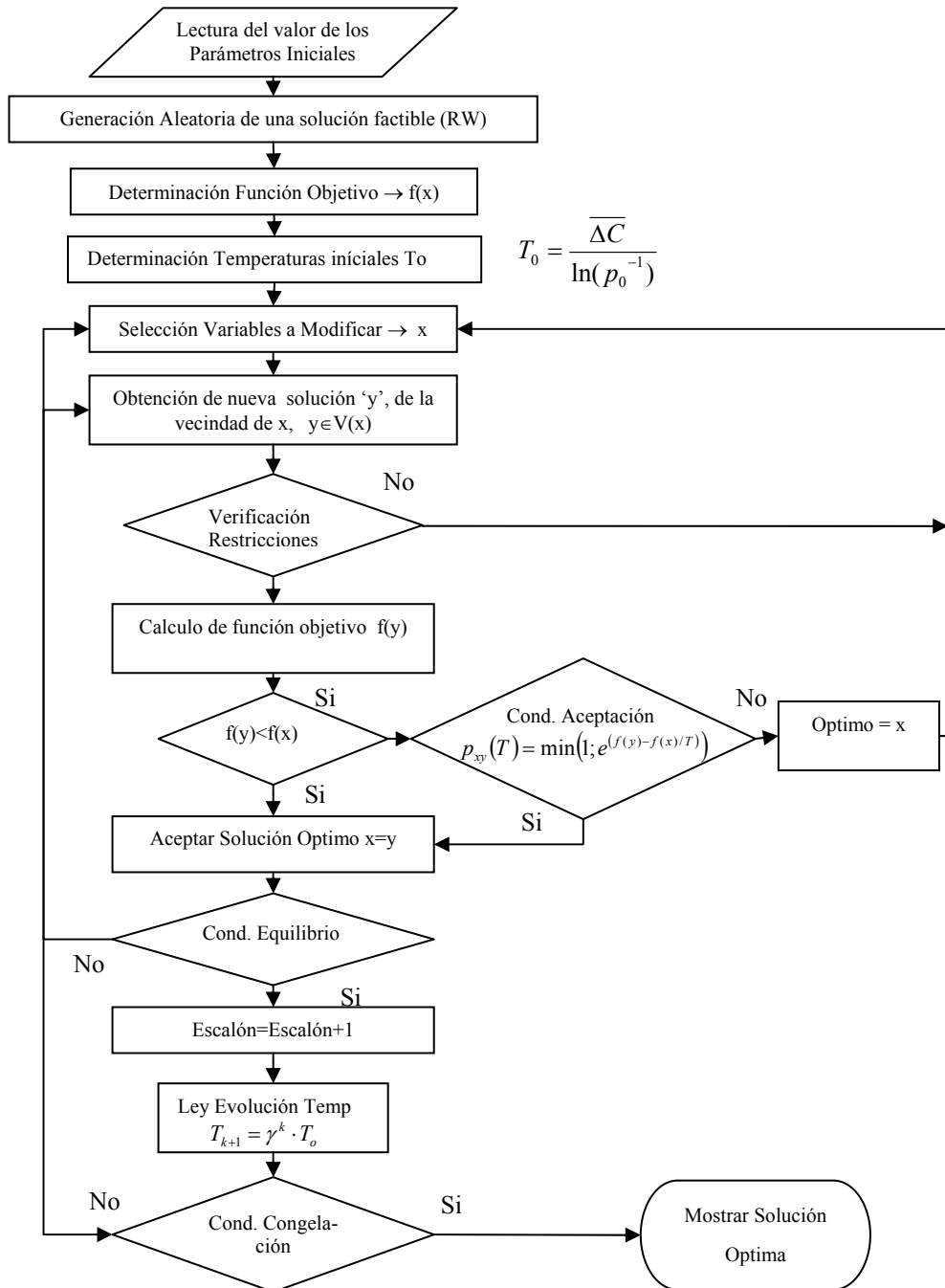
Este criterio marcará la condición de paso de un escalón de temperatura al siguiente y por consiguiente el número de iteraciones a realizar en cada escalón, (longitud de la cadena de Markov). Kirkpatrick [2], plantea como criterio, una longitud de la cadena de Markov, igual al número de variables del problema, mientras que Johnson [5] adopto como condición, que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea un porcentaje  $K$ , del número de posibles soluciones (Vecindad). Nahar [6] plantea como condición que el número de transiciones rechazadas sea una cantidad fija.

- Criterio de Congelación.

Teóricamente el algoritmo debería finalizar cuando  $T=0$ , si bien en la práctica se suelen imponer otras condiciones más operativas, para acotar el tiempo de cálculo. Habitualmente este parámetro se determina mediante un número fijo de escalones a evaluar. Nahar [6] establecía un valor de 6, mientras que otros autores establecían valores de hasta 15 escalones. Kirkpatrick [2] establece como criterio de parada la condición de que la configuración entre dos cadenas de Markov sea la misma. Por último Johnson [5] establece como condición que el ratio de aceptación de soluciones sea inferior a un cierto valor. Por último destacar que en Laarhoven [4], se pueden consultar los criterios de otros autores para el ajuste de estos parámetros.

#### 5.3.3.6 Diagrama de flujo del algoritmo.

Se describen en la siguiente figura el diagrama de flujo descriptivo del funcionamiento del algoritmo:



## 5.4 Optimización Heurística Multi-objetivo.

Los métodos de optimización multi-objetivo buscan la obtención de soluciones óptimas de varias funciones objetivo simultáneamente. Al igual que ocurría con las técnicas mono-objetivo, las técnicas multi-objetivo (MOCO, Multi-Objective Combinatorial Optimization), se pueden dividir en dos categorías:

- Métodos de resolución exacta
- Métodos de resolución heurísticos

En los problemas de optimización multi-objetivo es habitual que las funciones objetivo a evaluar entren en conflicto, es decir, la optimización de una función objetivo no lleva aparejada la optimización del resto de funciones evaluadas. Para ayudar en la toma de decisiones de la solución óptima, cuando se evalúan varias funciones objetivo, se emplea el concepto de '**óptimo de Pareto**'.

Definiremos a un punto 'x', como óptimo de Pareto de un conjunto de puntos del espacio solución, si no existe ningún otro punto de ese espacio que sea capaz de mejorar a 'x' en uno de los criterios evaluados, sin empeorarlo al menos en otro.

Al igual que se describió para los métodos heurísticos mono-objetivo, los métodos heurísticos multi-objetivos los podremos clasificar en:

- Métodos basados en heurísticas de búsqueda secuencia por entornos.
- Métodos basados en algoritmos evolutivos.

Al igual que se indicó para los métodos mono-objetivos, se ha escogido la aplicación del método de búsqueda secuencial por entornos, Simulated Annealing Multi-objetivo MOSA, dados los buenos resultados obtenidos por otros autores, con la aplicación de esta técnica en la optimización de problemas estructurales.

### 5.4.1 *Cristalización Simulada Multi-objetivo. (Simulated Annealing, MOSA).*

Esta técnica fue descrita por Paolo Serafini **Serafini** [7] y desarrollado el algoritmo por **Suppapitnarm** [8] y es designada habitualmente como técnica MOSA.

El problema de optimización, será el mismo ya definido en los apartados anteriores, con la salvedad que en este caso disponemos de varias funciones objetivo

$$f_r(X) \rightarrow \min \text{ o } \max. (r=1, \dots, p)$$

$$X \in D$$

Condicionado por:

$$G_j(X) \leq 0 \quad j=1, \dots, m$$

$$X_{i,\min} < X < X_{i,\max} \quad i=1, \dots, n$$

Donde:

$\mathbf{P}=(p_1, \dots, p_k)$  son los parámetros del problema, (valores que permanecerán constantes en el proceso de optimización y que definen el problema).

$\mathbf{X}=(x_1, \dots, x_i)$  son las variables del problema, cuyo valor se modificara durante el proceso de optimización.

$G_j(x_i) \leq 0$  y  $x_{i,\min} < x < x_{i,\max}$  son las Restricciones a las que esta sometidas las variables y que son condiciones cuyo cumplimiento ha de asegurarse por parte de la solución evaluada.

$F_r(\mathbf{X})$  son las Funciones Objetivo a evaluar y cuyo valor se pretende optimizar.

$D$  es el espacio de soluciones factibles del problema

Una solución  $X \in D$  será eficiente si no hay otro vector de solución  $x'$ , tal que:

$$\forall r \quad f_r(x') \leq f_r(x) \quad \text{o al menos para un valor de 'r' } f_r(x') < f_r(x) .$$

El método se iniciará con la búsqueda de una primera solución mediante la asignación aleatoria de valores a las variables del problema.

Posteriormente se determinarán las temperaturas iniciales de cada una de las funciones objetivo y tras seleccionar aleatoriamente las variables a modificar, se aplicará un pequeño incremento o decremento sobre los valores de la misma, evaluando la nueva solución generada

El criterio de aceptación de soluciones, será algo distinto al descrito en el apartado anterior, ya que en este caso dispondremos de varias funciones objetivo a comparar.

**Serafini [7]**, establece en su artículo, diversas técnicas de ordenamiento de soluciones (Escalar, de Pareto, Cono). A semejanza del criterio empleado en la búsqueda mono-objetivo, caso de que la solución no mejore a la anterior, se establece un segundo criterio de aceptación, dado por una función de probabilidad de la transición, de la que se aportan diversos criterios.

El algoritmo se repetirá manteniendo el valor de las Temperaturas constante, un número de iteraciones llamada 'Cadena de Markov', hasta cumplir con el criterio de equilibrio.

Una vez cumplido el mismo, se procederá a la modificación de las temperaturas para el siguiente escalón, siguiendo un cierto esquema de enfriamiento.

El proceso se repetirá hasta cumplir con las condiciones de congelación del mismo a semejanza de los ya comentado para el método mono-objetivo.

Finalmente, el algoritmo re arrancará, repitiendo todo el proceso hasta cumplir la condición de parada del mismo. En cada re arranque se partirá de una solución escogida aleatoriamente entre las incluidas en la frontera de Pareto.

Así pues los parámetros de configuración del algoritmo serán.

5.4.1.1 Condición de aceptación. Frontera de Pareto.

Tal y como indica **Serafini [7]**, el criterio de aceptación de soluciones seguirá las condiciones de aceptación de la Frontera de Pareto. Además, caso de no verificar este criterio, se incluirá una posibilidad de aceptación (permitirá aceptar soluciones peores) en función de una función de probabilidad.

- Si  $\forall_r f_r(x') \leq f_r(x) \rightarrow$ ,  $x'$  domina o es igual a la solución  $x$ , probabilidad de aceptación 1.
- Si al menos para algún valor de  $r$ ,  $f_r(x') \leq f_r(x) \rightarrow$   $x'$  no es dominado por  $x$ , probabilidad de aceptación 1.
- Si  $\forall_r f_r(x') > f_r(x) \rightarrow$   $x'$  es dominado por  $x$ , Aceptar la solución en función de la probabilidad dada por ciertas funciones. **Serafini [7]**, aporta las siguientes alternativas.
  - o Regla SP

$$p_{x \rightarrow x'} = \prod_{i=1}^r \min \left( 1; e^{-\frac{\Delta f_i}{T_i}} \right)$$

Donde  $\Delta f_i$  son las variaciones positivas de cada función objetivo.  
 $r$  es el número total de funciones objetivo a evaluar.  
 $T_i$  es la temperatura de cada función objetivo en cada escalón

- o Regla P

$$p_{x \rightarrow x'} = \prod_{i=1}^r \min \left( 1; e^{-\frac{\omega_i \cdot \Delta f_i}{T_i}} \right)$$

Donde  $\omega$  son los pesos aportados a cada función objetivo.

- o Regla C

$$p_{x \rightarrow x'} = \prod_{i=1}^r \min_{i=1, \dots, m} \left( 1; \min \left[ e^{-\frac{\omega_i \cdot \Delta f_i}{T_i}} \right] \right)$$

5.4.1.2 Esquema de enfriamiento

- Temperatura inicial,  $T_0$ .

A semejanza del criterio establecido por **Johnson [5]** para la determinación de la Temperatura inicial en el caso de búsqueda mono-objetivo, para la determinación de las Temperaturas iniciales de cada una de las funciones objetivo, adoptaremos las siguientes hipótesis.

Suponiendo que:

$$p = \prod_{i=1}^m e^{\frac{-\Delta f_i}{T_i}} \quad \text{de donde} \quad \frac{1}{p} = \prod_{i=1}^m e^{\frac{\Delta f_i}{T_i}} \quad \text{y} \quad \ln(p^{-1}) = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta f_i}{T_i}$$

En el instante inicial  $x_0$ :

$$\ln(p_0^{-1}) = \sum_{i=1}^m \frac{\overline{\Delta f}_i}{T_{0i}}$$

Existen multitud de soluciones para la determinación de  $T_{0i}$

Solución 1:

$$\text{Estimando} \quad T_{0i} = \frac{\overline{\Delta f}_i}{\alpha_i \cdot \ln(p_0^{-1})} = \frac{T_{0i,1}}{\alpha_i} \longrightarrow T_{0i,1} = \frac{\overline{\Delta f}_i}{\ln(p_0^{-1})}$$

Donde  $T_{0i,1}$  es la temperatura inicial con uno solo de los criterios objetivo.

Operando:

$$\ln(p_0^{-1}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \frac{\overline{\Delta f}_i}{T_{0i,1}} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \ln(p_0^{-1}) \longrightarrow \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$$

Como caso particular a este sería el caso de :

$$\alpha_i = \alpha \rightarrow \alpha_i = \frac{1}{m}$$

$$p = \prod_{i=1}^m \left( e^{\frac{-\Delta f_i}{T_{0i,1} \cdot m}} \right) = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m e^{\frac{-\Delta f_i}{T_{0i,1}}}}$$



Solución 2:

Estimando  $T_{0i}=T_0$  para todo i.

$$\ln(p_0^{-1}) = \frac{1}{T_0} \cdot \sum_{i=1}^m \overline{\Delta f}_i \longrightarrow T_o = \frac{\sum_{i=1}^m \overline{\Delta f}_i}{\ln(p_0^{-1})}$$

$$T_i = \gamma^n \cdot T_{0i} = \gamma^n \cdot T_0$$

$$p = \prod_{i=1}^m \min \left( 1; e^{\frac{-\Delta f_i}{\gamma^n \cdot T_0}} \right)$$

- Ley de evolución de la temperatura.

Manteniendo el mismo criterio impuesto del procedimiento mono-objetivo, se establecerá una ley de evolución de temperaturas de la forma:

$$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k = \gamma^k \cdot T_o$$

Donde

- $T_0$  es la temperatura inicial
- k el número de etapa o escalón
- **Huang**, indicado en **Laarhoven[4]**, propone un valor del parámetro  $\alpha$  de valor:

$$\alpha_k = \max \left( 0.5, e^{\left[ \frac{-0.7 \cdot T_k}{\sigma_k} \right]} \right)$$

Donde  $\sigma_k$  es la desviación estándar de los valores de la función objetivo  $f_i$  aceptadas para la temperatura  $T_k$ .

**White**, indicado en **Laarhoven[4]**, propone la forma  $T_k = \sigma_k$

Los valores para las dos soluciones propuestas en el punto inicial serán:

Solución 1:

$$T_i = \gamma^n \cdot T_{0i} = \gamma^n \cdot \frac{T_{0i,1}}{\alpha_i}$$

Así pues, la temperatura de cada función se determinará en función de la temperatura inicial para esa función objetivo dividido por un factor de peso tal que la suma de los pesos de todas las funciones sea la unidad.

$$p = \prod_{i=1}^m \min \left( 1; e^{\alpha_i \frac{-\Delta f_i}{\gamma^n \cdot T_{0i,1}}} \right)$$

Como caso particular a este sería el caso de:

$$\alpha_i = \alpha \rightarrow \alpha_i = \frac{1}{m}$$

$$p = \prod_{i=1}^m \left( e^{\frac{-\Delta f_i}{\gamma^n \cdot T_{0i,1}} \frac{1}{m}} \right) = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m e^{\frac{-\Delta f_i}{\gamma^n \cdot T_{0i,1}}}}$$

Solución 2:  $T_i = \gamma^n \cdot T_{0i} = \gamma^n \cdot T_0$

$$p = \prod_{i=1}^m \min \left( 1; e^{\frac{-\Delta f_i}{\gamma^n \cdot T_0}} \right)$$

- Criterio de Equilibrio. Longitud de la cadena de Markov.

Este criterio marcará la condición de paso de un escalón de temperatura al siguiente y por consiguiente el número de iteraciones a realizar en cada escalón, (longitud de la cadena de Markov).

**Laarhoven [4]** establece como criterio de equilibrio alcanzar un cierto número de iteraciones o fijar el número máximo de soluciones como un porcentaje del número de iteraciones realizadas (40%).

- Criterio de Congelación

Se mantendrá el criterio de **Johnson [5]**, recogido en el método mono-objetivo, donde se establece como condición que el ratio de aceptación de soluciones sea inferior a un cierto valor.

#### 5.4.1.3 Criterio de Parada.

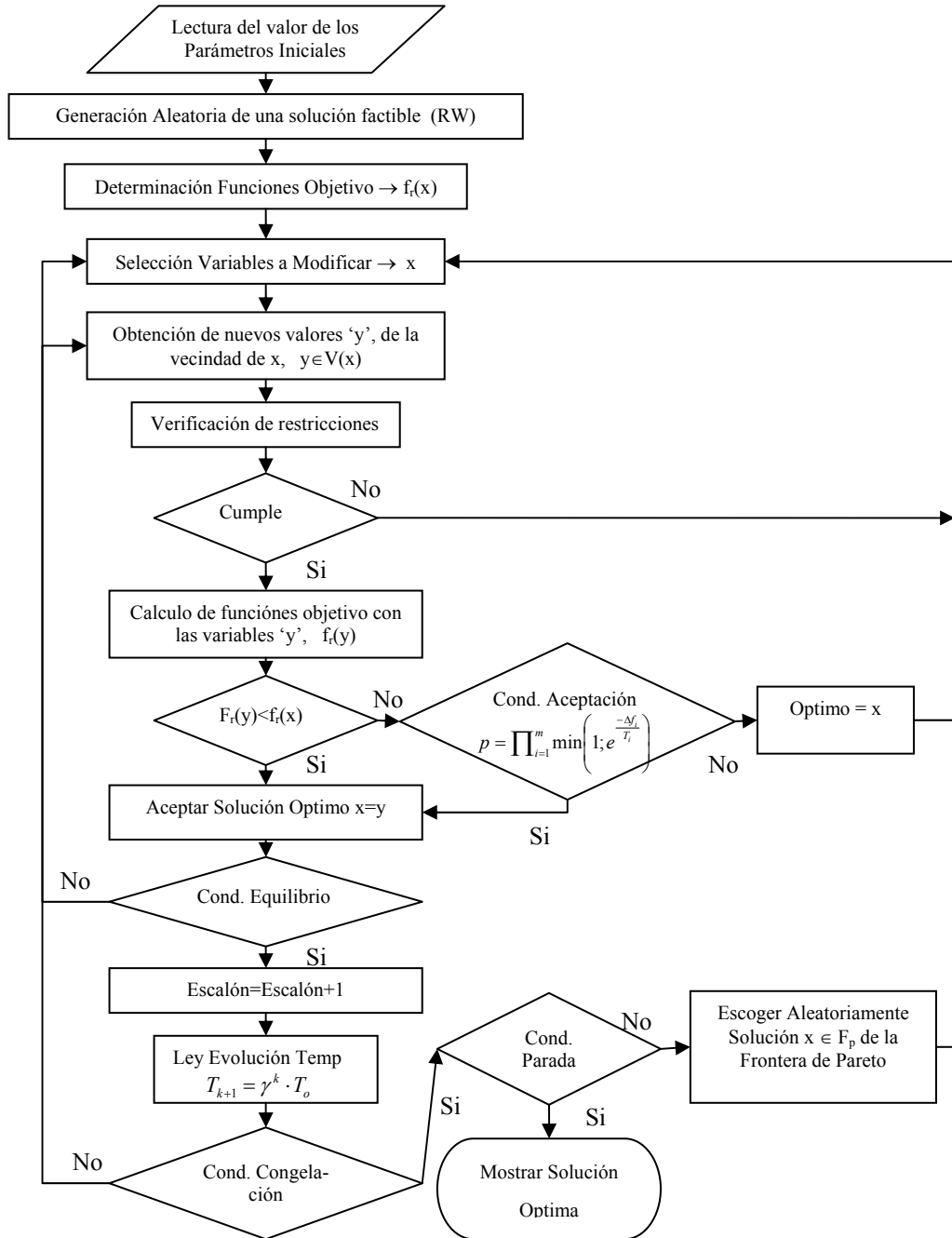
Como ya se indicó en la introducción, el algoritmo se repetirá hasta verificar la condición de parada. En cada rearranque se partirá de una nueva solución inicial a determinar. Existen diversos criterios dados para determinar la nueva solución de arranque,

(Disponer una solución inicial aleatoria de la frontera de Pareto existente en este momento, seleccionar una solución aleatoria,etc .. ),

Como condición de parada se impone la repetición de los experimentos hasta que durante la realización de un determinado número de experimentos, no se aporten nuevas soluciones a la frontera de Pareto.

#### *5.4.1.4 Diagrama de Flujo del Algoritmo.*

Se describen en la siguiente figura el diagrama de flujo descriptivo del funcionamiento del algoritmo:



## 5.5 Bibliografía.

- [1]. N. Metropolis & A. W. Rosenbluth & M. N. Rosenbluth & A. H. Teller & E. Teller, *Equation of state calculations by fast computing machines*. The Journal of Chemical Physics, vol. 21, pp. 1087-1092-
- [2]. Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt Jr & M.P. Vecchi (1982), Optimization by Simulated Annealing. IBM Reserach Report RC 9355.
- [3]. Cerny V. 1985. *Thermodinamycal approach to the travelling salesman problem: an efficient simulation algorithm*. Journal of Optimization Theory and Aplications.
- [4]. P.J.M. Van Laarhoven and E.H.L.Aarts. (1987). *Simulated Annealing. Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- [5]. Johnson D.S, C.R. Aragon, L.A. McGeoch & C. Schevon. (1987). Optimization by Simulated Annealing: An experimental Evaluation, Parts I and II, AT % T Bell Laboratories.
- [6]. Nahar, S., S. Sahni & E. Shragowitz. (1985). Experiments with Simulated Annealing. Proc. 22nd Des. Automation Conf, Las Vegas.
- [7]. Paolo Serafin. 1992. *Simulated Annealing for multi objective optimization problems*. Department of Mathematics and Computer Science , Via Zanon 6, University of Udine, Italy.
- [8]. A. Suppapitnarm, K. A. Seffen, G. T. Parks & P. J. Clarkson. (1999) A simulated annealing algorithm for multiobjective optimization. Engineering Optimization.

# Capítulo 6

## Calibración de los Algoritmos.

### 6.1 Introducción

En el presente capítulo se procederá a la aplicación de las distintas técnicas heurísticas de optimización descritas en el capítulo anterior, sobre un ejemplo típico de cimentación de dos soportes confrontados, cuando uno de ellos se sitúa en una medianería, estudiándose los modelos estructurales y funciones objetivo descritos en los capítulos anteriores. El objetivo fundamental será el ajuste de los parámetros que conforman cada uno de los algoritmos de optimización a aplicar.

El proceso a seguir será:

- A. **Definición del problema.** Inicialmente, se describirán todos los parámetros que definen el problema y que se trataron en el Capítulo 3., así como las funciones objetivo a evaluar en este caso.
- B. **Paseo Aleatorio (Random Walk).** Se realizará una búsqueda de soluciones al problema mediante la ejecución de un ‘paseo aleatorio’ (Random Walk). Para ello, se asignarán aleatoriamente valores a las variables del problema y se procederá a la evaluación de las distintas funciones objetivo resultantes. Se analizarán las soluciones obtenidas mediante este método, de forma que se pueda tener una primera impresión del espacio de soluciones existentes para el problema. Del análisis de las mismas, se podrá determinar a su vez, la posible existencia o no de relaciones entre las funciones objetivo propuestas.

- C. Aplicación del método heurístico de optimización **Búsqueda Local de Descenso (DLS)**. Este será el primer método heurístico a aplicar sobre el problema, realizándose inicialmente varios experimentos, con el objeto de poder estimar los parámetros óptimos de configuración del algoritmo, aplicándose para todas las funciones objetivo determinadas anteriormente.
- D. Aplicación del método heurístico de **Cristalización Simulada Mono-objetivo (SA)**. Posteriormente, se aplicará el método heurístico mono-objetivo de Cristalización Simulada (SA). Al igual que en caso anterior, inicialmente se realizarán diversos experimentos de cara a estimar los parámetros de configuración óptimos del algoritmo. El método determinará óptimos de forma independiente para cada una de las funciones objetivo evaluadas.
- E. Aplicación del método heurístico de **Cristalización Simulada Multi-objetivo (SA)**. Finalmente se aplicará el método heurístico multi-objetivo de Cristalización Simulada (SA). Al igual que en caso anterior, en este caso se aplicará el método de Cristalización Simulada sobre el problema en estudio, pero en este caso se efectuará de forma simultánea la búsqueda de óptimos de todas las funciones objetivo evaluadas. Se realizarán varios experimentos iniciales con el objeto de poder determinar el valor óptimo de los parámetros de configuración del algoritmo.

## 6.2 Definición del problema:

Se incluyen a continuación los valores de los parámetros definitorios del problema concreto a evaluar. Como se verá, los datos intentan corresponderse con un problema habitual en la edificación residencial, consistente en un soporte medianero separado una distancia de 5.0 m del soporte interior y que recibe la carga correspondiente a un edificio de 4 alturas.

Los parámetros concretos se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 6.1. Parámetros del problema**

Parámetros	Valor
<b>Geométricas</b>	
Distancia entre ejes de soportes	$l_1 = 5.000 \text{ mm}$
Distancia desde eje soporte 1 a medianería	$e_1 = 300 \text{ mm}$
Dimensión 'x' del soporte 1	$a_{1p} = 400 \text{ mm}$
Dimensión 'y' del soporte 1	$b_{1p} = 400 \text{ mm}$
Dimensión 'x' del soporte 2	$a_{2p} = 400 \text{ mm}$
Dimensión 'y' del soporte 2	$b_{2p} = 400 \text{ mm}$
Recubrimiento inferior	$r_{inf} = 30 \text{ mm}$
Recubrimiento lateral	$r_{lateral} = 70 \text{ mm}$
<b>Terreno</b>	
Tipo	Granular
Tensión admisible	$\sigma_{admisible} = 0.25 \text{ N/mm}^2$
Módulo de balasto para placa de 30 x 30 cm	$K_{30} = 0.07 \text{ N/mm}^3$

Parámetros	Valor
<b>Cargas</b>	
Axil característico debido a cargas permanentes actuante en soporte 1	$N_{1,ep,k} = 58,5 \text{ KN}$
Axil característico debido a sobrecargas actuante en soporte 1	$N_{1,sc,k} = 22,5 \text{ KN}$
Momento característico en el plano x debido a cargas permanentes actuante en soporte 1.	$M_{1x,ep,k} = 0$
Momento característico en el plano x debido a sobrecargas permanentes actuante en soporte 1.	$M_{1x,sc,k} = 0$
Cortante característico en el plano x debido a cargas permanentes actuante en soporte 1.	$V_{1x,ep,k} = 0$
Cortante característico en el plano x debido a sobrecargas permanentes actuante en soporte 1.	$V_{1x,sc,k} = 0$
Axil característico debido a cargas permanentes actuante en soporte 2	$N_{2,ep,k} = 69,0 \text{ KN}$
Axil característico debido a sobrecargas actuante en soporte 2	$N_{2,sc,k} = 45,0 \text{ KN}$
Momento característico en el plano x debido a cargas permanentes actuante en soporte 2.	$M_{2x,ep,k} = 0$
Momento característico en el plano x debido a sobrecargas permanentes actuante en soporte 2.	$M_{2x,sc,k} = 0$
Cortante característico en el plano x debido a cargas permanentes actuante en soporte 2.	$V_{2x,ep,k} = 0$
Cortante característico en el plano x debido a sobrecargas permanentes actuante en soporte 2.	$V_{2x,sc,k} = 0$

Finalmente, como funciones objetivo se evaluarán todas las descritas anteriormente en el punto 3.5, es decir:

- Funciones Económicas
  - Coste Económico (Euros).
- Funciones de Coste Medioambiental:
  - Emisión CO<sub>2</sub> (kg)
  - Energía Consumida (MJ)
  - Peso de la solución.
    - Peso Armadura (kg)
    - Peso Total (Armadura + Hormigón) (kg)
  - Consumo de agua (kg).
- Funciones de ‘Constructibilidad’.
  - Relación perímetro / Área (1/mm)
  - Número de Barras
    - Número de Barras
    - Número de Tipo de Barras distintos
  - Diámetro Medio (cm).
  - Uniformidad de Armado
    - Uniformidad de armado (%)



## 6.3 Aplicación de los métodos heurísticos.

### 6.3.1 Introducción.

Tras concretar los parámetros que definen el problema a estudiar, se procederá a la aplicación de diversos métodos heurísticos para la estimación de la solución óptima del problema. Se realizarán diversos experimentos en cada caso, de forma que se puedan determinar los valores óptimos para las variables de configuración de cada método. Los métodos a utilizar serán:

- F. Búsqueda de soluciones al problema mediante un paseo aleatorio, (**Random Walk**), que nos dará una visión del entorno de soluciones al problema. Este procedimiento se realizará adoptando aleatoriamente valores para las variables definitorias del problema, evaluándose posteriormente la validez de la solución y los valores obtenidos para cada función objetivo. Este proceso se realizará para cada uno de los modelos de cimentación propuestos.
- G. Aplicación del método heurístico de Búsqueda por entornos (**DLS**). Inicialmente se partirá de una solución factible del problema, obtenida en el punto anterior, para posteriormente aplicar perturbaciones sobre los valores de un número concreto de las variables, evaluándose la nueva solución. Si el valor de la función objetivo mejora al caso anterior se continuará perturbando los valores de las variables escogidas. En caso contrario, se escogerán aleatoriamente nuevas variables a modificar, continuando con el proceso hasta alcanzar el criterio de parada. Inicialmente se realizará un estudio para la determinación de los parámetros óptimos de configuración del método. Una vez determinados estos, se completará el estudio aplicando el método sobre todos los modelos de cimiento propuestos.
- H. Aplicación del método heurístico de Cristalización Simulada mono-objetivo (**SA**), sobre cada uno de los modelos de cimentación y para cada una de las funciones objetivo por separado, (ver descripción del procedimiento en el Capítulo 4). Al igual que en el caso anterior, el proceso se iniciará con la realización de una serie de experimentos que permitan estimar los valores óptimos de las variables de configuración del método.
- I. Aplicación del método heurístico de Cristalización Simulada multi-objetivo (**MOSA**), sobre cada una de las tipologías de solución y para todas las funciones objetivo simultáneamente. Al igual que en los casos anteriores, se realizará inicialmente una serie de experimentos que permitan establecer los valores óptimos de configuración de los parámetros del algoritmo.
- J. Finalmente, se realizará un análisis comparativo con los resultados obtenidos por cada uno de los métodos.

### 6.3.2 Búsqueda aleatoria de soluciones. (Random Walk)

Con el objeto de poder obtener una primera información del espacio de soluciones del problema, se realizará una búsqueda aleatoria consistente en la evaluación de soluciones cuyas variables han sido generadas aleatoriamente entre sus rangos de existencia posible. El proceso se realizará para cada uno de los modelos de cimentación propuestos.

Así, se evaluarán los resultados de las primeras 1.000 soluciones factibles encontradas de forma aleatoria, para cada uno de los modelos de cimentación propuestos y cuyos resultados se describen a continuación.

#### 6.3.2.1 Modelo I: Zapatas aisladas.

Tras los experimentos realizados, no se han podido localizar soluciones factibles para esta tipología de cimentación. Analizando el problema, se establece que las tensiones máximas originadas en el cimiento medianero, por la existencia de una fuerte excentricidad de la carga, imposibilita obtener soluciones factibles a este problema con este tipo de cimentaciones, ya que las aéreas necesarias exceden las limitaciones geométricas impuestas inicialmente.

Es por ello que en el resto de los análisis no se volverán a realizar referencias a este tipo de solución para el cimiento, para el que no se han localizado soluciones factibles.

#### 6.3.2.2 Modelo 2R: Zapata Excéntrica con viga riostra. Cimiento Rígido.

Se muestran en la siguiente figura los resultados obtenidos para las primeras 1.000 soluciones validas generadas para la función objetivo 'Coste Económico'.

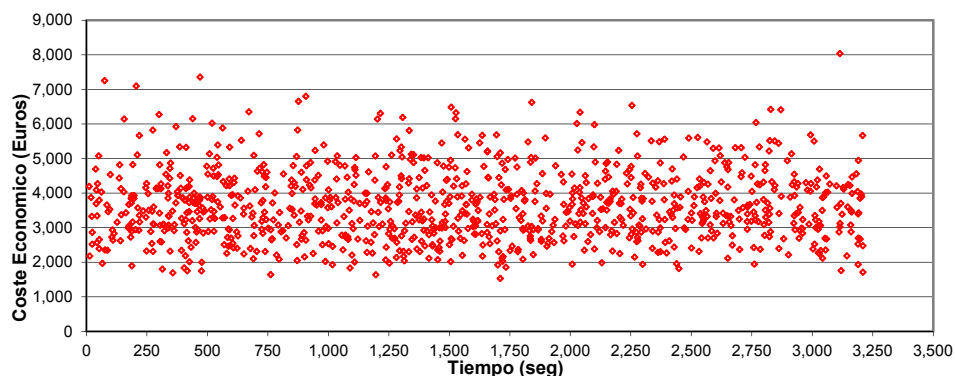


Figura 6.1. Mod. 2. Resultados obtenidos mediante "Random Walk".

Para la generación de 1.000 soluciones factibles se han debido de generar aleatoriamente 540.027 combinaciones de las variables, lo que arroja un porcentaje de éxito de 0,18%. El tiempo empleado para la generación de estas soluciones ha sido de 3.209,3 seg.

Los parámetros más significativos del análisis estadístico se muestran en la siguiente tabla, para cada una de las funciones objetivo analizadas.

**Tabla 6.2. Análisis estadístico de resultados (Mod 2R).**

Tipo 2	C. Economico	Emission CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.642,96	9.179,19	69.715,01	971,40	938,65	67.078,48	124,21	147,69
Error típico	31,87	85,43	640,38	10,57	10,28	613,60	0,99	1,19
Mediana	3.518	8.834	67.509	909	880	65.082	119	142
Moda	2.993	6.902	59.168	680	755	86.511	97	126
Desviación estándar	1.007,83	2.701,48	20.250,57	334,35	324,96	19.403,63	31,29	37,50
Varianza de la muestra	1.015.715,24	7.297.973,64	410.085.496,77	111.789,12	105.600,25	376.500.945,00	979,06	1.406,46
Curtosis	0,49	0,63	1,23	2,78	2,72	-0,01	0,48	1,12
Coefficiente de asimetría	0,64	0,70	0,85	1,28	1,26	0,46	0,78	0,92
Rango	6.506	17.671	135.767	2.494	2.452	109.532	180	230
Mínimo	1.528	3.641	28.612	350	332	25.875	65	76
Máximo	8.034	21.312	164.379	2.844	2.784	135.407	245	306
Suma	3.642.959	9.179.189	69.715.013	971.396	938.648	67.078.475	124.206	147.685
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	62,54	167,64	1.256,64	20,75	20,17	1.204,09	1,94	2,33

Tipo 2R	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	4,15	1.375,21	3.559,66	172,92	53,18	55,93
Error típico	0,02	6,45	34,50	0,64	0,40	0,31
Mediana	4	1.358	3.438	173	60	58
Moda	4	1.308	2.868	169	60	58
Desviación estándar	0,69	203,99	1.090,90	20,33	12,51	9,73
Varianza de la muestra	0,48	41.613,93	1.190.056,56	413,46	156,44	94,59
Curtosis	-0,46	-0,11	0,05	-0,35	-0,67	-0,46
Coefficiente de asimetría	-0,33	0,48	0,50	0,05	0,40	0,33
Rango	3	1.140	5.990	117	40	42
Mínimo	2	947	1.246	114	40	44
Máximo	5	2.087	7.236	231	80	86
Suma	4.148	1.375.210	3.559.655	172.921	53.180	55.928
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	12,66	67,70	1,26	0,78	0,60

Con objeto de poder estimar si las distintas muestras obtenidas, se pueden ajustar a alguna de las distribuciones de probabilidad habituales, se han tratado los datos con el software estadístico, Minitab 15 [6].

Los resultados concluyen que no hay correlación con las funciones de distribución analizadas con un nivel de confianza del 95 %. Las funciones de distribución analizadas, han sido:

- Función Normal
- Función Lognormal
- 3-parameter Lognormal
- Exponencial
- 2-Parameter Exponential
- Weibull
- 3-Parameter Weibull
- Smallest Extrem Value

- Largest Extreme Value
- Gamma
- 3-Parameter Gamma.
- Logistic
- LogLogistic
- 3-Parameter Loglogistic.
- Johnson Transformation

6.3.2.3 Modelo 2F: Zapata Excéntrica con viga riostra. Modelo Elástico.

Se analizan a continuación las 1.000 primeras soluciones validas obtenidas mediante el modelo de zapata excéntrica con viga riostra (Tipo 2), pero empleando un modelo de cálculo elástico para la distribución de tensiones sobre el terreno.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se muestra a continuación.

**Tabla 6.3. Análisis estadístico de resultados (Modelo 2F).**

Tipo 2 Flexible	C. Economico	Emision CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.462,32	8.717,96	66.077,20	916,92	882,60	63.713,98	121,57	149,32
Error típico	30,10	80,68	589,45	9,25	9,16	596,53	0,96	1,08
Mediana	3.339	8.393	63.611	874	843	61.933	116	144
Moda	2.770	10.326	56.912	948	688	53.433	110	159
Desviación estándar	951,77	2.551,25	18.640,10	292,37	289,55	18.863,97	30,32	34,19
Varianza de la muestra	905.868,52	6.508.884,07	347.453.299,36	85.477,57	83.840,67	355.849.290,78	919,42	1.169,26
Curtosis	0,37	0,50	0,68	1,82	1,77	0,07	0,98	1,24
Coefficiente de asimetría	0,67	0,70	0,73	1,05	1,04	0,56	0,85	0,84
Rango	5.861	15.856	123.148	2.160	2.132	114.031	200	231
Mínimo	1.517	3.592	29.611	354	334	23.817	60	80
Máximo	7.378	19.448	152.759	2.514	2.466	137.848	260	311
Suma	3.462.315	8.717.959	66.077.200	916.918	882.598	63.713.983	121.572	149.322
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	59,06	158,32	1.156,71	18,14	17,97	1.170,60	1,88	2,12

Tipo 2 Flexible	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	4,15	1.391,08	3.369,86	169,80	53,48	55,91
Error típico	0,02	7,15	33,71	0,66	0,40	0,31
Mediana	4	1.360	3.246	170	60	58
Moda	4	1.328	3.894	178	60	58
Desviación estándar	0,69	226,18	1.066,03	20,87	12,65	9,65
Varianza de la muestra	0,48	51.156,41	1.136.427,91	435,74	160,05	93,15
Curtosis	-0,41	0,56	0,14	-0,41	-0,56	-0,41
Coefficiente de asimetría	-0,33	0,76	0,59	0,07	0,42	0,33
Rango	3	1.338	6.588	109	60	42
Mínimo	2	937	1.182	116	40	44
Máximo	5	2.275	7.770	225	100	86
Suma	4.149	1.391.080	3.369.863	169.800	53.480	55.914
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	14,04	66,15	1,30	0,79	0,60

Para la generación de 1.000 soluciones factibles se han debido de generar aleatoriamente 518.096 combinaciones de las variables, lo que arroja un porcentaje de éxito de 0,19%. El tiempo empleado para la generación estas soluciones ha sido de 3.477,3 seg.

6.3.2.4 *Modelo 5R: Zapata Combinada Ancho Constante. Cimiento Rígido.*

En este caso para la consecución de 1.000 soluciones validas han sido necesario evaluar 8.172 configuraciones (12.2% de tasa de aciertos), empleando 59,1 segundos, es decir un 98.1 % menos tiempo que en el caso del modelo '2R'.

Los parámetros más significativos del análisis estadístico, se muestran en la siguiente tabla para cada una de las funciones objetivo analizadas:

**Tabla 6.4. Análisis estadístico de resultados (Modelo 5R).**

Tipo 5 Flexible	C. Economico	Emision CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.645,70	9.506,36	73.363,27	1.049,20	1.047,79	65.662,44	89,74	94,28
Error típico	38,40	105,41	746,22	9,70	9,74	770,77	0,58	1,06
Mediana	3.399	8.822	68.402	995	995	60.832	87	89
Moda	3.333	8.010	55.910	944	748	46.283	87	87
Desviación estándar	1.214,37	3.333,38	23.597,54	306,61	308,04	24.373,76	18,25	33,51
Varianza de la muestra	1.474.693,12	11.111.452,21	556.843.984,86	94.007,78	94.889,71	594.080.240,99	333,05	1.122,81
Curtosis	0,34	0,46	0,49	0,74	0,72	0,29	0,36	39,99
Coefficiente de asimetría	0,86	0,91	0,90	0,91	0,89	0,87	0,56	5,19
Rango	6,377	17,931	127,771	1,812	1,812	122,524	110	392
Mínimo	1,670	3,860	31,027	431	431	24,722	48	48
Máximo	8,047	21,791	158,798	2,243	2,243	147,246	158	440
Suma	3.645,702	9.506,358	73.363,271	1.049,199	1.047,788	65.662,440	89,740	94,283
Cuenta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Nivel de confianza(95,0%)	75,36	206,85	1.464,34	19,03	19,12	1.512,51	1,13	2,08

Tipo 5 Flexible	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	2,72	1.173,61	3.630,36	192,70	57,00	75,92
Error típico	0,02	6,95	45,57	0,69	0,53	0,30
Mediana	3	1,144	3.329	192	50	72
Moda	3	965	3.859	191	50	72
Desviación estándar	0,68	219,90	1.441,06	21,84	16,88	9,45
Varianza de la muestra	0,46	48.356,31	2.076.657,32	476,89	285,04	89,39
Curtosis	-0,33	-0,69	0,48	-0,42	-0,33	-0,33
Coefficiente de asimetría	0,03	0,48	0,94	0,13	-0,03	-0,03
Rango	3	935	7.397	110	75	42
Mínimo	1	816	1.266	140	25	58
Máximo	4	1.751	8.663	250	100	100
Suma	2,720	1.173,606	3.630,359	192,701	57,000	75,920
Cuenta	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	13,65	89,42	1,36	1,05	0,59

6.3.2.5 *Modelo 5F: Zapata Combinada Ancho Constante. Modelo Elástico.*

Se analizan a continuación las 1.000 primeras soluciones validas obtenidas mediante el modelo de zapata combinada de ancho constante, pero considerando un modelo elástico de transmisión de tensiones al terreno.

**Tabla 6.5. Análisis estadístico de resultados (Modelo 5F).**

Tipo 5 Flexible	C. Economico	Emision CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.645,60	9.506,36	73.363,27	1.049,20	1.047,79	65.662,44	89,74	94,28
Error típico	38,41	105,41	746,22	9,70	9,74	770,77	0,58	1,06
Mediana	3.399	8.822	68.402	995	995	60.832	87	89
Moda	3.653	8.010	76.372	944	888	68.881	87	87
Desviación estándar	1.214,54	3.333,38	23.597,54	306,61	308,04	24.373,76	18,25	33,51
Varianza de la muestra	1.475.098,66	11.111.452,21	556.843.984,86	94.007,78	94.889,71	594.080.240,99	333,05	1.122,81
Curtosis	0,34	0,46	0,49	0,74	0,72	0,29	0,36	39,99
Coefficiente de asimetría	0,86	0,91	0,90	0,91	0,89	0,87	0,56	5,19
Rango	6.477	17.931	127.771	1.812	1.812	122.524	110	392
Mínimo	1.570	3.860	31.027	431	431	24.722	48	48
Máximo	8.047	21.791	158.798	2.243	2.243	147.246	158	440
Suma	3.645.602	9.506.358	73.363.271	1.049.199	1.047.788	65.662.440	89.740	94.283
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	75,37	206,85	1.464,34	19,03	19,12	1.512,51	1,13	2,08

Tipo 5 Flexible	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	2,72	1.173,61	3.630,36	192,70	57,00	75,92
Error típico	0,02	6,95	45,57	0,69	0,53	0,30
Mediana	3	1.144	3.329	192	50	72
Moda	3	965	3.859	191	50	72
Desviación estándar	0,68	219,90	1.441,06	21,84	16,88	9,45
Varianza de la muestra	0,46	48.356,31	2.076.657,32	476,89	285,04	89,39
Curtosis	-0,33	-0,69	0,48	-0,42	-0,33	-0,33
Coefficiente de asimetría	0,03	0,48	0,94	0,13	-0,03	-0,03
Rango	3	935	7.397	110	75	42
Mínimo	1	816	1.266	140	25	58
Máximo	4	1.751	8.663	250	100	100
Suma	2.720	1.173.606	3.630.359	192.701	57.000	75.920
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	13,65	89,42	1,36	1,05	0,59

Para la generación de 1.000 soluciones factibles se han debido de generar aleatoriamente 5.062 combinaciones de las variables, lo que arroja un porcentaje de éxito de 16,52%. El tiempo empleado para la generación estas soluciones ha sido de 65,4 seg.

### 6.3.2.6 Modelo 3R: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 1. Cimiento Rígido.

Para la generación de 1.000 soluciones factibles se han debido de generar aleatoriamente 66.764 combinaciones de las variables, lo que arroja un porcentaje de éxito de 1,49%. El tiempo empleado para la generación estas soluciones ha sido de 1.078,4 seg.

Los parámetros más significativos del análisis estadístico de los datos obtenidos, se muestran en la siguiente tabla, para cada una de las funciones objetivo analizadas:

**Tabla 6.6. Análisis estadístico de resultados (Modelo 3R).**

Tipo 3R	C. Economico	Emision CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.617,81	9.066,82	66.909,33	867,20	861,29	69.154,94	116,57	130,77
Error típico	31,45	81,93	546,35	6,53	6,65	662,95	0,60	1,48
Mediana	3.416	8.611	64.408	841	835	65.312	115	120
Moda	3.154	7.705	62.027	680	786	47.353	115	115
Desviación estándar	994,53	2.590,88	17.277,04	206,50	210,23	20.964,39	18,87	46,92
Varianza de la muestra	989.082,54	6.712.642,90	298.496.015,53	42.642,28	44.197,78	439.505.448,61	356,07	2.201,07
Curtosis	0,88	1,08	0,90	0,73	0,68	0,28	0,75	17,24
Coefficiente de asimetría	0,88	0,91	0,82	0,68	0,64	0,75	0,69	3,66
Rango	6.177	16.548	105.252	1.371	1.371	121.874	115	384
Mínimo	1.726	3.968	31.194	388	388	26.262	74	78
Máximo	7.903	20.516	136.446	1.759	1.759	148.136	189	462
Suma	3.617.814	9.066.821	66.909.325	867.195	861.286	69.154.937	116.567	130.769
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	61,72	160,78	1.072,12	12,81	13,05	1.300,94	1,17	2,91

Tipo 3R	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	4,14	1.206,00	3.697,89	191,90	21,43	56,00
Error típico	0,02	6,26	37,51	0,59	0,51	0,28
Mediana	4	1.169	3.476	192	25	58
Moda	4	1.054	3.215	187	25	58
Desviación estándar	0,64	197,82	1.186,22	18,66	15,99	8,95
Varianza de la muestra	0,41	39.133,55	1.407.112,55	348,09	255,60	80,16
Curtosis	-0,52	1,20	0,34	-0,12	-0,52	-0,52
Coefficiente de asimetría	-0,16	1,07	0,77	-0,07	0,16	0,16
Rango	3	1.159	6.716	110	75	42
Mínimo	2	884	1.246	134	0	44
Máximo	5	2.043	7.962	244	75	86
Suma	4.143	1.206.001	3.697.885	191.898	21.425	55.998
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	12,28	73,61	1,16	0,99	0,56

6.3.2.7 Modelo 3F: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 1. Modelo Elástico.

Se analizan a continuación las 1.000 primeras soluciones validas obtenidas mediante el modelo de cimiento '3', pero con un modelo de comportamiento elástico de transmisión de tensiones al terreno.

**Tabla 6.7. Análisis estadístico de resultados (Modelo 3F).**

Tipo 3F	C. Economico	Emision CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.604,99	9.059,85	66.937,16	870,69	864,68	68.676,45	115,42	128,87
Error típico	32,40	84,20	561,30	6,71	6,84	687,89	0,60	1,41
Mediana	3.366	8.392	63.757	850	848	63.652	114	119
Moda	2.798	6.272	60.000	1.084	1.084	41.852	106	118
Desviación estándar	1.024,63	2.662,56	17.749,88	212,11	216,31	21.753,06	19,11	44,47
Varianza de la muestra	1.049.860,56	7.089.210,73	315.058.185,26	44.988,53	46.788,39	473.195.830,23	365,08	1.977,18
Curtosis	0,59	0,72	0,81	1,06	0,97	0,42	0,72	20,34
Coefficiente de asimetría	0,88	0,90	0,85	0,74	0,69	0,89	0,59	3,84
Rango	6.264	16.231	119.781	1.590	1.624	128.808	140	399
Mínimo	1.632	3.954	31.474	420	386	26.806	61	72
Máximo	7.896	20.185	151.255	2.010	2.010	155.614	201	471
Suma	3.604.991	9.059.847	66.937.160	870.688	864.679	68.676.452	115.419	128.868
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	63,58	165,22	1.101,46	13,16	13,42	1.349,88	1,19	2,76

Tipo 3F	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	4,16	1.182,92	3.676,87	192,39	21,03	55,77
Error típico	0,02	5,70	39,00	0,61	0,49	0,27
Mediana	4	1.145	3.393	192	25	58
Moda	4	1.062	2.741	192	25	58
Desviación estándar	0,62	180,29	1.233,25	19,17	15,49	8,68
Varianza de la muestra	0,38	32.505,59	1.520.911,27	367,38	240,06	75,28
Curtosis	-0,39	1,21	0,59	-0,36	-0,39	-0,39
Coefficiente de asimetría	-0,14	1,07	0,93	-0,06	0,14	0,14
Rango	3	1.027	7.449	103	75	42
Mínimo	2	895	1.354	141	0	44
Máximo	5	1.922	8.803	244	75	86
Suma	4.159	1.182.915	3.676.866	192.385	21.025	55.774
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	11,19	76,53	1,19	0,96	0,54

Para la generación de 1.000 soluciones factibles se han debido de generar aleatoriamente 66.520 combinaciones de las variables, lo que arroja un porcentaje de éxito de 1,50%. El tiempo empleado para la generación estas soluciones ha sido de 724,4 seg.

### 6.3.2.8 Modelo 4R: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 2. Cimiento Rígido.

En este caso para la consecución de 1.000 soluciones validas han sido necesario evaluar 55.440 configuraciones, un 79.3% menos que para el modelo tipo “2”, un 90.2% más que para el tipo “5” y un 5.1 % más que para el tipo “3” y empleando 988,5 segundos. Los parámetros más significativos del análisis estadístico de los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.8. Análisis estadístico de resultados (Modelo 4R).

Tipo 4R	C. Economico	Emission CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.446,08	8.673,23	65.977,18	923,76	920,48	63.085,64	120,37	130,97
Error típico	33,15	86,48	588,37	7,64	7,72	688,49	0,69	1,34
Mediana	3.251	8.131	62.944	892	888	58.758	118	122
Moda	2.695	7.114	66.476	734	795	70.564	113	108
Desviación estándar	1.048,32	2.734,73	18.606,01	241,64	244,00	21.771,89	21,96	42,48
Varianza de la muestra	1.098.971,78	7.478.735,09	346.183.486,21	58.388,19	59.534,39	474.015.262,59	482,20	1.804,69
Curtosis	0,35	0,50	0,54	0,72	0,69	0,14	0,63	19,09
Coefficiente de asimetría	0,86	0,89	0,83	0,73	0,70	0,81	0,61	3,69
Rango	5.858	15.750	113.394	1.648	1.687	114.650	151	398
Mínimo	1.548	3.610	29.540	427	388	22.886	65	76
Máximo	7.406	19.360	142.934	2.075	2.075	137.536	216	474
Suma	3.446.084	8.673.226	65.977.178	923.757	920.482	63.085.644	120.369	130.966
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	65,05	169,70	1.154,59	14,99	15,14	1.351,05	1,36	2,64

Tipo 4R	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	4,19	1.218,68	3.351,05	188,80	20,30	55,37
Error típico	0,02	6,18	38,82	0,68	0,51	0,28
Mediana	4	1.180	3.133	189	25	58
Moda	4	1.154	2.102	186	25	58
Desviación estándar	0,64	195,48	1.227,51	21,56	16,03	8,98
Varianza de la muestra	0,41	38.210,71	1.506.784,56	464,84	256,92	80,57
Curtosis	-0,65	0,87	0,28	-0,49	-0,65	-0,65
Coefficiente de asimetría	-0,19	0,98	0,84	-0,05	0,19	0,19
Rango	2	1.046	6.616	112	50	28
Mínimo	3	879	1.103	131	0	44
Máximo	5	1.925	7.719	243	50	72
Suma	4.188	1.218.677	3.351.052	188.804	20.300	55.368
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	12,13	76,17	1,34	0,99	0,56



6.3.2.9 Modelo 4F: Zapata Combinada Asimétrica Conf. 2. Modelo Elástico.

Se analizan a continuación las 1.000 primeras soluciones validas obtenidas mediante el modelo de cimiento '4', pero con un modelo de comportamiento elástico de transmisiones de tensiones al terreno.

Tabla 6.9. Análisis estadístico de resultados (Modelo 4F).

Tipo 4F	C. Economico	Emision CO2 (kg)	C. Energetico (MJ)	Peso Armadura (kg)	Peso Armadura Long (kg)	Peso total (kg)	N Barras Long	N Barras
Media	3.611,01	9.103,95	68.398,68	930,84	930,41	66.982,87	122,30	123,46
Error típico	35,70	93,21	628,18	7,90	7,91	731,80	0,69	0,74
Mediana	3.363	8.458	64.074	890	889	62.724	121	122
Moda	2.874	8.753	55.180	1.002	1.002	107.880	118	118
Desviación estándar	1.128,96	2.947,69	19.864,86	249,84	250,28	23.141,40	21,73	23,53
Varianza de la muestra	1.274.555,76	8.688.874,05	394.612.642,58	62.417,92	62.638,22	535.524.263,91	472,27	553,66
Curtosis	0,68	0,82	0,64	0,40	0,40	0,33	0,24	6,60
Coefficiente de asimetría	0,96	0,99	0,92	0,75	0,75	0,85	0,43	1,30
Rango	6.148	16.500	115.123	1.410	1.411	120.136	134	251
Mínimo	1.756	4.141	32.592	471	470	24.807	70	73
Máximo	7.904	20.641	147.715	1.881	1.881	144.943	204	324
Suma	3.611.007	9.103.948	68.398.679	930.843	930.406	66.982.867	122.296	123.461
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	70,06	182,92	1.232,71	15,50	15,53	1.436,03	1,35	1,46

Tipo 4F	N Tipo Barras	Relacion A/p	Consumo Agua (kg)	D medio	Unif Armado Long	Unif Armado Total
Media	4,18	1.181,82	3.573,82	187,25	20,48	55,47
Error típico	0,02	5,47	41,15	0,70	0,50	0,28
Mediana	4	1.150	3.327	188	25	58
Moda	4	995	4.136	191	25	58
Desviación estándar	0,64	173,04	1.301,40	22,18	15,94	8,93
Varianza de la muestra	0,41	29.942,61	1.693.641,12	492,17	254,15	79,70
Curtosis	-0,43	0,39	0,44	-0,27	-0,43	-0,43
Coefficiente de asimetría	-0,22	0,83	0,88	-0,05	0,22	0,22
Rango	3	935	6.846	125	75	42
Mínimo	2	891	1.218	120	0	44
Máximo	5	1.826	8.064	245	75	86
Suma	4.181	1.181.817	3.573.820	187.250	20.475	55.466
Cuenta	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Nivel de confianza(95,0%)	0,04	10,74	80,76	1,38	0,99	0,55

Para la generación de 1.000 soluciones factibles se han debido de generar aleatoriamente 62.081 combinaciones de las variables, lo que arroja un porcentaje de éxito de 1,61%. El tiempo empleado para la generación estas soluciones ha sido de 670,7 seg.

6.3.2.10 Correlaciones entre Funciones Objetivo:

Con objeto de poder determinar la posible existencia de una correlación entre las distintas funciones objetivo evaluadas, se procede a la comparación por parejas de las mismas.

Como criterio para determinar la existencia o no de una relación de dependencia, se procederá a la realización de una regresión lineal entre cada pareja de funciones objetivo, estimándose a partir del valor del parámetro de regresión, si existe o no dependencia entre ambas funciones.

Una vez realizado este análisis se concluyen las siguientes relaciones de dependencia lineal.

- Funciones objetivo **Coste Económico – Emisiones de CO<sub>2</sub>**, se obtienen valores del coeficiente de regresión por encima de 0.99 y valores de p-value < 0.05 para los cuatro modelos de cimentación, considerándose por tanto que existe una correlación lineal estadísticamente significativa entre ambas.

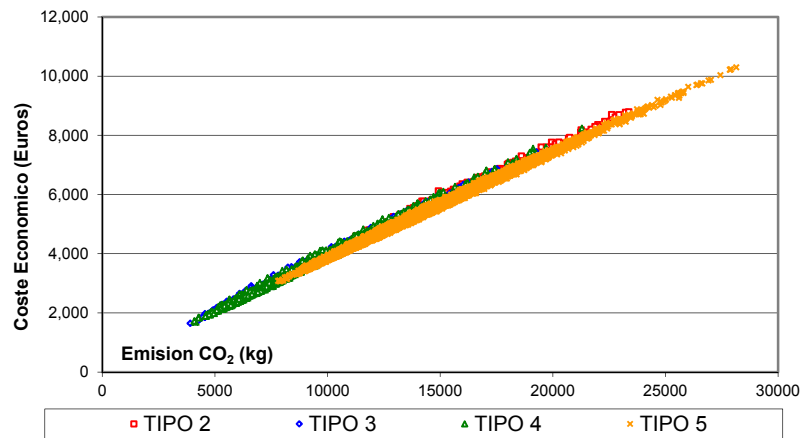


Figura 6.2. Gráfica Coste Económico-Emisión CO<sub>2</sub> (RW).

En la siguiente figura se muestra el resultado obtenido mediante el uso del software estadístico, Minitab [6].

**Regression Analysis: Coste Economico versus Emision CO2**

The regression equation is  
 Coste Economico = 188 + 0,364 Emision CO2

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	187,885	6,579	28,56	0,000
Emision CO2	0,364482	0,000677	538,33	0,000

S = 67,1545 R-Sq = 99,7% R-Sq(adj) = 99,7%

**Analysis of Variance**

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1306921660	1306921660	289800,79	0,000
Residual Error	998	4500705	4510		
Total	999	1311422365			

Para validar el modelo de regresión, se procede a un análisis de residuos.

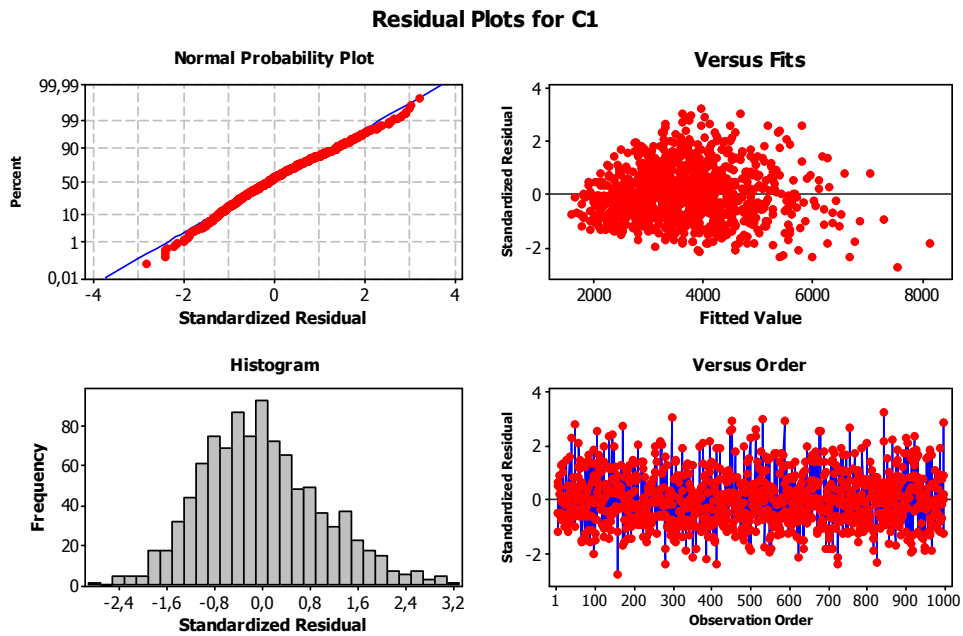


Figura 6.3. Analisis de residuos. Minitab [6].

Del análisis de resultados se confirma que los residuos siguen una función aproximadamente normal, presentan varianza constante, no presentan valores anómalos y son independientes, por lo que se puede concluir que la correlación propuesta es significativa.

- En la comparación entre las funciones **Coste Económico – Coste Energético**, se obtienen valores de coeficiente de Regresión superiores a 0.95 y valores de  $p\text{-value} < 0.05$ , determinándose por tanto que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre ambas.

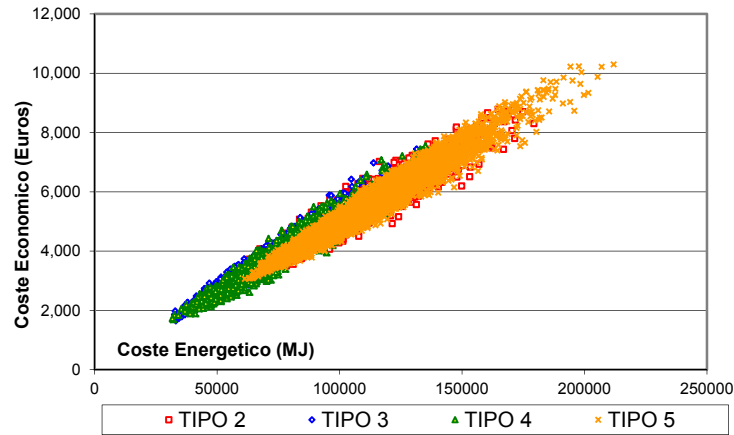


Figura 6.4. Gráfica Coste Económico-Coste Energético (RW).

- En la comparación entre las funciones **Coste Económico – Peso Total**, se obtienen valores de coeficiente de Regresión por encima de 0.9 y valores de  $p\text{-value} < 0.05$ , determinándose por tanto que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre ambas.

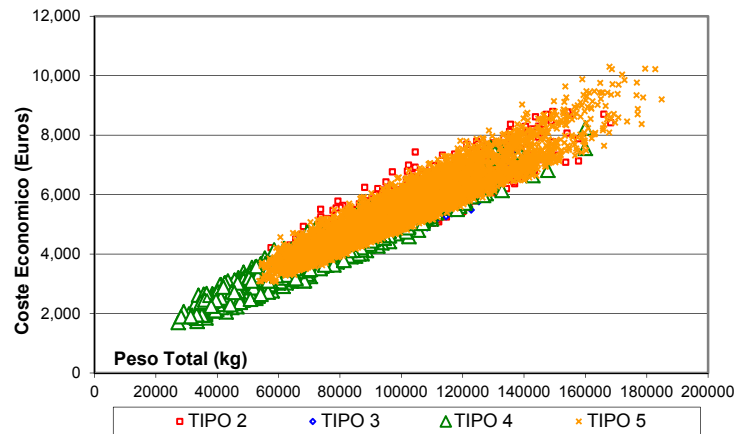


Figura 6.5. Gráfica Coste Económico-Peso Total (RW).

- En la comparación entre las funciones **Coste Económico – Consumo Agua**, se obtienen valores de coeficiente de Regresión por encima de 0.9 y valores de  $p\text{-value} < 0.05$ , determinándose por tanto que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre ambas:

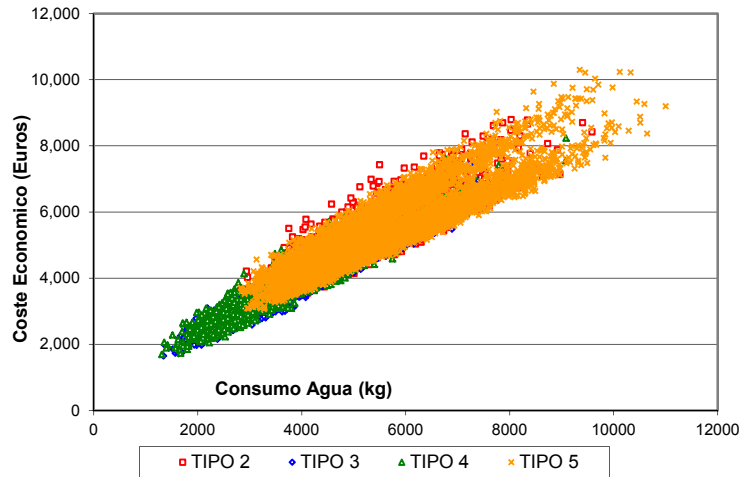


Figura 6.6. Gráfica Coste Económico-Consumo de agua (RW).

- En la comparación entre las funciones **Peso Total – Consumo Agua**, se obtienen valores de coeficiente de Regresión superior a 0.9 y valores de  $p\text{-value} < 0.05$ , determinándose por tanto que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre ambas.

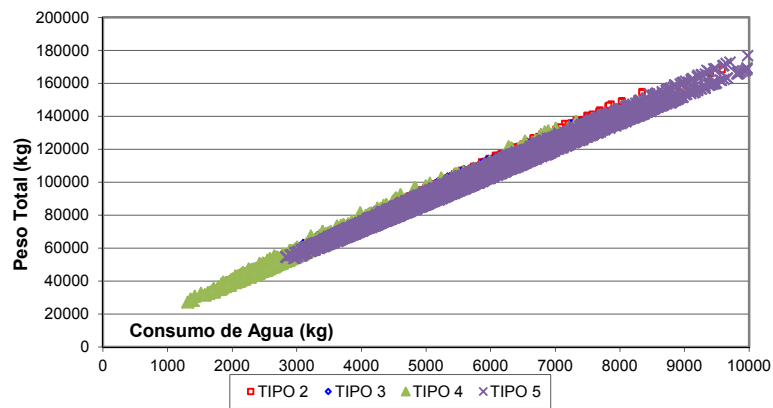


Figura 6.7. Gráfica Peso Total-Consumo de agua (RW).

- En la comparación entre las funciones **Número de Tipos de Barra / Uniformidad de Armado Total**, se obtienen valores de coeficiente de Regresión de 1.0, determinándose por tanto que existe una relación lineal estadísticamente significativa entre ambas.

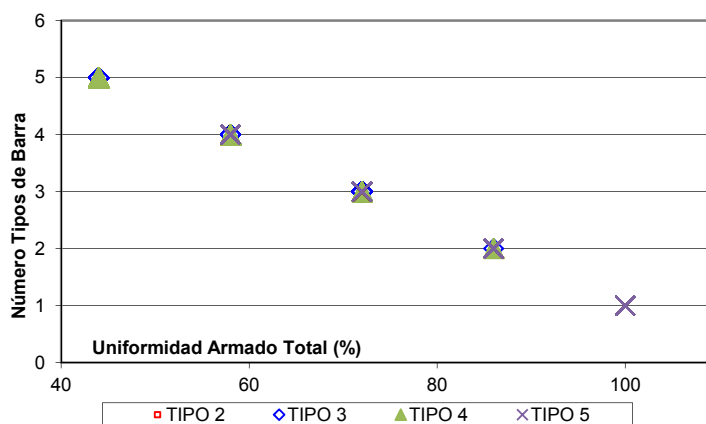


Figura 6.8. Gráfica N° Tipos de Barra-Uniformidad armado (RW).

Analizando la definición de la función objetivo, ‘Uniformidad de armado’:

$$U = 100 - (N - 1) \cdot (100 / ND)$$

Donde:

- N es el número de diámetros distintos utilizados
- ND es el número total de diámetros distintos existentes

Dado que el valor ‘ND’ es constante e igual a 7, puesto que es posible la disposición de armados de diámetro 6, 8, 10, 12, 16, 20 o 25 mm, la definición del parámetro quedaría como:

$$U = 114,28 - 14,28N$$

Quedando por tanto de manifiesto la relación entre las funciones, Uniformidad de armado y Número de diámetros distintos de armado utilizados.

Tras eliminar las funciones objetivo donde se ha confirmado la existencia de una relación lineal, las funciones objetivo definitivas a evaluar serán;

- Funciones Económicas. Coste Económico (Euros).
- Funciones de Coste Medioambiental:
  - Peso Armadura (kg)
- Funciones de ‘Constructibilidad’.
  - Número de Barras de armado.
  - Número de Tipo de Barras distintos.
  - Relación perímetro / Área ( $\text{mm}^{-1}$ ).
  - Diámetro Medio (cm).

### 6.3.2.11 Comparación de resultados.

Se comparan a continuación los resultados obtenidos para cada una de las funciones objetivo propuestas y cada uno de los modelos de cimentación estudiados.

#### Función Económica. Coste Económico

En la siguiente tabla se incluyen los resultados obtenidos para la optimización de la función objetivo, coste económico, para cada uno de los modelos de cimiento evaluados.

**Tabla 6.10. Análisis resultados función ‘Coste Económico’ (RW).**

Modelo	Coste Económico mínima (Euros)	% Variación
2 (Rígida)	1.528	+ 0.72%
2 (Flexible)	<b>1.517</b>	<b>Óptima</b>
5 (Rígida)	1.670	+ 4.81%
5 (Flexible)	1.570	+ 3.49 %
3 (Rígida)	1.726	+ 13.77 %
3 (Flexible)	1.632	+ 7.58 %
4 (Rígida)	1.548	+ 2.04 %
4 (Flexible)	1.756	+ 15.75 %

El modelo de cimentación más óptimo desde el punto de vista económico es el realizado con el modelo de cimiento ‘Tipo 2’, (Zapata excéntrica con Viga Centradora de ancho constante), con una ligera mejora de resultados con el uso del modelo elástico de transmisión de tensiones al terreno (inferior al 1%). A continuación estarían los modelos Tipo 5R, 5F, 3F y 4 R con incrementos entre un 2% y un 7%. Los modelos con peores resultados serían los modelos 3R y 4F con incrementos del orden del 13% al 15%. Las diferencias alcanzadas para cada modelo de cimiento, entre los modelos de cimiento rígido y modelo elástico, son muy bajas para la tipología de zapata excéntrica con viga riostra y combinada de ancho constante (alrededor del 1%), pero mas significativas en el resto de modelos (entre un 6 a 13%).

#### Funciones Medioambientales.

Como se indicó anteriormente, se determinó la existencia de una relación lineal entre las funciones objetivo, ‘Emisión de CO<sub>2</sub> (Medioambiental)’, ‘Consumo Energético’, ‘Consumo de Agua’ y ‘Coste Económico (función económica)’, por lo que las conclusiones derivadas de los resultados de optimización obtenidos para las funciones de tipo medioambiental, serán las mismas ya comentadas en el apartado anterior. La obtención de solución óptimas desde el punto de vista económico, llevarán asociadas la obtención de óptimos desde el punto de vista medioambiental.

En todo caso se incluyen los resultados obtenidos.

**Tabla 6.11. Análisis resultados función ‘Emisión CO<sub>2</sub>’. (RW).**

Modelo	Emisión CO <sub>2</sub> mínima (Kg)	% Variación
2 (Rígida)	3.641	+1.36%
2 (Flexible)	<b>3.592</b>	<b>Optima</b>
5 (Rígida)	4.003	+9.94%
5 (Flexible)	3.860	+7.46 %
3 (Rígida)	3.968	+10.46 %
3 (Flexible)	3.954	+10.07 %
4 (Rígida)	3.610	+0.50 %
4 (Flexible)	4.141	+15.28 %

Funciones de Constructibilidad.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para cada una de las funciones objetivo agrupadas dentro de los índices relativos a la ‘constructibilidad de una solución’, (Número de Barras de armado, Número de Tipo de Barras distintos, Relación perímetro / Área (mm<sup>-1</sup>), Diámetro Medio (cm).

**Tabla 6.12. Análisis resultados funciones de ‘constructibilidad’. (RW)**

Modelo	Nº de Barras Longitudinales		Nº de Barras Total mínimo		Número de Tipo de Barras distintos mínimo	
	mínimo	%	mínimo	%	mínimo	%
2 (Rígida)	65	+41.3%	76	+65.2%	2	+100%
2 (Flexible)	60	+30.4%	80	+73.9%	2	+100%
5 (Rígida)	<b>46</b>	<b>Optima</b>	<b>46</b>	<b>Optima</b>	<b>1</b>	<b>Optima</b>
5 (Flexible)	48	+4.3 %	48	+4.3 %	<b>1</b>	<b>Optima</b>
3 (Rígida)	74	+60.8%	78	+69.5%	2	+100%
3 (Flexible)	61	+32.6%	82	+78.2%	2	+100%
4 (Rígida)	65	+41.3%	76	+65.2%	3	+200%
4 (Flexible)	70	+52.1%	73	+58.7%	2	+100%

Modelo	Relación perímetro / Área Mínimo		Diámetro Medio (cm), Máximo,	
	Mínimo	%	Máximo,	%
2 (Rígida)	0,947	+19.6%	23,1	-7.6%
2 (Flexible)	0,937	+18.3%	22,5	-10.0%
5 (Rígida)	<b>0,792</b>	<b>Optima</b>	<b>25,0</b>	<b>Optima</b>
5 (Flexible)	0,816	+3.0 %	<b>25,0</b>	<b>Optima</b>
3 (Rígida)	0,884	+11.6%	24,4	-2.4%
3 (Flexible)	0,895	+13.0%	24,4	-2.4%
4 (Rígida)	0,879	+11.0%	24,3	-2.8%
4 (Flexible)	0,891	+12.5%	24,5	

En este caso, los mejores resultados desde el punto de vista de la ‘constructibilidad’, se han obtenido para el cemento resuelto mediante zapata combinada de ancho constante



(Tipo 5R). Este modelo es el que presenta los óptimos de todas las funciones objetivo analizadas. Dentro de este modelo, el correspondiente a cimiento rígido, presenta ligeras ventajas en las funciones objetivo de Número de barras de armado y relación Perímetro/Área, con respecto al análisis con modelo elástico, si bien las mejoras de un modelo a otro solo se ven afectadas entre un 3% a 5%.

### **6.3.3 Estrategia de Búsqueda local del Descenso (DLS).**

En este apartado se procede a la aplicación del método heurístico de Búsqueda local de descenso (**DLS**), para la optimización de las funciones objetivo seleccionadas en los apartados anteriores.

Tal y como se explicó en el Capítulo 5, consiste en la selección inicial de una primera solución factible del problema, en este caso, seleccionada aleatoriamente.

A partir de esta solución inicial se procede a escoger aleatoriamente un cierto número de variables, a las cuales se les aplicará un pequeño incremento positivo o negativo de su valor.

A continuación se evaluará la nueva solución, adoptándola en caso de resultar un valor de la función objetivo más óptimo y rechazándola en caso contrario.

En caso de que la nueva solución generada de cómo resultado un valor de la función objetivo más óptima, en la siguiente iteración se mantendrá las variables escogidas para su modificación, modificándose en caso contrario.

El algoritmo finalizará en función del criterio de parada, correspondiente al cumplimiento de un número concreto de iteraciones consecutivas sin obtención de mejoras.

#### **6.3.3.1 Ajuste del Algoritmo de DLS:**

Se procede a continuación a definir los parámetros de configuración del algoritmo de búsqueda local por entornos (DLS):

- Mecanismo de Generación.

El mecanismo de generación, como se ha explicado en apartados anteriores, será el encargado de provocar modificaciones en los valores de las variables escogidas entre iteraciones consecutivas.

Por tanto, el mismo se definirá mediante el número de variables a modificar y el incremento o decremento asignado a cada una de ellas.

Los incrementos o decrementos permitidos a cada variable ya se han definido en 3.6, mientras que el número de variables a modificar, será una variable a ajustar en función del tipo de cimentación.

**Tabla 6.13. N° Variables según modelo. Algoritmo DLS.**

	Variables Totales	N° Variables a modificar				
		2	4	6	8	10
<b>Modelo 1</b>	16	12.5 %	25.0 %	37.5 %	50 %	62.5 %
<b>Modelo 2</b>	21	9.5 %	19.0 %	28.6 %	38.1 %	47.6 %
<b>Modelo 3</b>	28	7.14 %	14.3 %	21.4 %	28.6 %	35.7 %
<b>Modelo 4</b>	28	7.14 %	14.3 %	21.4 %	28.6 %	35.7 %
<b>Modelo 5</b>	20	10.0 %	20.0 %	30.0 %	40.0 %	50.0 %

- Criterio de Parada.

Como mecanismo de parada del algoritmo, se establecerá el criterio de limitación de soluciones evaluadas sin mejora. Se impondrá como condición, que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea un coeficiente proporcional “K”, del número de posibles soluciones, al que designaremos como ‘Vecindad’. El valor de la vecindad, se describió anteriormente como las configuraciones posibles de las variables definitorias del problema que es capaz de producir el mecanismo de generación, desde una solución concreta, en un solo salto.

Su valor será:

$$N' = \binom{n}{p} = \frac{n!}{(n-p)! \cdot p!}$$

Donde:

- n: Es el número de posibles valores a adoptar por las variables. En todos los casos las variables podrán adoptar un incremento positivo o negativo de su valor. Se estimará inicialmente las combinaciones posibles solo para incrementos positivos.
- p: Es el número de elementos que forman cada combinación que como se determinó en el apartado anterior será hasta 2, 4, 6, 8 o 10 variables.

Por tanto:

**Tabla 6.14. Mecanismo de parada. Algoritmo DLS.**

	Número de Variables	N' 2	N' 4	N' 6	N' 8	N' 10
Modelo 1	16	120	1.820	8.008	12.870	8.008
Modelo 2	21	210	5.985	54.264	203.490	252.716
Modelo 3	28	378	20.475	376.740	3.108.105	13.123.110
Modelo 4	28	378	20.475	376.740	3.108.105	13.123.110
Modelo 5	20	190	4.845	38.760	123.970	184.756

Como cada variable podrá incrementarse o decrementarse, el valor de la vecindad definitivo será de,  $N=2$   $N'$ .

**Tabla 6.15. Mecanismo de parada. Vecindad. Algoritmo DLS.**

	Nº de Variables	Vecindad N'=2	Vecindad N'=4	Vecindad N'=6	Vecindad N'=8	Vecindad N'=10
Modelo 1	16	240	3.640	16.016	25.740	16.016
Modelo 2	27	420	11.970	108.528	406.980	705.432
Modelo 3	34	756	40.950	753.480	6.216.210	26.462.220
Modelo 4	34	756	40.950	753.480	6.216.210	26.462.220
Modelo 5	22	380	9.690	77.520	251.940	269.512

Para el ajuste del algoritmo se recurre a la realización de 100 experimentos iniciales para cada una de las configuraciones, mostrándose a continuación los resultados obtenidos para la optimización de la función objetivo, “Coste Económico”. Para el resto de funciones objetivo los resultados obtenidos han sido similares.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación en las siguientes tablas para cada uno de los modelos de cimentación propuestos:

**Tabla 6.16. Resultados sobre 100 experimentos. Ajuste Algoritmo DLS.**

Variables Modificadas	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Cálculo Total (seg)	Media Nº Iteraciones Utilizadas
<b>Tipo 2R</b>					
2	1.033 €	1.139 €	71,9 €	38	1.436
4	1.018 €	1.074 €	49,5 €	729	36.895
6	1.018 €	1.101 €	64,9 €	6.487	351.584
8	1.019 €	1.135 €	99,8 €	13.960	884.903
10	1.017 €	1.136 €	105,4 €	22.794	1.499.259
<b>Tipo 3R</b>					
2	1.274 €	1.946 €	361,2 €	57	1.710
4	1.265 €	1.774 €	153,7 €	1.340	49.782
6	1.265 €	1.744 €	143,5 €	19.143	814.095
8	1.275 €	1.726 €	167,1 €	142.232	6.744.315
10	1.297 €	1.749 €	139,7 €	577.608	27.822.242
<b>Tipo 4R</b>					
2	1.372 €	1.831 €	209,1 €	62	1.602
4	1.386 €	1.759 €	125,9 €	1.792	55.151
6	1.266 €	1.718 €	135,6 €	25.729	865.053
8	1.269 €	1.713 €	130,7 €	191.448	6.736.846

Variables Modificadas	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Cálculo Total (seg)	Media N° Iteraciones Utilizadas
<b>10</b>	1.269 €	1.933 €	223,7 €	674.318	21.332.167
<b>Tipo 5R</b>					
<b>2</b>	1.521 €	1.979 €	454,2 €	18	573
<b>4</b>	1.496 €	1.849 €	320,2 €	358	12.783
<b>6</b>	1.496 €	1.736 €	142,9 €	2.854	85.938
<b>8</b>	1.520 €	1.755 €	190,7 €	11.603	304.796
<b>10</b>	1.556 €	1.675 €	109,8 €	20.502	572.128

Los parámetros que arrojan mejores resultados en el conjunto de modelos de cimentación propuestos se corresponden con la modificación de hasta 4 variables. Los posibles estados alcanzados por una variable en cada perturbación será los de incrementarse, decrementarse o mantener el valor anterior.

– Análisis estadístico.

Al igual que se realizó para los resultados obtenidos con la búsqueda aleatoria de soluciones (RW), se procede a realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos mediante la técnica de DLS.

Para ello, se utiliza el software estadístico Minitab 15 [6], procediendo al estudio de ajuste de los resultados obtenidos con las siguientes distribuciones de probabilidad:

- Función Normal
- Función Lognormal
- 3-parameter Lognormal
- Exponencial
- 2-Parameter Exponential
- Weibull
- 3-Parameter Weibull
- Smallest Extrem Value
- Largest Extreme Value
- Gamma
- 3-Parameter Gamma.

- Logistic
- LogLogistic
- 3-Parameter Loglogistic.
- Johnson Transformation

Las conclusiones del análisis son que no se ha podido alcanzar ninguna correlación estadísticamente significativa con ninguna de las funciones de probabilidad estudiadas.

### 6.3.3.2 Aplicación de la Heurística DLS:

Una vez obtenidos los parámetros de configuración del algoritmo de optimización, se procede en este apartado a la realización de nuevo de un conjunto de experimentos, para cada modelo de cimentación. Los resultados se muestran a continuación, para cada tipo de función objetivo analizada.

#### Función Objetivo Coste Económico.

En la siguiente tabla se incluyen los resultados obtenidos para la función objetivo ‘Coste Económico’.

**Tabla 6.17. Resultados Coste Económico. Algoritmo DLS.**

Modelo	Coste Económico Mínimo (Euros)	Variación s/Óptimo (%)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Cálculo Promedio (seg)
<b>1</b>					
<b>5 Rígida</b>	1.596 €	<b>+54,3%</b>	1.764 €	160,6	401,8
<b>3 Rígida</b>	1.682 €	<b>+62,6%</b>	1.719 €	167,2	347,8
<b>4 Rígida</b>	1.578 €	<b>+52,6%</b>	1.743 €	142,0	347,2
<b>2 Rígida</b>	1.040 €	<b>+0,6%</b>	1.147 €	99,8	22,8
<b>5 Flexible</b>	1.639 €	<b>+58,5%</b>	1.707 €	76,2	97,0
<b>3 Flexible</b>	1.661 €	<b>+60,6%</b>	1.753 €	35,2	99,2
<b>4 Flexible</b>	1.503 €	<b>+45,4%</b>	1.627 €	114,2	84,2
<b>2 Flexible</b>	1.034 €	<b>Óptimo</b>	1.162 €	146,1	1.034,3

Como se puede apreciar, la tipología de zapata excéntrica con viga riostra “Tipo 2”, es la que menor coste económico aporta, presentando el análisis elástico simplificado, ligeras mejoras con respecto a la consideración de cimiento rígido, menos de un 1%.

A continuación, se sitúan el resto de tipologías (3R, 3F, 4R, 4F, 5R y 5F), con resultados en torno a una 45% a 62% superiores al óptimo encontrado con la tipología 2.

Función objetivo de Coste Medioambiental.

Como se pudo determinar anteriormente, existe una relación directa entre las funciones objetivo ‘Emisiones de CO<sub>2</sub>’, ‘Consumo de Energía’ y ‘Consumo de agua’ con la función ‘Coste Económico’, por lo que realmente no es necesario su evaluación, puesto que las conclusiones serán las mismas que las ya comentadas para la función ‘Coste Económico’.

Se incluyen a continuación los resultados obtenidos para la función objetivo ‘Peso de armadura’, que como se comentó en los apartados anteriores, puede formar parte tanto de las funciones de tipo medioambiental como de las funciones de ‘constructibilidad’. Del mismo modo que en el caso anterior, se obtendrán resultados para cada uno de los modelos de cimentación estudiados, incluyendo en cada caso un análisis como cimiento rígido y un análisis con un modelo elástico simplificado de transmisión de tensiones al terreno.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos.

**Tabla 6.18. Resultados “Mínimo Peso Armadura (kg)”. Algoritmo DLS.**

Modelo	Mínimo Peso Armadura (Kg)	
		% variación
5 Rígida	392	+110,8%
3 Rígida	312	+67,7%
4 Rígida	343	+84,4%
2 Rígida	189	+1,6%
5 Flexible	380	+104,3%
3 Flexible	304	+63,4%
4 Flexible	307	+65,1%
2 Flexible	186	<b>Óptimo</b>

El resultado es muy similar al obtenido para el coste económico. Los mejores resultados se obtienen con la tipología “2”, con valores muy similares sea con comportamiento de cimiento rígido o con el modelo elástico simplificado. El resto de tipologías se sitúan bastante alejados de la solución óptima, con sobre pesos entre el 60 al 110% superiores.

Función objetivo Constructibilidad.

Se muestran a continuación, agrupados en tablas, los datos óptimos obtenidos para cada modelo de cálculo analizado de las funciones objetivo, ‘Nº Barras de armado’, ‘Tipo de Barras de armado distintas’, ‘Relación Perímetro/Area’, ‘Diámetro medio’ y ‘Uniformidad de armado’.

En la tabla se remarca el valor óptimo alcanzado para cada función objetivo y la variación porcentual existente con el óptimo de los valores alcanzados por el resto de modelos estructurales.

Tabla 6.19. Resultados “Constructibilidad”. I. Algoritmo DLS.

Modelo	N° de Barras Total mínimo		Número de Tipo de Barras distin- tos mínimo	
		%		%
5 Rígida	<b>36</b>	<b>óptimo</b>	<b>1</b>	<b>óptimo</b>
3 Rígida	49	36,1%	2	100,0%
4 Rígida	48	33,3%	2	100,0%
2 Rígida	48	33,3%	2	100,0%
5 Flexible	37	2,8%	<b>1</b>	<b>óptimo</b>
3 Flexible	48	33,3%	2	100,0%
4 Flexible	46	27,8%	2	100,0%
2 Flexible	51	41,7%	2	100,0%

Tabla 6.20. Resultados “Constructibilidad”. II. Algoritmo DLS.

Modelo	Relación perímetro / Área Mínimo (mm <sup>-1</sup> )		Diámetro Medio máximo (cm)		Uniformidad Ar- mado Long Máxima	
		%		%		%
5 Rígida	0,574	<b>Óptimo</b>	25,0	<b>Óptimo</b>	100	<b>Óptimo</b>
3 Rígida	0,641	+11,7%	24,8	-0,8%	75	-25,0%
4 Rígida	0,646	+12,5%	24,8	-0,8%	75	-25,0%
2 Rígida	0,743	+29,4%	24,4	-2,4%	100	<b>Óptimo</b>
5 Flexible	0,609	+6,1%	25,0	<b>Óptimo</b>	100	<b>Óptimo</b>
3 Flexible	0,647	+12,7%	24,8	-0,8%	75	-25,0%
4 Flexible	0,646	+12,5%	24,8	-0,8%	75	-25,0%
2 Flexible	0,743	+29,4%	24,4	-2,4%	100	<b>Óptimo</b>

De los resultados obtenidos se puede deducir que el modelo de zapata combinada de ancho constante, Tipo 5, presenta los mejores resultados en relación al n° mínimo de armaduras, Diámetro medio, Uniformidad de armado, Relación perímetro/área y Número de tipos de barras, presentando a su vez muy buenos resultados respecto al parámetro de diámetro medio.

#### 6.3.4 Cristalización simulada Mono-objetivo, (SA, Simulated Annealing).

En este apartado se estudiará la aplicación del método Heurístico de Cristalización Simulada (SA), sobre cada uno de los modelos estructurales incluidos en el estudio, evaluando todas las funciones objetivo definidas en el Capítulo 3.

Para ello, inicialmente se procederá a un ajuste de los valores de configuración del algoritmo, descritos en el Capítulo 5, para lo que se realizarán una serie de experimentos sobre varias configuraciones.

6.3.4.1 Ajuste de los parámetros de configuración del Algoritmo.

Se describen a continuación los valores adoptados para el ajuste de los parámetros de configuración del algoritmo. En todos los casos se realizarán 20 experimentos sobre cada configuración, valor que se justificará con posterioridad.

- Mecanismo de Generación.

El mecanismo de generación, como se ha explicado en apartados anteriores, será el encargado de provocar modificaciones en los valores de las variables escogidas entre iteraciones consecutivas.

Por tanto, el mismo, se definirá mediante el número de variables a modificar y el incremento o decremento asignado a cada una de las variables del modelo.

La perturbación aplicada a cada variable podrá dar como resultado un incremento, decremento o que la variable continúe con su valor original.

Los incrementos o decrementos posibles de cada variable ya se han definido en 3.5, mientras que el número de variables a modificar, será un parámetro a ajustar.

Como se comentó en el Capítulo 5, la mayoría de autores fijan el porcentaje de variables a modificar entorno a un 20% del número total de variables, por lo que se ha escogido, valores para proceder al ajuste de este valor, que variarán del 9.5% al 62.5% según modelos.

Tabla 6.21. Número variables. Algoritmo SA.

	Variables Totales	Variables a modificar				
		≤2	≤4	≤6	≤8	≤10
<b>Modelo 1</b>	16	12.5 %	25.0 %	37.5 %	50 %	62.5 %
<b>Modelo 2</b>	21	9.5 %	19.0 %	28.6 %	38.1 %	47.6 %
<b>Modelo 3</b>	28	7.14 %	14.3 %	21.4 %	28.6 %	35.7 %
<b>Modelo 4</b>	28	7.14 %	14.3 %	21.4 %	28.6 %	35.7 %
<b>Modelo 5</b>	20	10.0 %	20.0 %	30.0 %	40.0 %	50.0 %

Los valores obtenidos en el ajuste para la función objetivo ‘Coste Económico’, para las distintas tipologías de cimentación analizadas, se indican en las siguientes tablas:



**Tabla 6.22. Resultados. Modelo Tipo 2R. Algoritmo SA.**

<b>Variables Modificadas</b>	<b>Coste Económico Mínimo (Euros)</b>	<b>Coste Económico medio (Euros)</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>T Cálculo Total (seg)</b>
<b>Tipo 2R</b>				
<b>2</b>	1.007 €	1.041 €	18,9	30,2
<b>4</b>	1.009 €	1.030 €	19,5	29,2
<b>6</b>	1.035 €	1.055 €	14,1	32,1
<b>8</b>	1.054 €	1.107 €	29,9	31,5
<b>10</b>	1.095 €	1.162 €	45,3	29,6
<b>Tipo 3R</b>				
<b>2</b>	1.412 €	1.719 €	92,6	59,4
<b>4</b>	1.258 €	1.704 €	98,5	45,3
<b>6</b>	1.250€	1.751 €	94,5	46,2
<b>8</b>	1.322 €	1.790 €	67,2	41,1
<b>10</b>	1.345 €	1.801 €	64,6	38,1
<b>Tipo 4R</b>				
<b>2</b>	1.470 €	1.698 €	80,1	60,1
<b>4</b>	1.465 €	1.718 €	68,1	49,6
<b>6</b>	1.700 €	1.731 €	30,8	45,7
<b>8</b>	1.706 €	1.717 €	9,7	40,8
<b>10</b>	1.710 €	1.734 €	18,7	38,3
<b>Tipo 5R</b>				
<b>2</b>	1.606 €	1.674 €	65,1	46,9
<b>4</b>	1.606 €	1.713 €	69,5	50,3
<b>6</b>	1.606 €	1.699 €	73,1	41,2
<b>8</b>	1.639 €	1.760 €	29,4	42,3
<b>10</b>	1.652 €	1.765 €	49,1	38,1
<b>Tipo 3F</b>				
<b>2</b>	1.458 €	1.648 €	103,7	388,8
<b>4</b>	1.450 €	1.823 €	586,1	314,0
<b>6</b>	1.450 €	2.194 €	1122,8	308,7
<b>8</b>	1.447 €	1.796 €	535,9	295,9
<b>10</b>	1.461 €	1.807 €	489,0	312,1
<b>Tipo 4F</b>				
<b>2</b>	1.418 €	1.859 €	692,1	365,1
<b>4</b>	1.401 €	1.725 €	447,5	374,7

Variables Modificadas	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Cálculo Total (seg)
6	1.401 €	1.909 €	634,7	305,6
8	1.404 €	1.609 €	298,5	272,7
10	1.501 €	1.745 €	467,3	265,4
Tipo 5F				
2	1.574 €	1.624 €	35,6	345,4
4	1.586 €	1.612 €	12,9	317,6
6	1.599 €	1.613 €	8,4	357,2
8	1.605 €	1.618 €	6,9	333,2
10	1.614 €	1.639 €	14,6	312,3

Como se comprueba, es con el movimiento de hasta 4 variables donde se obtienen mejores resultados en todos los casos, escogiéndose este valor para la configuración.

- Esquema de Enfriamiento. Temperatura inicial,  $T_0$ .

Para la determinación del parámetro de Temperatura inicial, se adoptará el Criterio de Johnson [3].

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta C(+)} }{\ln(p_0^{-1})}$$

Donde el numerador, indica los incrementos positivos entre iteraciones consecutivas de la función objetivo. Para la determinación del parámetro de las distintas funciones objetivo a analizar, se efectuará al inicio del experimento un paseo aleatorio, determinándose este parámetro de las primeras 50 soluciones cuya función objetivo analizada sea superior a la inicialmente establecida. El valor de ' $p_0$ ' será igual a 0.9

- Esquema de Enfriamiento. ley de evolución de la temperatura.

Siguiendo las indicaciones de Kirkpatrick [2] y Johnson [3], se adoptará una ley de evolución exponencial, con los siguientes parámetros:

$$T_{k+1} = \gamma^n \cdot T_0$$

Donde

- $T_0$ , es la temperatura inicial, ya calculada anteriormente
- $n$ , el número de etapa o escalón.

- $\gamma$ , el parámetro que define la forma de la evolución exponencial

Se realizarán experimentos para el ajuste del parámetro ' $\gamma$ ', adoptando para este los valores de 0.8, 0.7, 0.6, 0.5 y 0.4. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6.23. Ajuste parámetro "Gamma". Tipo 2R. (SA)**

<b>Gamma</b>	<b>Coste Económico Mínimo (Euros)</b>	<b>Coste Económico medio (Euros)</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>Media T Cálculo Total (seg)</b>
Tipo 2R				
<b>0,8</b>	1.021 €	1.057 €	19,3	41
<b>0,7</b>	1.029 €	1.063 €	18,3	28
<b>0,6</b>	1.032 €	1.062 €	17,8	29
<b>0,5</b>	1.018 €	1.058 €	21,6	34
<b>0,4</b>	1.022 €	1.047 €	21,4	38
Tipo 3R				
<b>0,8</b>	1.610 €	1.743 €	91,7	82
<b>0,7</b>	1.610 €	1.759 €	77,4	60
<b>0,6</b>	1.609 €	1.777 €	80,1	44
<b>0,5</b>	1.606 €	1.723 €	96,9	35
<b>0,4</b>	1.608 €	1.717 €	109,4	33
Tipo 4R				
<b>0,8</b>	1.701 €	1.716 €	15,3	84
<b>0,7</b>	1.699 €	1.727 €	18,0	60
<b>0,6</b>	1.439 €	1.707 €	97,7	41
<b>0,5</b>	1.440 €	1.719 €	74,2	38
<b>0,4</b>	1.695 €	1.722 €	17,1	38
Tipo 5R				
<b>0,8</b>	1.599 €	1.752 €	36,5	78
<b>0,7</b>	1.594 €	1.704 €	72,8	53
<b>0,6</b>	1.608 €	1.718 €	67,7	50
<b>0,5</b>	1.601 €	1.723 €	71,1	38
<b>0,4</b>	1.615 €	1.693 €	71,7	39
Tipo 3F				
<b>0,8</b>	1.450 €	1.851 €	535,7	642,6
<b>0,7</b>	1.436 €	1.625 €	243,0	443,3
<b>0,6</b>	1.450 €	1.750 €	436,2	367,8

<b>Gamma</b>	<b>Coste Económico Mínimo (Euros)</b>	<b>Coste Económico medio (Euros)</b>	<b>Desviación Típica</b>	<b>Media T Cálculo Total (seg)</b>
<b>0,5</b>	1.421 €	1.600 €	92,1	312,9
<b>0,4</b>	1.450 €	1.749 €	645,5	245,5
Tipo 4F				
<b>0,8</b>	1.401 €	1.758 €	485,9	501,3
<b>0,7</b>	1.401 €	1.581 €	244,1	364,0
<b>0,6</b>	1.486 €	1.892 €	543,7	275,9
<b>0,5</b>	1.502 €	1.781 €	616,1	236,2
<b>0,4</b>	1.418 €	1.599 €	235,5	242,5
Tipo 5F				
<b>0,8</b>	1.599 €	1.613 €	8,1	577,5
<b>0,7</b>	1.599 €	1.612 €	7,4	430,3
<b>0,6</b>	1.599 €	1.613 €	6,8	353,3
<b>0,5</b>	1.588 €	1.616 €	9,0	287,3
<b>0,4</b>	1.587 €	1.610 €	12,2	306,7

Los resultados muestran que la modificación de este parámetro no afecta significativamente en el resultado final de la función objetivo, pero si en el tiempo de cálculo. Esto es debido a que valores más altos implican que la ley se haga más extensa, es decir, existan mayor número de escalones de búsqueda a temperaturas elevadas, que es donde se produce un mayor número de aceptaciones de soluciones.

Así pues, se considerará un valor óptimo para este parámetro de valor 0,6 que aun siendo elevado, no provoca tiempos de cálculo excesivos.

- Esquema de Enfriamiento. Longitud de la Cadena de Markov.

Como ya se definió en el Capítulo 5, existen varios criterios establecidos para este parámetro en la bibliografía de referencia. En este caso, se adoptará el criterio de Johnson [3], imponiendo como condición que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea un porcentaje K, del número de posibles soluciones, 'Vecindad'. El valor de la vecindad, se describió como las configuraciones posibles de las variables definitorias del problema que es capaz de producir el mecanismo de generación, desde una solución concreta, en un solo salto.

Su valor será:

$$N' = \binom{n}{p} = \frac{n!}{(n-p)! \cdot p!}$$

Donde:

n: Es el número de posibles valores a adoptar por las variables. En todos los casos las variables podrán adoptar un incremento positivo o negativo de su valor. Se estimará inicialmente las combinaciones posibles solo para incrementos positivos.

p: Es el número de elementos que forman cada combinación que como se determinó en el apartado anterior será de 4 variables.

El valor de la vecindad definitivo será de  $N=2 \cdot N'$ .

**Tabla 6.24. Ajuste parámetro “Vecindad”. (SA)**

	Número de Variables	N'	Vecindad
<b>Modelo 1</b>	16	8.008	16.016
<b>Modelo 2</b>	21	54.264	108.528
<b>Modelo 3</b>	28	376.740	753.480
<b>Modelo 4</b>	28	376.740	753.480
<b>Modelo 5</b>	20	38.760	77.520

Por otro lado, para impedir la entrada en bucles infinitos se añadirá una segunda condición de enfriamiento consistente en establecer la condición de que el número de intentos realizados en cada escalón sea como máximo 2 veces el valor de la vecindad.

En relación al parámetro ‘K’, se adoptan los valores de 0.1%, 0.2 %, 0.4 %, 0.8% y 1.6%, procediéndose a la realización de experimentos con estos valores, cuyos resultados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 6.25. Ajuste parámetro “K”. Tipo 2. (SA)**

K	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>Tipo 2R</b>				
<b>0,001</b>	1.041 €	1.151 €	111,1	9,3
<b>0,002</b>	1.023 €	1.073 €	30,6	17,4

K	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>0,004</b>	1.024 €	1.064 €	26,1	32,1
<b>0,008</b>	1.017 €	1.051 €	19,2	56,6
<b>0,016</b>	1.021 €	1.036 €	10,0	106,6
<b>Tipo 3R</b>				
<b>0,001</b>	1.609 €	1.744 €	116,0	11,0
<b>0,002</b>	1.610 €	1.738 €	109,8	22,5
<b>0,004</b>	1.606 €	1.748 €	132,8	42,7
<b>0,008</b>	1.606 €	1.781 €	64,1	96,7
<b>0,016</b>	1.767 €	1.802 €	21,8	188,7
<b>Tipo 4R</b>				
<b>0,001</b>	1.440 €	1.724 €	118,3	32,2
<b>0,002</b>	1.445 €	1.701 €	94,5	60,1
<b>0,004</b>	1.692 €	1.728 €	26,4	40,8
<b>0,008</b>	1.701 €	1.717 €	10,9	38,3
<b>0,016</b>	1.699 €	1.718 €	13,4	38,4
<b>Tipo 5R</b>				
<b>0,001</b>	1.596 €	1.666 €	68,4	10,1
<b>0,002</b>	1.596 €	1.677 €	68,9	20,5
<b>0,004</b>	1.619 €	1.692 €	70,8	45,1
<b>0,008</b>	1.620 €	1.738 €	49,2	95,3
<b>0,016</b>	1.622 €	1.753 €	31,0	177,3
<b>Tipo 3F</b>				
<b>0,001</b>	1.469 €	1.620 €	86,9	91,9
<b>0,002</b>	1.450 €	1.878 €	748,0	173,7
<b>0,004</b>	1.450 €	1.822 €	651,3	343,5
<b>0,008</b>	1.402 €	1.809 €	596,7	653,2
<b>0,016</b>	1.450 €	2.146 €	817,0	1303,4
<b>Tipo 4F</b>				
<b>0,001</b>	1.401 €	1.726 €	549,3	79,6
<b>0,002</b>	1.401 €	1.579 €	242,5	155,6
<b>0,004</b>	1.401 €	1.703 €	455,9	298,5
<b>0,008</b>	1.401 €	1.899 €	599,5	584,8
<b>0,016</b>	1.401 €	1.868 €	570,6	1139,6

K	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>Tipo 5F</b>				
<b>0.001</b>	1.578 €	1.618 €	16,9	86,2
<b>0.002</b>	1.587 €	1.610 €	10,9	172,4
<b>0.004</b>	1.578 €	1.608 €	11,2	336,6
<b>0.008</b>	1.599 €	1.613 €	5,8	743,8
<b>0.016</b>	1.599 €	1.607 €	6,8	1.471,0

El valor de configuración para este parámetro, con el que se han obtenido mejores resultados de la función objetivo analizada, ha sido con un valor del 0.2%.

- Esquema de Enfriamiento. criterio de congelación:

Finalmente, siguiendo los criterios marcados por Johnson [3], las condiciones impuestas para la finalización del proceso serán:

- 1) Ratio de aceptación. Que el número de intentos válidos aceptados en el escalón este por debajo de un cierto porcentaje de los intentos válidos. Se suele establecer un valor entorno al 1%.  
Se realizarán experimentos adoptando valores del 0.5%, 1.0%, 2.0%, 4.0% y 8.0 %, para determinar el óptimo de este parámetro de configuración.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 6.26. Ajuste parámetro “Congelación”. Tipo 2R. (SA).**

Congelación	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>Tipo 2R</b>				
<b>0.005</b>	1.024 €	1.032 €	6,5	78,3
<b>0.01</b>	1.020 €	1.044 €	13,0	45,0
<b>0.02</b>	1.029 €	1.059 €	17,9	31,3
<b>0.04</b>	1.049 €	1.096 €	30,1	19,8
<b>0.08</b>	1.069 €	1.142 €	40,6	12,6
<b>Tipo 3R</b>				
<b>0.005</b>	1.606 €	1.735 €	102,3	142,2
<b>0.01</b>	1.607 €	1.703 €	91,7	76,5

Congelación	Coste Económico Mínimo (Euros)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>0.02</b>	1.610 €	1.736 €	103,9	44,3
<b>0.04</b>	1.607 €	1.750 €	80,3	26,3
<b>0.08</b>	1.649 €	1.780 €	76,2	15,2
<b>Tipo 4R</b>				
<b>0.005</b>	1.691 €	1.724 €	26,8	161,3
<b>0.01</b>	1.691 €	1.724 €	22,5	81,7
<b>0.02</b>	1.702 €	1.722 €	19,0	46,6
<b>0.04</b>	1.701 €	1.733 €	25,3	24,9
<b>0.08</b>	1.693 €	1.729 €	29,0	15,5
<b>Tipo 5R</b>				
<b>0.005</b>	1.596 €	1.703 €	72,3	173,2
<b>0.01</b>	1.609 €	1.708 €	70,6	80,1
<b>0.02</b>	1.610 €	1.737 €	59,7	48,6
<b>0.04</b>	1.624 €	1.716 €	61,7	25,2
<b>0.08</b>	1.653 €	1.726 €	50,4	13,7
<b>Tipo 4F</b>				
<b>0.005</b>	1.401 €	1.653 €	317,3	1093,7
<b>0.01</b>	1.418 €	1.573 €	209,9	580,1
<b>0.02</b>	1.418 €	1.847 €	702,8	302,3
<b>0.04</b>	1.418 €	1.655 €	502,4	173,9
<b>0.08</b>	1.478 €	1.734 €	529,8	106,3
<b>Tipo 5F</b>				
<b>0.005</b>	1.599 €	1.612 €	7,3	1.243,5
<b>0.01</b>	1.599 €	1.613 €	7,0	653,1
<b>0.02</b>	1.599 €	1.614 €	5,1	391,6
<b>0.04</b>	1.599 €	1.611 €	6,9	207,5
<b>0.08</b>	1.599 €	1.619 €	15,4	111,1

De los resultados obtenidos se deduce que el valor óptimo para este parámetro es del 1%.

- 2) para evitar problemas de generación de bucles infinitos, se añadirá una segunda condición. Se fijará un número máximo de escalones permitidos igual a 90.



Se ha comprobado en todos los experimentos realizados que nunca se ha llegado a alcanzar este valor, por lo que se considera adecuado como criterio ultimo para evitar la entrada en bucles de búsqueda infinitos.

#### 6.3.4.2 *Análisis Estadístico. Determinación del número de experimentos.*

Del mismo modo que se realizó tras la aplicación del método de búsqueda aleatoria, se ha efectuado un análisis de regresión sobre las distintas soluciones óptimas obtenidas, con objeto de poder evaluar el comportamiento de las mismas.

Para ello, se han analizado los datos de las 100 soluciones obtenidas con la aplicación del método de SA, para cada uno de los tipos de cimentación analizados y para cada uno de las funciones objetivo establecidas.

El análisis de regresión se realiza para las siguientes funciones de probabilidad.

- Función Normal ,Función Lognormal, 3-parameter Lognormal, Exponencial, 2-Parameter Exponential, Weibull, 3-Parameter Weibull, Smallest Extrem Value, Largest Extreme Value, Gamma, 3-Parameter Gamma, Logistic, LogLogistic, 3-Parameter Loglogistic y Johnson Transformation

El análisis de los datos se ha realizado mediante la aplicación del software Minitab 15 [6], determinándose que los valores se ajustan, con un nivel de confianza del 95%, a la función de probabilidad Weibull de 3 parámetros.

Esta metodología ya fue enunciada en 2008 por Paya et al. [5], donde se determinaba la calidad de las soluciones obtenidas en la optimización mediante el uso heurísticas, mediante la teoría de valores extremos, ajustando los resultados obtenidos a una función de probabilidad de Weibull de tres parámetros.

Esta metodología, permite la determinación de un valor umbral o coste del óptimo global, con el que poder determinar la calidad de soluciones aportadas por el algoritmo. Para la determinación del número mínimo de experimentos a realizar, se han analizado los resultados obtenidos tras la realización de 100 experimentos.

Se procede al ajuste de los resultados obtenidos en paquetes de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 50 experimentos, a la función de probabilidad Weibull 3 parámetros. En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos para la tipología de zapata combinada de ancho constante (Tipo 5R).

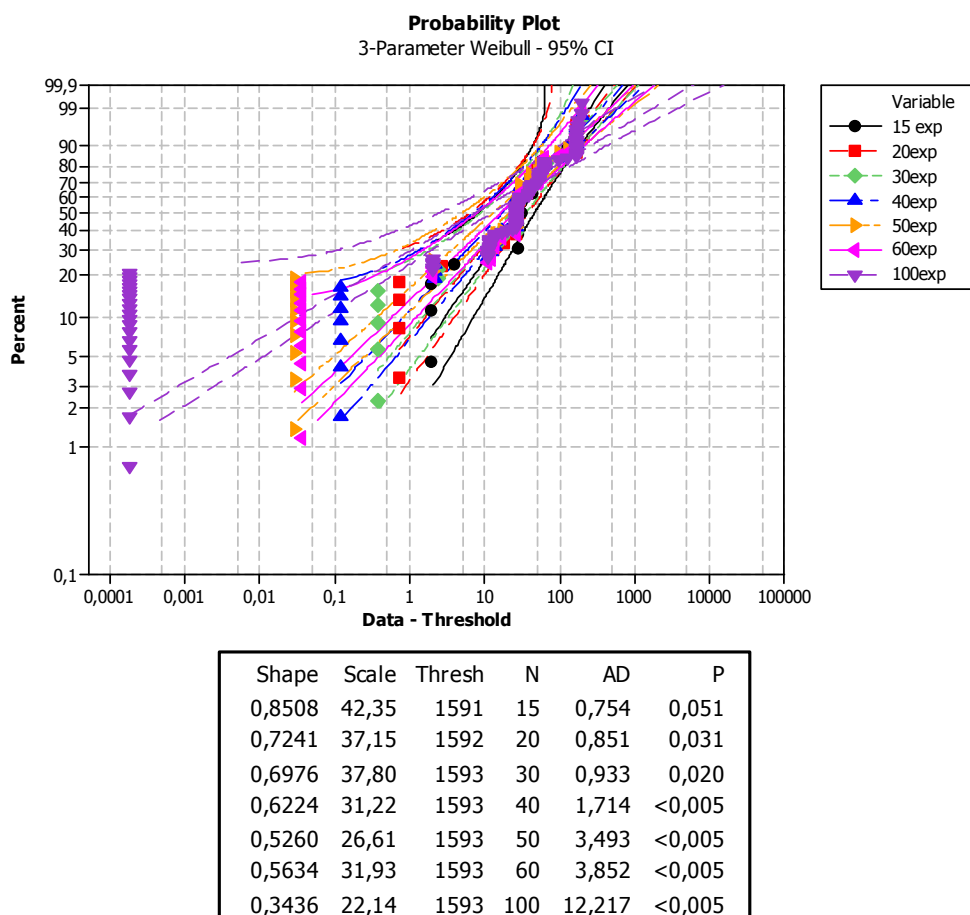


Figura 6.9. Gráficas de probabilidad, función 3 parámetros Weibull. ‘SA’. Minitub [6]

Se determina que a partir de 20 experimentos, el ajuste ya es estadísticamente significativo y el valor umbral obtenido (Threshold), es suficientemente estable ( $p\text{-value} < 0.05$ ), por lo que se fijará este número de experimentos para la obtención de los óptimos de cada función objetivo.

#### 6.3.4.3 Optimización de las Funciones Objetivo.

Una vez ajustado los valores de configuración del algoritmo de S.A., se procederá a determinar los óptimos de las distintas funciones objetivo, realizando 20 experimentos para cada una de las tipologías estructurales escogidas para el análisis.

En las siguientes tablas, se muestran los resultados obtenidos para cada función objetivo.

Funciones Económicas. Coste Económico (Euros):

Se muestra en la siguiente tabla, los valores óptimos de ‘Coste Económico’ de cada conjunto de 20 experimentos realizados para cada modelo estructural de cimiento.

**Tabla 6.27. Resultados ‘Coste económico’. Algoritmo SA.**

Tipología	Coste Económico Mínimo (Euros)	Variación (%)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Cálculo Promedio (seg)
<b>Tipo 5 Rígida</b>	1.593 €	64,7%	1.642 €	56,7	35,8
<b>Tipo 2 Rígida</b>	1.003 €	3,4%	1.067 €	32,0	37,2
<b>Tipo 3 Rígida</b>	1.670 €	72,7%	1.788 €	66,3	44,3
<b>Tipo 4 Rígida</b>	1.504 €	55,5%	1.720 €	81,4	46,6
<b>Tipo 5 Flexible</b>	1.556 €	60,9%	1.605 €	16,7	93,1
<b>Tipo 2 Flexible</b>	967 €	0,0%	1.085 €	106,8	734,4
<b>Tipo 3 Flexible</b>	1.434 €	48,3%	1.748 €	12,9	77,1
<b>Tipo 4 Flexible</b>	1.401 €	44,9%	1.550 €	113,3	80,9

Como se aprecia, la opción más óptima desde el punto de vista económico se alcanza con la solución de zapata excéntrica con viga riostra (Tipo 2), presentando ligera mejora en el resultado con el uso del modelo elástico de tensiones en el terreno (variaciones inferiores al 4%). Le siguen los modelos 3 y 4 con análisis elástico, que presentan valores superiores en torno a un 45 a 48%. Finalmente los modelos 3R, 4R, 5R y 5F con valores de coste económico superiores en un 55 a 73% superiores al óptimo.

Para verificar la calidad de los resultados, se procede al ajuste de los valores obtenidos a la función de probabilidad Weibull 3 parámetros, mediante el uso del software Minitub [6], obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 6.28. Ajuste Weibull. Resultados ‘Coste económico’.**

Tipología	Coste Económico Mínimo (Euros)	Valor Umbral Weibull (Euros)	Variación (%)	Shape	Scale	p-value
<b>Tipo 5 Rígida</b>	1.593 €	1.593 €	+0.00%	0,3436	22,14	<0,005
<b>Tipo 2 Rígida</b>	<b>1.003 €</b>	1.003 €	+0.00%	1,133	28,29	0,008
<b>Tipo 3 Rígida</b>	1.670 €	1.668 €	+0.11%	1,018	179,7	<0,005
<b>Tipo 4 Rígida</b>	1.504 €	1.503 €	+0.06%	1,25	305,2	<0,005
<b>Tipo 5 Flexible</b>	1.556 €	1.556 €	+0.00%	1,181	63,92	<0,005
<b>Tipo 2 Flexible</b>	967 €	963 €	+0.41%	0,990	134,8	0,006
<b>Tipo 3 Flexible</b>	1.434 €	1.432 €	+0.14%	0,761	591,4	<0,005
<b>Tipo 4 Flexible</b>	1.401 €	1.401 €	+0.00%	0,681	323,6	<0,005

Funciones Medioambientales.

Como se indicó anteriormente, todas las funciones medioambientales planteadas inicialmente, Emisión de CO<sub>2</sub>, Consumo de agua, Peso de la solución y Consumo Energético, ya se confirmó en el estudio de Random Walk, que presentaban una relación directa con la función de coste económico, por lo que las soluciones óptimas desde el punto de vista económico también lo serán desde el punto de vista medioambiental.

Funciones de ‘Constructibilidad’. Peso Armadura Total (kg)

Se incluyen a continuación los resultados obtenidos de la optimización de la función de constructibilidad, ‘Peso armadura total’.

**Tabla 6.29. Resultados ‘Peso Armado’.**

Tipología	Peso Armado Mínimo (kg)	Variación (%)	Peso Armado medio	Desviación Típica
Tipo 5 Rígida	391	103,6%	415	26
Tipo 2 Rígida	196	2,1%	211	8
Tipo 3 Rígida	310	61,5%	328	9
Tipo 4 Rígida	375	95,3%	382	6
Tipo 5 Flexible	384	100,0%	400	6
Tipo 2 Flexible	192	Óptimo	205	6
Tipo 3 Flexible	295	53,6%	353	107
Tipo 4 Flexible	330	71,9%	340	9

Los mejores resultados se obtienen para la tipología de zapata excéntrica con viga rios-tra (tipo 2), con valores muy similares entre el modelo rígido y el modelo elástico. El resto de tipologías presenta valores superiores en un 50% a 100%.

Funciones de Constructibilidad. Resultados ‘Número de barras’. Algoritmo SA.

Se muestra en la siguiente tabla, los valores óptimos de la función ‘Número de barras longitudinales’, de cada conjunto de 20 experimentos realizados.

**Tabla 6.30. Resultados. N° Barras. Algoritmo SA.**

Tipología	N° Barras	Variación (%)	Media N° Barras	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	36	+2,9%	38	2,5	0,0
Tipo 2 Rígida	45	+28,6%	46	0,6	45,6
Tipo 3 Rígida	47	+34,3%	48	0,2	65,4
Tipo 4 Rígida	47	+34,3%	47	0,7	76,9
Tipo 5 Flexible	35	Óptimo	38	1,1	453,2

Tipología	Nº Barras	Variación (%)	Media Nº Barras	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>Tipo 2 Flexible</b>	47	+34,3%	47	0,7	3.548,5
<b>Tipo 3 Flexible</b>	46	+31,4%	53	9,7	357,8
<b>Tipo 4 Flexible</b>	45	+28,6%	46	0,9	356,5

En este caso los mejores resultados se obtienen para la tipología de zapata combinada de ancho constante (tipo 5), con valores muy similares entre el comportamiento rígido y el flexible. El resto de tipologías presenta valores superiores en un 28% a 34%.

Funciones de ‘Constructibilidad’. Función objetivo Número de Tipos de Barras.

Se muestra en la siguiente tabla, los valores óptimos de la función ‘Número de tipo de barras distintos’ de cada conjunto de 20 experimentos realizados.

**Tabla 6.31. Resultados ‘Número Tipos de Barras’. Algoritmo SA.**

Tipología	Número Tipo Barras Mínimo	Variación (%)	Número Tipo Barras medio	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>Tipo 5 Rígida</b>	1	Optima	1	0,0	111,9
<b>Tipo 2 Rígida</b>	2	100,0%	2	0,0	55,4
<b>Tipo 3 Rígida</b>	2	100,0%	2	0,0	73,5
<b>Tipo 4 Rígida</b>	2	100,0%	2	0,0	63,2
<b>Tipo 5 Flexible</b>	1	Optima	1	0,0	483,0
<b>Tipo 2 Flexible</b>	2	Optima	2	0,2	4.765,0
<b>Tipo 3 Flexible</b>	2	100,0%	2	0,0	334,1
<b>Tipo 4 Flexible</b>	2	100,0%	2	0,0	308,0

Como se aprecia en los resultados, en este caso se ha logrado optimizar hasta el valor mínimo posible de la función objetivo, 1 tipo de barra, para la tipología 5, mientras que para el resto de tipologías, el valor mínimo de tipos de barras alcanzado ha sido de 2. En el caso de la zapata excéntrica con viga riostra, este valor mínimo está condicionado por la disposición en todos los casos de armadura de cortante en la viga riostra, lo que dificulta uniformizar los tipos de barra.

Funciones de ‘Constructibilidad’. Función objetivo Relación perímetro /Área.

Como se indicó en anteriores capítulos, con este parámetros se intenta detectar aquellas soluciones que presentan, para una misma área de cimiento, un valor de perímetro menor, lo que puede interpretarse como una mejora en la ‘constructibilidad’ de la solución, al ser necesario menor trabajo de encofrado y excavación.

Se muestra en la siguiente tabla, los valores óptimos de la función ‘Relación Perímetro/área’ de cada conjunto de 20 experimentos realizados para cada modelo estructural de cimiento.

**Tabla 6.32. Resultados Relación Perímetro/Área. Algoritmo SA.**

Tipología	Relación P/A Mínimo (mm <sup>-1</sup> )	Variación (%)	Relación P/A medio	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	0,260	Optima	0,273	0,031	123
Tipo 2 Rígida	0,743	+185,8%	0,758	0,016	78
Tipo 3 Rígida	0,423	+62,7%	0,459	0,052	116
Tipo 4 Rígida	0,441	+69,6%	0,534	0,077	139
Tipo 5 Flexible	0,308	+18,5%	0,365	0,141	667
Tipo 2 Flexible	0,743	+185,8%	0,766	0,024	5.372
Tipo 3 Flexible	0,415	+59,6%	0,504	0,157	625
Tipo 4 Flexible	0,441	+69,6%	0,611	0,099	710

Como era de esperar, para este parámetro se obtienen los valores mínimos en la tipología “5”, Zapata combinada de ancho constante, que es la que muestra mayor regularidad, las tipologías 3 y 4 muestran valores algo superiores, entre un 59% a 69%, mientras que las tipologías 2, muestran los peores resultados con valores superiores del orden de un 185% superiores.

Funciones de ‘Constructibilidad’. Función objetivo Diámetro Medio (mm).

Como ya se indicó en el capítulo 3, este parámetro es introducido por Calavera et al [7], y surge de unos estudios realizados en Holanda. Se indica que valores altos del índice  $\phi_{med}$ , asociados al empleo de diámetros de armadura elevados, implican menor número de Horas – Hombre de colocación, por lo que se tratará por tanto de maximizar este índice para optimizar el tiempo de colocación, mejorando por tanto la rapidez de ejecución de la solución. Se muestra en la siguiente tabla, los valores óptimos de la función ‘Diámetro Medio’ de cada conjunto de 20 experimentos realizados para cada modelo estructural de cimiento.

**Tabla 6.33. Resultados parámetro Diámetro medio. Algoritmo SA.**

Tipología	Diámetro medio máximo	Variación (%)	Media Diámetro medio	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	25,0	Optima	25,0	0,0	122,1
Tipo 2 Rígida	24,7	-1,2%	24,6	0,1	45,2
Tipo 3 Rígida	25,0	Optima	25,0	0,0	54,2
Tipo 4 Rígida	25,0	Optima	25,0	0,1	62,4

Tipología	Diámetro medio máximo	Variación (%)	Media Diámetro medio	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
<b>Tipo 5 Flexible</b>	25,0	Optima	25,0	0,0	861,3
<b>Tipo 2 Flexible</b>	24,7	-1,2%	24,6	0,1	3.682,6
<b>Tipo 3 Flexible</b>	25,0	Optima	25,0	0,0	293,7
<b>Tipo 4 Flexible</b>	25,0	Optima	25,0	0,1	361,5

Como se aprecia en los resultados en este caso se ha logrado optimizar hasta el valor máximo posible de la función objetivo (Diámetro medio 25mm) para las tipologías 3, 4 y 5. Únicamente la tipología 2, zapata excéntrica con viga riostra, es la que presenta valores de DM algo inferiores al mínimo, -1.2%, motivado por la necesidad de disposición de armadura de cortante en la viga riostra, cuyos diámetros permitidos varían entre 6, 8, 10, 12 y 16 mm, lo que imposibilita la consecución para las tipologías 2, de un valor máximo del parámetro ‘Diámetro Máximo’.

#### 6.4 Optimización multi-objetivo.

Finalmente, se aplicará la Heurística Simulated Annealing, pero adaptada para la búsqueda multi-objetivo, MOSA, descrita en el Capítulo 5. Tras el análisis realizado en apartados anteriores, donde se estimaron las funciones objetivo que no disponían de relación entre ellas, el estudio se centrará en las siguientes funciones:

- Coste Económico.
- Peso de armadura.
- Número de Barras de armado.
- Número de Tipos de barra de armado distintas.
- Relación perímetro/área.
- Diámetro Medio.

Al igual que en resto de métodos aplicados, se realizarán una serie inicial de experimentos que permitan obtener los valores óptimos para la configuración del algoritmo. A continuación se describen los distintos parámetros adoptados para la configuración del algoritmo.

##### 6.4.1 Esquema de enfriamiento.

###### 6.4.1.1 Temperatura inicial $T_0$ .

A semejanza del criterio establecido por Johnson [3], para la determinación de la Temperatura inicial en el caso de búsqueda mono-objetivo, para la determinación de las

Temperaturas iniciales de cada una de las funciones objetivo, adoptaremos las siguientes hipótesis.

Suponiendo que:

$$p = \prod_{i=1}^m e^{-\frac{\Delta f_i}{T_i}} \quad \text{de donde} \quad \frac{1}{p} = \prod_{i=1}^m e^{\frac{\Delta f_i}{T_i}} \quad \text{y} \quad \ln(p^{-1}) = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta f_i}{T_i}$$

En el instante inicial  $x_0$ :

$$\ln(p_0^{-1}) = \sum_{i=1}^m \frac{\overline{\Delta f}_i}{T_{0i}}$$

Estimando

$$T_{0i} = \frac{\overline{\Delta f}_i}{\alpha_i \cdot \ln(p_0^{-1})} = \frac{T_{0i,1}}{\alpha_i} \longrightarrow T_{0i,1} = \frac{\overline{\Delta f}_i}{\ln(p_0^{-1})}$$

Donde  $T_{0i,1}$  es la temperatura inicial con uno solo de los criterios objetivo.

Operando:

$$\ln(p_0^{-1}) = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \frac{\overline{\Delta f}_i}{T_{0i,1}} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \ln(p_0^{-1}) \longrightarrow \sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$$

La determinación de los pesos,  $\alpha_i$ , para cada función objetivo se realizará de forma aleatoria.

#### 6.4.1.2 Ley de evolución de la temperatura.

En este caso se adoptará la misma secuencia de enfriamiento ya adoptada para el método mono-objetivo:

$$T_{k+1} = \gamma^k \cdot T_0$$

Donde

$T_0$ , es la temperatura inicial

$K$ , es el número de etapa o escalón



$\gamma$ , es un coeficiente de valor entre 0.5 a 0.99, Kirkpatrick[2], Johnson[3], Nahar [4].

Los valores finalmente adoptados, son los ya obtenidos mediante la aplicación del método de optimización mono-objetivo.

#### *6.4.1.3 Longitud de la cadena de Markov. Criterio de equilibrio.*

Este criterio marcará la condición de paso de un escalón de temperatura al siguiente y por consiguiente el número de iteraciones a realizar en cada escalón, (longitud de la cadena de Markov).

Siguiendo la analogía con el modelo mono-objetivo, se planteará el criterio establecido por Johnson [3], que adopto como condición que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón, sea un porcentaje K del número de posibles soluciones (Vecindad).

Los valores finalmente adoptados, son los ya obtenidos mediante la aplicación del método de optimización mono-objetivo.

#### *6.4.1.4 Criterio de congelación.*

Se mantendrá el criterio de Johnson [3], recogido en el método mono-objetivo, donde se establece como condición que el ratio de aceptación de soluciones sea inferior a un cierto valor. Los valores finalmente adoptados, son los ya obtenidos mediante la aplicación del método de optimización mono-objetivo.

#### *6.4.2 Criterio de parada.*

Como condición de parada se impone la de lograr la estabilización de la frontera de Pareto, incluyendo como criterio adicional, el caso de alcanzar los óptimos de cada función objetivo, logrados en el análisis mono-objetivo. Tras la realización de un gran número de ensayos se obtiene un valor máximo de 6.000 experimentos, como criterio de parada.

#### *6.4.3 Resultados obtenidos MOSA.*

Los resultados obtenidos tras la aplicación del método multi-objetivo MOSA, son los mismos ya alcanzados con la evaluación mono-objetivo, puesto que se han podido alcanzar los mismos resultados en todos los casos.

## **6.5 Conclusiones y Análisis de resultados.**

Se incluyen en este apartado el análisis de los resultados obtenidos tras la aplicación de los distintos métodos de optimización empleados, para cada una de las soluciones de cimiento analizadas.

### **6.5.1 Relación entre funciones objetivo.**

Tras realizar un análisis de regresión lineal entre cada pareja de funciones objetivo evaluadas, se ha determinado la existencia de una correlación lineal estadísticamente significativa entre las siguientes funciones objetivo.

- Funciones objetivo Coste Económico – Emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Funciones objetivo Coste Económico – Coste Energético.
- Funciones objetivo Coste Económico – Peso Total.
- Funciones objetivo Coste Económico – Consumo Agua.
- Funciones objetivo Peso Total – Consumo Agua.
- Funciones objetivo Número de Tipos de Barra / Uniformidad de Armado.

Tras eliminar las funciones objetivo donde se ha confirmado la existencia de dependencia, las funciones objetivo definitivas a evaluar serán;

- Funciones Económicas
  - Coste Económico (Euros)
- Funciones de Coste Medioambiental:
  - Peso Armadura Total (kg)
- Funciones de Constructibilidad.
  - Número de Barras de armado totales
  - Número de Tipo de Barras distintos
  - Relación perímetro / Area (mm-1)
  - Diámetro Medio (cm).

### **6.5.2 Configuración óptima de Algoritmos.**

La realización de una serie de experimentos sobre el ejemplo propuesto, ha permitido la determinación del valor óptimo de los parámetros de configuración de los distintos métodos de optimización empleados.

Así pues, los valores finalmente adoptados para los parámetros de configuración de la heurística serán:

Algoritmo de Descent Local Search (DLS):

Se muestran a continuación los parámetros de configuración del algoritmo de optimización DLS.

- Mecanismo de Generación.

El mecanismo de generación se definirá mediante el número de variables a modificar y el valor de incremento o decremento asignado a cada una de ellas. Los valores de variación permitidos a cada variable ya se han definido en 3.5, mientras que el número de variables a modificar, se ha determinado en un valor de hasta 4.

- Criterio de Parada.

Como criterio de parada del algoritmo, se establecerá el criterio de limitación de soluciones evaluadas sin mejora. Se impondrá como condición, que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea un coeficiente proporcional “K”, del número de posibles soluciones, al que designaremos como ‘Vecindad’.

**Tabla 6.34. Mecanismo de parada. Vecindad. Algoritmo DLS.**

	Nº de Variables	Vecindad N'=2	Vecindad N'=4	Vecindad N'=6	Vecindad N'=8	Vecindad N'=10
Modelo 1	16	240	3.640	16.016	25.740	16.016
Modelo 2	27	420	11.970	108.528	406.980	705.432
Modelo 3	34	756	40.950	753.480	6.216.210	26.462.220
Modelo 4	34	756	40.950	753.480	6.216.210	26.462.220
Modelo 5	22	380	9.690	77.520	251.940	269.512

Algoritmo de Simulated Annealing Mono-objetivo (SA):

Se muestran a continuación los parámetros de configuración del algoritmo de SA.

- Número de Variables a modificar. Se adoptará un valor de hasta 4 variables a modificar.
- Ley de evolución de la temperatura. Se adoptará una ley de evolución exponencial, con los siguientes parámetros.

$$T_{k+1} = 0.6^n \cdot T_0$$

Donde  $T_0$  es la temperatura inicial  
n el número de etapa o escalón.

- Criterio de equilibrio (Longitud de la Cadena de Markov).

Las condiciones para el paso entre escalones serán:

- Que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea superior a un 0.2 % la vecindad.
- El número de intentos realizados en cada escalón sea como máximo 2 veces la vecindad.
- Criterio de congelación. Las condiciones impuestas para la finalización del proceso serán:
  - Ratio de aceptación. El número de intentos validos aceptados en el escalón este por debajo del 1% de los intentos válidos.
  - Número máximo de escalones permitidos igual a 90. Criterio para evitar problemas de generación de bucles infinitos.
- Número experimentos.

Se identifica un ajuste estadísticamente significativo de los valores óptimos obtenidos mediante la técnica de SA con la función de probabilidad Weibull 3 parámetros, determinándose que la realización de 20 experimentos permite obtener un valor umbral estable.

Algoritmo de Simulated Annealing Multi-objetivo (MOSA):

Se muestran a continuación los parámetros de configuración del algoritmo de SA.

- Número de Variables a modificar. Se adoptará el valor de hasta 4 variables a modificar.
- Ley de evolución de la temperatura. Se adoptará una ley de evolución exponencial, con los siguientes parámetros.

$$T_{k+1} = 0.6^n \cdot T_0$$

Donde  $T_0$  es la temperatura inicial

n el número de etapa o escalón.

- Criterio de equilibrio (Longitud de la Cadena de Markov). Las condiciones para el paso entre escalones serán:
  - Que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea superior a un 0.2 % la vecindad.
  - El número de intentos realizados en cada escalón sea como máximo 2 veces la vecindad.
- Criterio de congelación. Las condiciones impuestas para la finalización del proceso serán:

- Ratio de aceptación. El número de intentos validos aceptados en el escalón este por debajo del 1% de los intentos válidos.
  - Número máximo de escalones permitidos igual a 90. Criterio para evitar problemas de generación de bucles infinitos.
- Criterio de Parada:

Como condición de parada se impone la de lograr la estabilización de la frontera de Pareto, incluyendo como criterio adicional de parada, el caso de haber alcanzado los óptimos de cada función objetivo, logrados en el análisis mono-objetivo. Tras los experimentos realizados se ha fijado este valor en 500 experimentos.

### 6.5.3 Análisis de resultados técnicas mono-objetivo, RW, DLS, SA.

A continuación se procede a comparar los resultados obtenidos mediante cada una de las técnicas de optimización utilizadas.

#### Función de Coste Económico.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en la optimización económica realizada para todos los modelos de cimentación analizados, zapata excéntrica con viga riostra (Tipos 2R y 2F), zapata combinada de ancho constante (Tipos 5R y5F) y zapatas combinadas asimétricas (Tipos 3R, 3R, 3F y 4F).

**Tabla 6.35. Comparativa resultados “Coste Económico Mínimo”.**

Tipología	RW	DLS	SA	Variación RW-SA (%)	Variación DLS-SA (%)
2 (Rígida)	1.528 €	1.040 €	1.003 €	+52,3%	+3,7%
2 (Flexible)	1.517 €	1.034 €	967 €	+56,4%	+6,9%
5 (Rígida)	1.670 €	1.596 €	1.593 €	+4,8%	0,2%
5 (Flexible)	1.670 €	1.639 €	1.556 €	+7,3%	+5,3%
3 (Rígida)	1.726 €	1.682 €	1.670 €	+3,3%	+0,7%
3 (Flexible)	1.632 €	1.661 €	1.434 €	+13,8%	+15,8%
4 (Rígida)	1.548 €	1.578 €	1.504 €	+2,9%	+4,9%
4 (Flexible)	1.756 €	1.503 €	1.401 €	+25,3%	7,3%

Como se puede comprobar, los mejores resultados se obtienen con la aplicación de la técnica heurística de Simulated Annealing (SA), con mejoras de coste económico de hasta un 15%, con respecto a las obtenidas mediante la técnica de DLS. Los tiempos de proceso sin embargo son algo superiores con el uso del método de SA, que presenta tiempos de procesos medios entre 40 a 140 segundos para los modelos rígidos y de

330 a 2.500 seg, para los modelos flexibles, mientras que el método DLS, presenta tiempos de cálculo entre 22 a 400 seg para los modelos rígidos y de 89 a 1.030 para los modelos flexibles.

Funciones de ‘constructibilidad’:

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en la optimización de las distintas funciones de constructibilidad, para todos los modelos de cimentación analizados.

**Tabla 6.36. Comparación Resultados “Nº Barras de armado”.**

Tipología	RW	DLS	SA	Variación RW-SA (%)	Variación DLS-SA (%)
2 (Rígida)	76	48	45	+68,9%	+6,7%
2 (Flexible)	80	51	47	+70,2%	+8,5%
5 (Rígida)	<b>46</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	+27,8%	+0,0%
5 (Flexible)	48	37	35	+37,1%	+5,7%
3 (Rígida)	78	49	47	+66,0%	+4,3%
3 (Flexible)	82	48	46	+78,3%	+4,3%
4 (Rígida)	76	48	47	+61,7%	+2,1%
4 (Flexible)	73	46	45	+62,2%	+2,2%

**Tabla 6.37. Comparación Resultados “Número Tipo de Barras”.**

Tipología	RW	DLS	SA	Variación RW-SA (%)	Variación DLS-SA (%)
2 (Rígida)	2	2	2	0,0%	0,0%
2 (Flexible)	2	2	1	100,0%	100,0%
5 (Rígida)	1	1	1	0,0%	0,0%
5 (Flexible)	1	1	1	0,0%	0,0%
3 (Rígida)	2	2	2	0,0%	0,0%
3 (Flexible)	2	2	2	0,0%	0,0%
4 (Rígida)	3	2	2	50,0%	0,0%
4 (Flexible)	2	2	2	0,0%	0,0%

Tabla 6.38. Comparación Resultados “Relación P/A”.

Tipología	RW	DLS	SA	Variación RW-SA (%)	Variación DLS-SA (%)
2 (Rígida)	0,947	0,743	0,743	+27,5%	0,0%
2 (Flexible)	0,937	0,743	0,743	+26,1%	0,0%
5 (Rígida)	<b>0,792</b>	<b>0,574</b>	<b>0,260</b>	+204,6%	+120,8%
5 (Flexible)	0,816	0,609	0,308	+164,9%	+97,7%
3 (Rígida)	0,884	0,641	0,423	+109,0%	+51,5%
3 (Flexible)	0,895	0,647	0,415	+115,7%	+55,9%
4 (Rígida)	0,879	0,646	0,441	+99,3%	+46,5%
4 (Flexible)	0,891	0,646	0,441	+102,0%	+46,5%

Tabla 6.39. Comparación Resultados “Diámetro Medio”.

Tipología	RW	DLS	SA	Variación RW-SA (%)	Variación DLS-SA (%)
2 (Rígida)	23,1	24,4	24,7	-6,5%	-1,2%
2 (Flexible)	22,5	24,4	24,7	-8,9%	-1,2%
5 (Rígida)	<b>25,0</b>	<b>25,0</b>	<b>25,0</b>	0,0%	0,0%
5 (Flexible)	<b>25,0</b>	<b>25,0</b>	<b>25,0</b>	0,0%	0,0%
3 (Rígida)	24,4	24,8	<b>25,0</b>	-2,0%	-0,4%
3 (Flexible)	24,4	24,8	<b>25,0</b>	-2,0%	-0,4%
4 (Rígida)	24,3	24,8	<b>25,0</b>	-2,4%	-0,4%
4 (Flexible)	24,5	24,8	<b>25,0</b>	-1,6%	-0,4%

Del análisis de los resultados, se puede concluir que la aplicación de la técnica de SA arroja, en todos los casos, mejores resultados que la aplicación de la técnica de DLS o RW.

#### 6.5.4 Análisis de resultados técnica multi-objetivo, MOSA.

Tras la aplicación de la técnica de optimización multi-objetivo de Simulated Annealing, (MOSA), se ha conseguido obtener los mismos resultados óptimos alcanzados en la búsqueda mono-objetivo para todas las funciones objetivo evaluadas.

## 6.6 Bibliografía.

- [1]. P.J.M. Van Laarhoven and E.H.L.Aarts. (1987). *Simulated Annealing. Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- [2]. Kirkpatrick, S., C.D. Gelatt Jr & M.P. Vecchi (1982), *Optimization by Simulated Annealing*. IBM Research Report RC 9355
- [3]. Johnson D.S, C.R. Aragon, L.A. McGeoch & C. Schevon. (1987). *Optimization by Simulated Annealing: An experimental Evaluation, Parts I and II*, AT % T Bell Laboratories.
- [4]. Nahar, S., S. Sahni & E. Shragowitz. (1985). *Experiments with Simulated Annealing*. Proc. 22nd Des. Automation Conf, Las Vegas.
- [5]. Paya, I & Yepes, V & Hospitaler A. & Gonzalez-Vidosa, F. (2008). *On the statistical estimation of the minimum cost of RC frames designed by heuristic optimization*. Proceeding Second Conference on Multidisciplinary Design Optimization and Applications (ASMDO-2008). Gijon (spain).
- [6]. Software Estadístico Minitub 16.2.3. © 2012 Minitab Inc
- [7]. J. Calavera & E. Gonzalez Valle & J. Fernandez Gomez & F. Valenciano. (1997) *Manual de Ferralla*. Anifer. Asociacion Nacional de Industriales de ferralla.



# Capítulo 7

## Ejemplo de aplicación del Algoritmo de Simulated Annealing.

### 7.1 Introducción.

El objeto de este capítulo es el de aplicar al algoritmo de optimización Simulated Annealing en la resolución del problema de cálculo de una cimentación de soportes en medianería descrito en la publicación de Calavera [1], “Cálculo de Estructuras de Cimentación”, 4ª Edición, y comparar los resultados de optimización obtenidos para las funciones objetivo ya descritas en capítulos anteriores, con las alcanzadas tanto por la propia solución descrita en la publicación, como con la obtenida con el uso del software de cálculo estructural CYPECAD [5] ver 2014.

El proceso a seguir será:

- a) Descripción del ejemplo descrito en la publicación Calavera [1] y evaluación de las funciones objetivo para la solución alcanzada en la publicación.
- b) Obtención de la solución para el problema en análisis, resuelto mediante el software de cálculo estructural CYPECAD [5] y evaluación de las funciones objetivo de la solución alcanzada.
- c) Aplicación del método Heurístico Mono-Objetivo ‘Simulated Annealing (SA)’ para la consecución del óptimo relativo a la funciones objetivo evaluadas en la presente tesis, sobre cada una de las tipologías estructurales estudiadas y ya definidas en apartados anteriores.

- d) Aplicación del método Heurístico Multi-Objetivo ‘Simulated Annealing (MO-SA)’, para la consecución del óptimo relativo a las funciones objetivo evaluadas en la presente tesis, sobre cada una de las tipologías estructurales estudiadas y ya definidas en apartados anteriores
- e) Análisis y comparación de resultados.

## 7.2 Definición del problema.

Se incluyen a continuación los valores de los parámetros definitorios del problema descrito por Calavera [1] en su publicación, “Cálculo de Estructuras de Cimentación” 4ª Edición. Hay que destacar que la publicación es anterior a la actual Instrucción de Hormigón estructural EHE-08 [2], bajo la cual se obtendrán los resultados al aplicar los algoritmos de optimización, pero se entiende que las modificaciones incluidas en esta última instrucción, no invalidan los resultados obtenidos con la anterior EHE.

Los parámetros concretos se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 7.1. Parámetros problema Calavera.**

Parametric	Valor
<b>Geométricos</b>	
Distancia entre ejes de soportes	$l_1 = 6.000 \text{ mm}$
Distancia desde eje soporte 1 a borde zapata 1	$e_1 = 200 \text{ mm}$
Dimensión ‘x’ del soporte 1	$a_{1p} = 400 \text{ mm}$
Dimensión ‘y’ del soporte 1	$b_{1p} = 400 \text{ mm}$
Dimensión ‘x’ del soporte 2	$a_{2p} = 400 \text{ mm}$
Dimensión ‘y’ del soporte 2	$b_{2p} = 400 \text{ mm}$
<b>Terreno</b>	
Tipo	Granular
Tensión admisible	$\sigma_{\text{admisible}} = 0.25 \text{ N/mm}^2$
Módulo de balasto para placa de 30 x 30 cm	$K_{30} = 0.178 \text{ N/mm}^3$
<b>Cargas</b>	
Axil característico actuante en soporte 1	$N_{1cpk} = 82 \text{ KN}$
	$N_{1sek} = 46 \text{ KN}$
	$M_{1x,k} = 0$
	$V_{1x,k} = 0$
Axil mayorado actuante en soporte 1	$N_{1d} = 1.797 \text{ KN}$
	$M_{1x,d} = 0$
	$V_{1x,d} = 0$
Axil característico actuante en soporte 2	$N_{2cpk} = 140 \text{ KN}$
	$N_{2sek} = 60 \text{ KN}$
	$M_{2x,k} = 0$
	$V_{2x,k} = 0$
Axil mayorado actuante en soporte 2	$N_{2d} = 2.790 \text{ KN}$
	$M_{2x,d} = 0$
	$V_{2x,d} = 0$

### 7.3 Solución Calavera [1].

La solución aportada por Calavera [1] en su publicación se muestra en la figura inferior. A destacar que en su publicación, Calavera [1], no desarrolla por completo el dimensionado de la zapata interior, de la que solo se aportan sus valores de geometría y se especifica que su dimensionado será el mismo aplicado para zapatas aisladas, con la salvedad de que se deberá tener en cuenta el efecto de levantamiento existente. Por tanto, se ha completado su armado siguiendo los criterios adoptados en su misma publicación, en el apartado de zapatas aisladas. A continuación se muestra la solución aportada por Calavera [1].

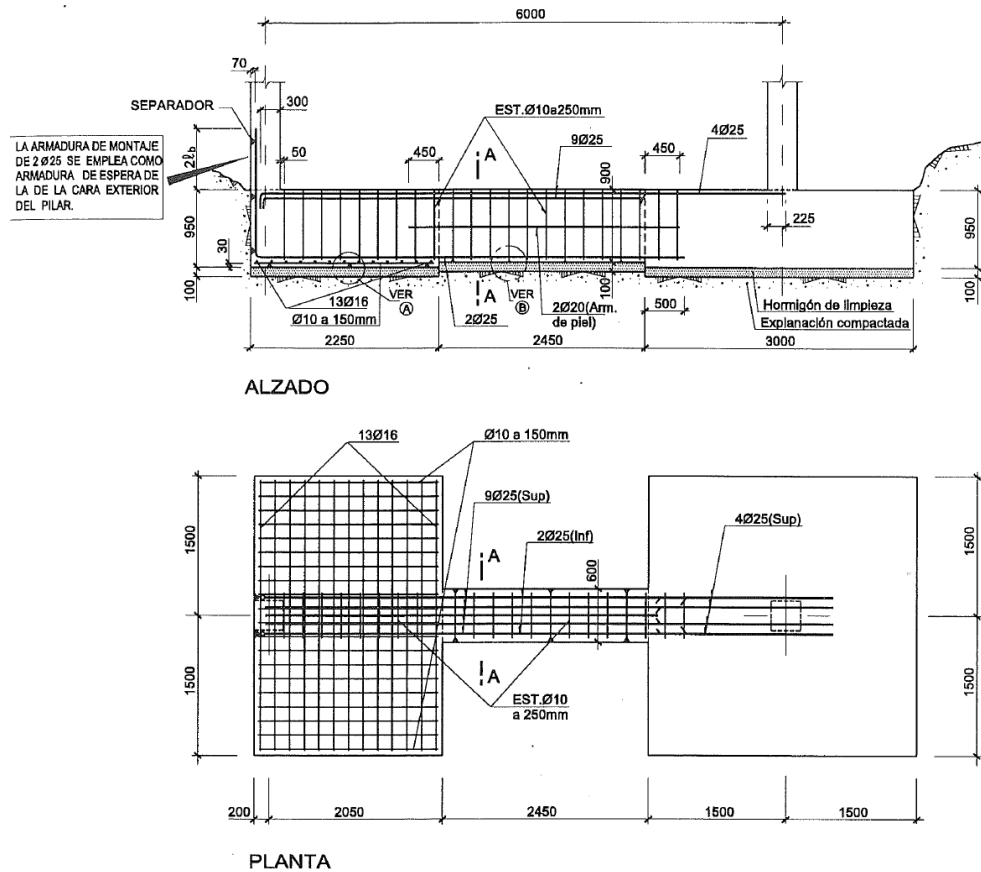


Figura 7.1. Solución Zapata Excéntrica con Viga Riostra. Calavera [1].

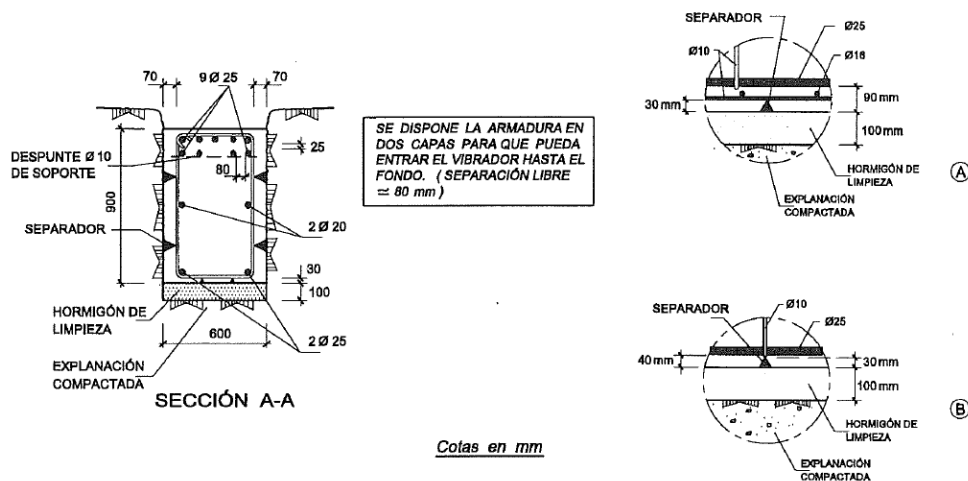


Figura 7.2. Solución Zapata Excéntrica con Viga Riostra II. Calavera [1].

El armado correspondiente a la zapata interior se ha calculado siguiendo las indicaciones realizadas en la misma publicación, en el apartado de zapatas aisladas, resultando del análisis un armado inferior compuesto por 11Ø20 en ambas direcciones, dispuestas con patilla normalizada.

Una vez obtenida la solución geométrica y de armado se ha procedido a evaluar las distintas funciones objetivo definidas en los apartados anteriores, dando como resultado los siguientes valores:

Tabla 7.2. Funciones Objetivo con solución libro Calavera [1].

ZAPATA "CALAVERA"	
TIPO 2: ZAP. EXCÉNTRICA CON VIGA RIOSTRA	
C. Económico (Euros)	2.695 €
Nº Barras Totales	83
Nº Barras longitudinales	67
Nº Tipo de barras	4
Relación p/A (mm <sup>-1</sup> )	1.52
Diámetro medio (cm)	17.9
Peso armadura long (kg)	520
Peso armadura total (kg)	558
Uniformidad armado longitudinal (%)	40
Uniformidad armado total (%)	57

La solución aportada por la publicación, se ha obtenido mediante la adopción de un modelo de comportamiento rígido para el cimentado, y por tanto, con la suposición de una distribución lineal y uniforme de tensiones sobre el terreno.

Para comprobar los posibles resultados que se obtendrían con la misma solución, pero mediante la adopción de un modelo de comportamiento elástico para el terreno, se ha procedido a la modelización del problema mediante el software de análisis estructural SAFE [7]. La modelización se ha realizado mediante el uso de elementos finitos tipo placa, y disponiendo un apoyo a través de muelles con el terreno, cuyo valor se determina a través del Módulo de Balasto  $K_{30}$ , y las ecuaciones de conversión ya definidas en puntos anteriores, al adoptar un terreno de tipo granular.

En las siguientes figuras se muestran los valores obtenidos de presión transmitida al terreno en  $t/m^2$ .

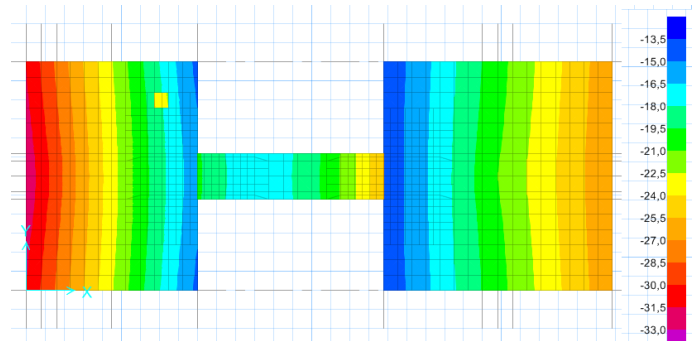


Figura 7.3. Modelo elementos finitos Zapata Excéntrica con Viga Riostra. SAFE[7].

Como se puede observar, los valores máximos de tensión en el terreno se obtiene, como era de esperar, en zona de la medianerías, con un valor máximo de  $32.54 t/m^2$  ( $0.325 N/mm^2$ ).

Este valor se encuentra ligeramente por encima del máximo permitido, que como se indicó en capítulos anteriores sería de:

$$\sigma_{max} \leq 1.25 \cdot \sigma_{admissible} = 1.25 * 0.25 = 0.3125 N/mm^2$$

También se encuentra lejos del valor de tensión uniforme calculado según el modelo de cimentado rígido, con el que es calculado originalmente el ejemplo Calavera [1], que es de  $0.247 N/mm^2$ .

Para conseguir una distribución de tensiones uniforme con el modelo de Elementos finitos, similar al supuesto de cálculo incluido en el modelo de cimentado rígido, se ha debido modificar el valor de módulo de balasto, del valor inicial  $K_{30}=0.178 N/mm^3$  hasta un valor de  $K_{30} = 0.004 N/mm^3$ .

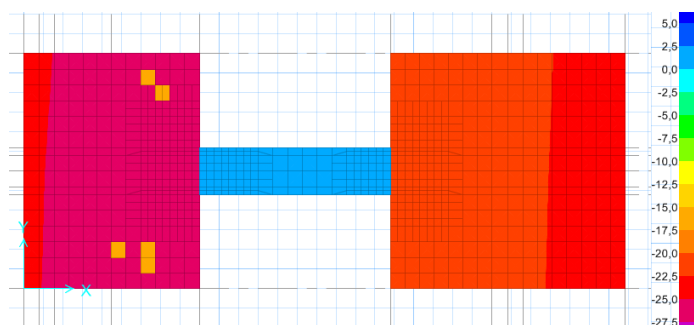


Figura 7.4. Solución alternativa. Modelo elementos finitos. SAFE [7]

Como se observa en la figura con estos valores se consigue una distribución prácticamente uniforme de tensiones y un valor máximo de  $0.247 \text{ N/mm}^2$ .

#### 7.4 Soluciones obtenidas mediante el Software CYPECAD [5].

A continuación se incluye la solución obtenida al problema en estudio, mediante el uso del software de cálculo estructural CYPECAD [5], ver 2014 de la empresa CYPE Ingenieros S.A.

Dado que esta aplicación informática requiere la asignación previa de un tipo de hormigón y acero, se han realizado tres cálculos diferenciados, uno inicial, al que denominaremos 'Cype1', en el que se asignaron los materiales descritos en el ejemplo desarrollado en el libro de Calavera [1], es decir hormigón HA-25 y acero B-400S, otro, al que denominaremos 'Cype2', en el que se le asignan los materiales, Hormigón HA-30 y acero B-500 y un cálculo final, al que denominaremos 'Cype3', con los materiales HA-35 y B500. Los resultados obtenidos en cada caso y los valores de las funciones objetivo asociadas se muestran a continuación:

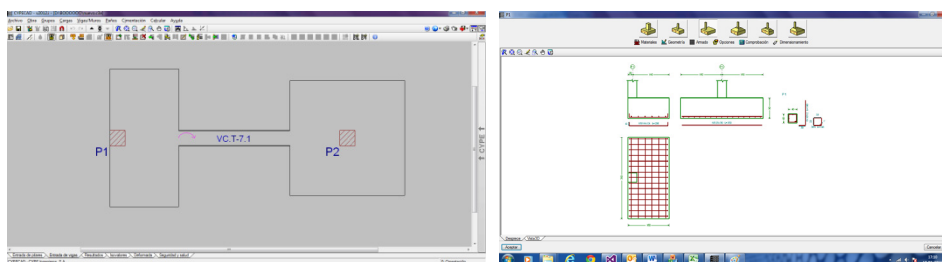


Figura 7.5. Resolución problema mediante software CYPECAD [5].

Tabla 7.3. Funciones Objetivo con solución CYPECAD [5].

ZAPATA "CALAVERA"			
TIPO 2: EXCÉNTRICA CON VIGA RIOSTRA	CYPE 1	CYPE 2	CYPE 3
C. Económico (Euros)	3.103 €	2.682 €	2.998 €
Nº Barras Totales	98	85	85
Nª Barras longitudinales	86	69	69
Nº Tipo de barras	4	4	4
Relación p/A	1.67	1,68	1,68
Diámetro medio (mm)	19.4	17.8	17.4
Peso armadura long (kg)	859	597	597
Peso armadura total (kg)	876	613	613
Uniformidad armado longitudinal (%)	50	50	50
Uniformidad armado total (%)	57	57	57

Como se puede ver, los mejores resultados de coste económico se obtienen para la combinación de materiales HA-30/B500S, que será la que incluirá en los distintos análisis incluidos en los apartados posteriores.

## 7.5 Aplicación Heurística mono-objetivo de Cristalización Simulada (SA).

A continuación se aplicará, sobre el ejemplo incluido en el libro de Calavera [1], el método Heurístico de Cristalización Simulada (SA). Para ello se partirá de una solución generada aleatoriamente y se realizarán 20 experimentos mediante la técnica de Simulated Annealing, SA, adoptando los mismos valores de configuración para las variables del algoritmo utilizadas en el Capítulo anterior.

### 7.5.1 Resultados Función objetivo 'Coste Económico'. (SA)

Se realizan un total de 20 experimentos para cada una de las tipologías de solución adoptadas, mostrándose en la siguiente tabla los resultados óptimos para la función objetivo 'Coste Económico'. Además de los óptimos absolutos se incluyen los porcentajes de variación con respecto a la solución óptima obtenida, los valores medios obtenidos en los 20 experimentos realizados, la desviación típica de los valores y el tiempo de cálculo empleado en la ejecución de los 20 experimentos.

**Tabla 7.4. Resultados “Coste Económico” (SA).**

Tipología	Coste Económico Mínimo (Euros)	Variación (%)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Calculo Promedio (seg)
<b>Tipo 1</b>					
Tipo 5 Rígida	3.137 €	59,4%	3.148 €	7,9	42,5
Tipo 2 Rígida	2.116 €	2,2%	2.187 €	59,5	25,7
Tipo 3 Rígida	3.191 €	62,1%	3.299 €	80,4	53,4
Tipo 4 Rígida	3.162 €	60,7%	3.295 €	162,9	47,6
Tipo 5 Flexible	2.982 €	51,5%	3.016 €	16,3	86,8
Tipo 2 Flexible	2.070 €	0,0%	2.196 €	80,8	570,1
Tipo 3 Flexible	2.600 €	32,1%	3.250 €	16,3	88,5
Tipo 4 Flexible	2.613 €	32,8%	2.697 €	102,1	81,0

Analizando las soluciones obtenidas, se comprueba que para el caso del modelo 2, (zapata excéntrica con viga riostra), los óptimos alcanzados presentan valores para la relaciones entre las dimensiones de la zapata de medianería cercanos a 2, que como se comentó en el apartado 3.6.3, es el valor límite impuesto inicialmente como criterio constructivo. Dado que este criterio se ha demostrado limitativo, se procede a realizar de nuevo el cálculo, eliminando dicha restricción. Los nuevos valores se incluyen a continuación:

Tipología	Coste Económico Mínimo (Euros)	Variación (%)	Coste Económico medio (Euros)	Desviación Típica	T Calculo Promedio (seg)
<b>Tipo 1</b>					
Tipo 5 Rígida	3.137 €	59,4%	3.148 €	7,9	42,5
Tipo 2 Rígida	2.074 €	5,4%	2.153 €	51,2	34,2
Tipo 3 Rígida	3.191 €	62,1%	3.299 €	80,4	53,4
Tipo 4 Rígida	3.162 €	60,7%	3.295 €	162,9	47,6
Tipo 5 Flexible	2.982 €	51,5%	3.016 €	16,3	86,8
Tipo 2 Flexible	1.968 €	0,0%	2.159 €	254,0	808,7
Tipo 3 Flexible	2.600 €	32,1%	3.250 €	16,3	88,5
Tipo 4 Flexible	2.613 €	32,8%	2.697 €	102,1	81,0

En las figuras 7.16 y 7.17 se describen las soluciones completas de las soluciones óptimas absolutas alcanzadas para el modelo 2F, tanto teniendo en cuenta la limitación  $B/A < 2$ , como sin tenerla en cuenta.

Para confirmar lo analizado en el capítulo anterior, se ha vuelto a analizar los valores obtenidos para cada uno de los modelos estudiados, verificando que los mismos se



ajustan a una función tipo ‘Weibull 3 parámetros’, con un nivel de confianza del 95%. Se incluyen a continuación los resultados para la tipología 2F. Para el análisis se ha utilizado el software estadístico Minitab 15 [6].

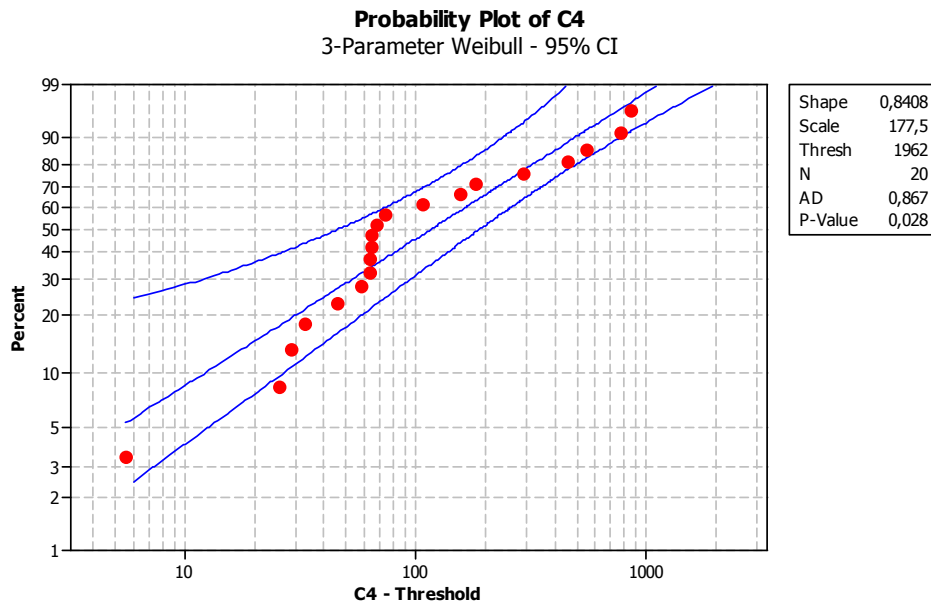


Figura 7.6. Ajuste datos solución SA a función Weibull. Minitab [6].

En la siguiente tabla se incluyen los valores umbrales obtenidos en el ajuste de cada uno de los experimentos realizados para la optimización de cada modelo estructural de cimiento considerado y su diferencia con el valor obtenido.

Tabla 7.5. Ajuste Weibull. Resultados ‘Coste económico’.

Tipología	Coste Económico Mínimo (Euros)	Valor Umbral Weibull (Euros)	Variación (%)
Tipo 5 Rígida	3.137 €	3.136 €	+0.03%
Tipo 2 Rígida	2.074 €	2.065 €	+0.43%
Tipo 3 Rígida	3.191 €	3.191 €	+0.00%
Tipo 4 Rígida	3.162 €	3.160 €	+0.06%
Tipo 5 Flexible	2.982 €	2.982 €	+0,00%
Tipo 2 Flexible	1.968 €	1.967 €	+0.05%
Tipo 3 Flexible	2.600 €	2.592 €	+0,30 %
Tipo 4 Flexible	2.613 €	2.613 €	+0.00%

Como se puede apreciar la desviación con el valor umbral previsto es inferior al 1% para todos los modelos.

En cuanto a los resultados obtenidos, lo primero a destacar es que no se han podido localizar soluciones factibles para el modelo de cemento de zapatas aisladas. La fuerte excentricidad de la carga, fuerza a la disposición de zapatas con unas dimensiones que exceden los límites impuestos, solapándose los cimientos de ambos soportes enfrentados.

Entre los modelos de cemento rígido, se han obtenido los mejores resultados económicos para la solución de zapata excéntrica con viga riostra (2.074 Euros), con valores muy inferiores a los mínimos obtenidos para el resto de tipologías. El resto de modelos rígidos presentan óptimos muy similares, pero con un coste superior alrededor del un 60% sobre el modelo 2.

Si se incorporan las soluciones resueltas con modelos elásticos, los resultados mejoran ligeramente para el modelo 2F, que obtiene el mínimo de coste absoluto con un valor de 1.968 euros. En los modelos 3F y 4F se obtienen valores sensiblemente mejores que sus homólogos rígidos, obteniendo resultados un 32% superiores a la de la mejor tipología. Los resultados para el modelo flexible de zapata combinada de ancho constante solo mejoran un 8% los obtenidos con el mismo modelo rígido. En general, los resultados son mejores para los modelos flexibles, si bien para los modelos 2 y 5 la mejora es apenas entre un 5 a 8%, mientras que en los modelos 3 y 4 la mejora es en torno al 30%.

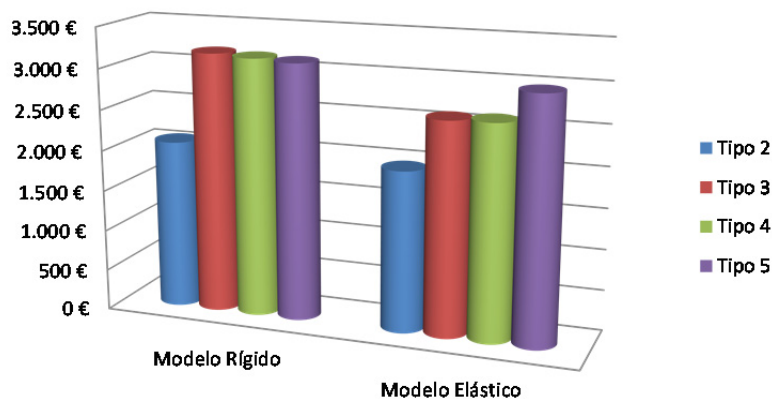


Figura 7.7. Comparativa de resultados.

En la siguiente gráfica se puede ver la distribución porcentual de los distintos costes que conforman el coste final de cada solución (Coste de excavación, coste del hormi-

gón, coste del acero de refuerzo, coste del encofrado y coste del relleno y compactación). Se incluyen también los valores obtenidos en la solución aportada Calavera [1] y las obtenidas mediante la aplicación informática CYPECAD [5], ya descritas en apartados anteriores.

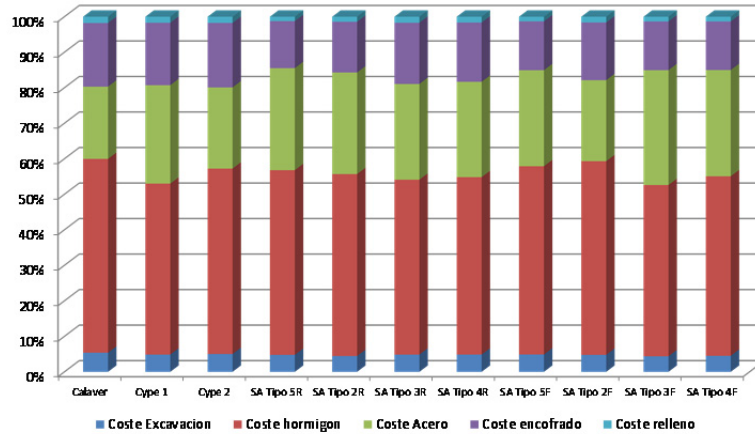


Figura 7.8. Distribución porcentual de los resultados S.A.

Como se observa, independientemente del modelo de cimiento y del modelo de cálculo utilizado, la distribución porcentual se mantiene sensiblemente constante para cada tipo de modelo evaluado. Los más significativos son el coste de hormigón, que varía del 50 al 60%, el coste de acero que varía de un 20% al 28% y el coste de encofrado que varía de un 13% a un 18% de los totales de cada modelo. La suma de los costes de Hormigón + acero se sitúa en todos los casos entre un 75% a 80% del total, mientras que la suma de costes de Hormigón + acero + encofrado se sitúa entre un 92% a 94% del total. En la siguiente gráfica se muestran los valores absolutos, en euros, obtenidos para cada modelo de cimiento y modelo de cálculo analizado.

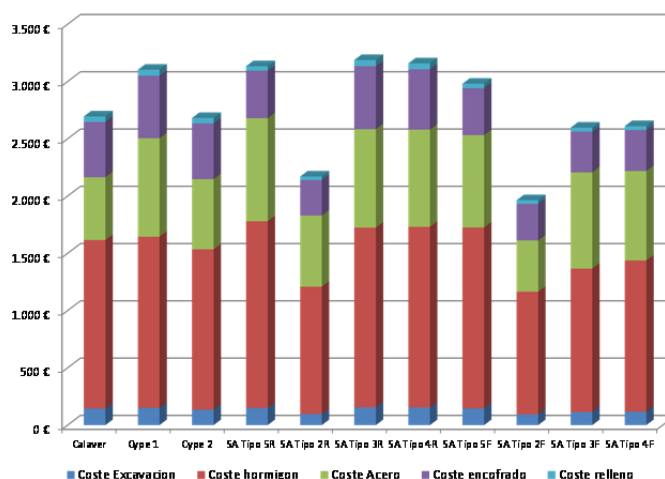


Figura 7.9. Comparación resultados S.A.

Como se puede observar, los modelos que han arrojado mejores resultados son los correspondientes a zapata excéntrica con viga riostra, tanto con modelo de cimiento rígido como con el modelo elástico simplificado (Tipos 2R y 2F). La mayor mejora de este modelo, en cuanto al coste económico respecto al resto, es la relativa al coste de hormigón. Así, mientras en el resto de modelos se mantiene en un valor sensiblemente coincidente (1300 a 1600 euros), en los modelos 2F y 2R se obtienen valores en torno a 1.100 euros.

En general, los modelos con comportamiento flexible presentan mejores resultados que sus homólogos rígidos, siendo, en los modelos 2 y 5, mejoras ligeras, mientras que en los modelos 3 y 4 las mejoras son más significativas.

Para tratar de evaluar las diferencias obtenidas en los modelos de cálculo elástico, se ha modelizado la solución de cimiento óptima obtenida con el modelo 5R, evaluándola con un cálculo elástico. Para ello se ha modelizado la solución con el programa de cálculo estructural SAFE [7] v16.1.1. El cimiento se modeliza con elementos finitos tipo placa, incluyendo muelles para simular el comportamiento de apoyo sobre el terreno. Se incluyen a continuación los resultados obtenidos relativos a las presiones transmitidas al terreno. Como se podrá observar, las presiones máximas se han obtenido en el extremo de cimiento, junto al soporte interior, con un valor máximo de  $38.6 \text{ t/m}^2$ , muy superior a la limitación impuesta en función de la tensión máxima permitida por el terreno, que era de  $25 \text{ t/m}^2 \times 1.25 = 31.25 \text{ t/m}^2$ . Queda claro que el módulo de balasto adoptado en el cálculo del modelo flexible, no se corresponden con los resultados obtenidos adoptando un modelo rígido, donde se suponen tensiones lineales y uniformes bajo el cimiento. En el extremo contrario del cimiento se obtienen valores de

presión de 21.4 t/m<sup>2</sup>. Es por ello que el modelo 5F no es capaz de obtener valores del óptimo económico muy superiores a su homólogo 5R.

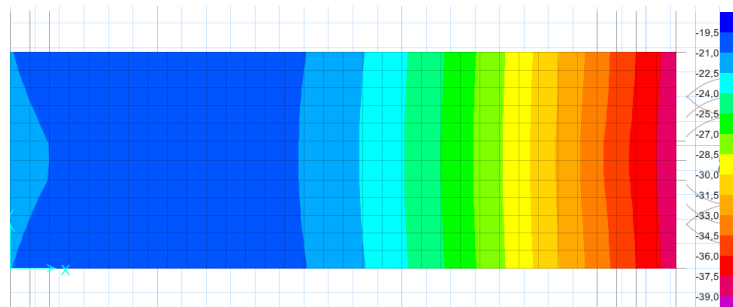


Figura 7.10. Modelo Elementos finitos. SAFE [7].

Para ver la diferencia entre los óptimos alcanzados para cada modelo analizado, se muestran a continuación los valores de todas las funciones objetivo para los óptimos económicos alcanzados en los modelos con comportamiento de cemento rígido y los calculados con un modelo elástico de transmisión de tensiones al terreno. En todos los casos, se toman como valores de referencia, los valores de las funciones objetivo alcanzadas con el modelo 2F, que es con la que se ha alcanzado el óptimo absoluto de la función ‘Coste Económico’.

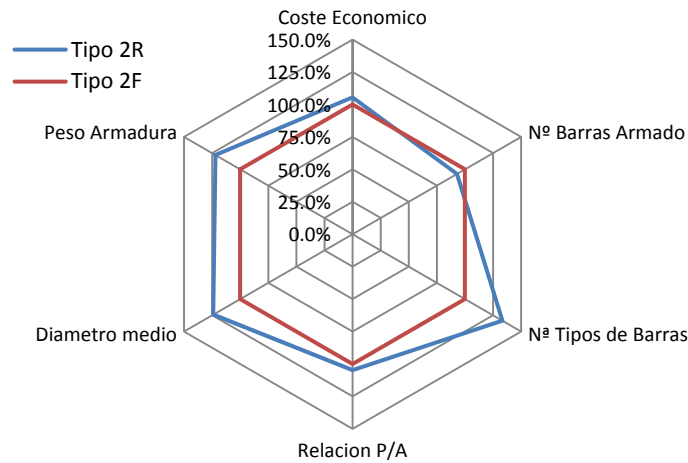


Figura 7.11. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 2R y 2F.

Como se indicó anteriormente, los modelos 2R y 2F han arrojado resultados de ‘Coste Económico’ muy similares. En cuanto al resto de funciones objetivo asociadas, el modelo con comportamiento elástico ha obtenido peores resultados en la función de cons-

tractibilidad ‘Diámetro medio’, con valores un 20% inferiores, mientras que presenta mejores valores de las funciones N° tipo de barras (-30%) y Peso armadura (-20%).

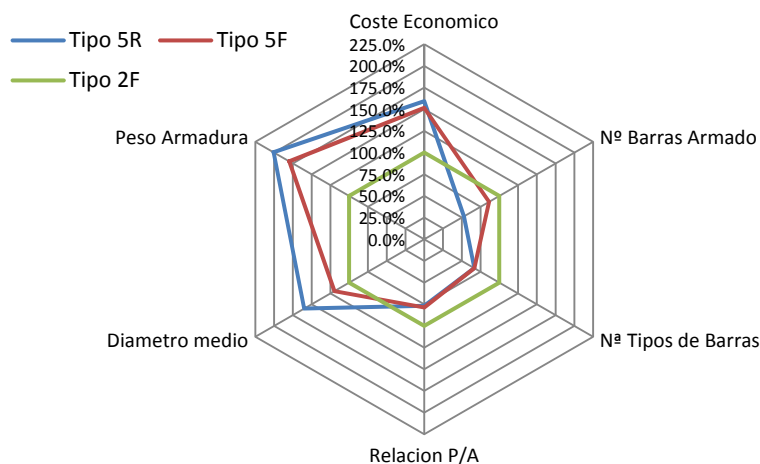


Figura 7.12. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 5R y 5F.

Comparando los modelos de zapata combinada de ancho constante, con comportamiento de cemento rígido y con modelo elástico, se puede comprobar que ambos presentan formas similares en su disposición de todas sus funciones objetivo. Presentan valores de coste económico similares, algo mejores en el tipo 5F (-8%), pero alejadas en torno al 50% de la óptima absoluta, Tipo 2F. En cuanto al resto de funciones objetivo, el modelo 5 de cemento rígido presenta mayores peso de armadura (+20%), pero mejores resultados en las funciones de Diámetro medio (+50%) y número de barras de armado (-40%). Comparando con el modelo óptimo absoluto, 2F, las únicas funciones de constructibilidad donde se mejora son las correspondientes al N° de barras de armado (-50%), Diámetro medio (+50%) y número de tipos de barras.

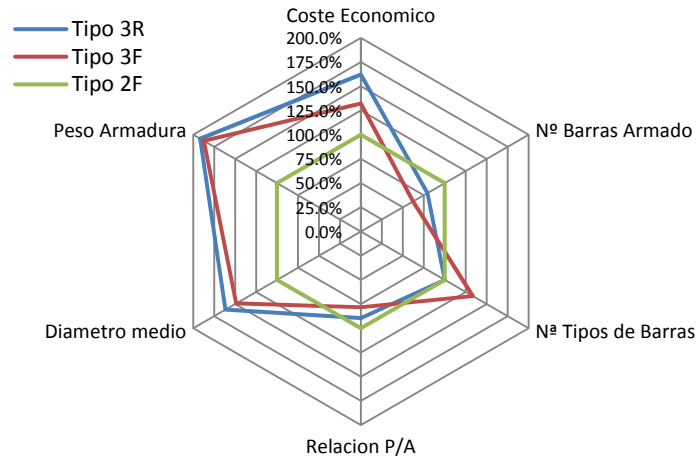


Figura 7.13. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 3R y 3F.

Comparando los modelos de zapata combinada asimétrica, configuración 1, con comportamiento de cemento rígido y con distribución no lineal de tensiones, se puede comprobar que ambos presentan formas similares en su disposición de todas sus funciones objetivo. Presentan valores de coste económico mejores para el tipo 3F (-30%), pero superiores en torno al 30% de la óptima absoluta, Tipo 2F. En cuanto al resto de funciones objetivo, el modelo de cemento rígido presenta mayor número de barras (+20%) y menor número de tipos de barras (-30%). El resto de funciones objetivo tienen valores muy similares. Comparando con el modelo óptimo absoluto, 2F, las únicas funciones de constructibilidad donde se mejora son las correspondientes al N° de barras de armado (-30%), Diámetro medio (+50 a 60%) y número de tipos de barras.

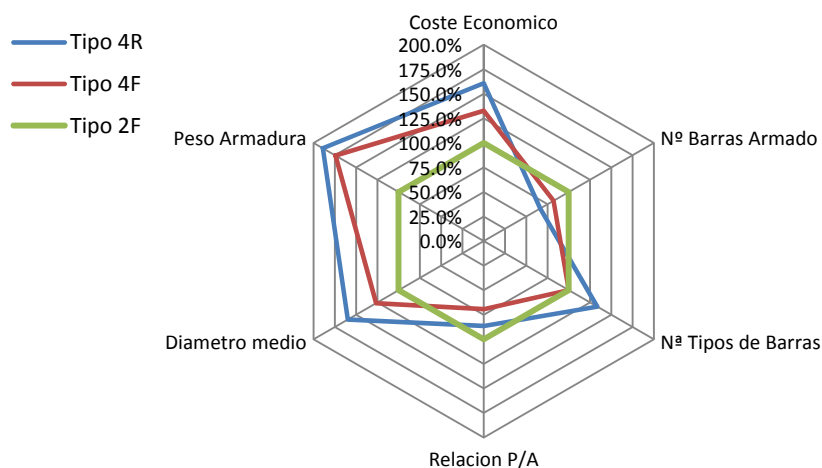


Figura 7.14. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico modelos 4R y 4F.

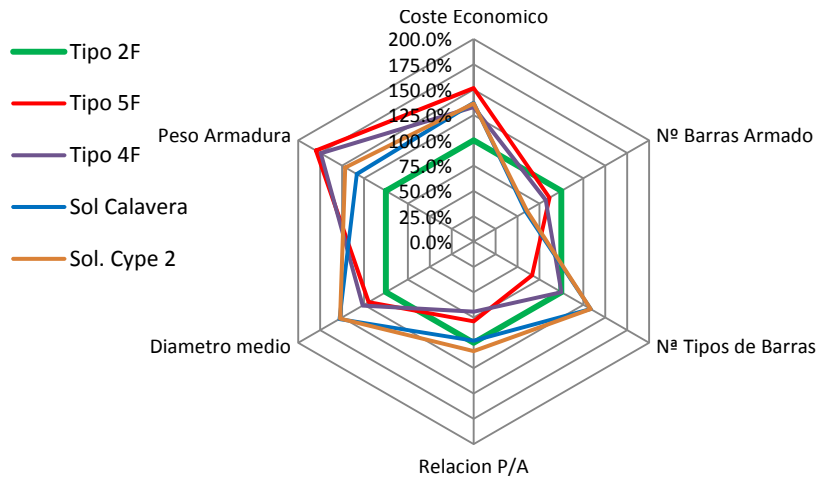
Comparando los modelos de zapata combinada asimétrica, configuración 2, con comportamiento de cimiento rígido y con distribución no lineal de tensiones, se puede comprobar que ambos presentan formas similares en su disposición de todas sus funciones objetivo.

Presentan valores de coste económico mejores para el tipo 4F (-30%), pero superiores en torno al 33% de la óptima absoluta, Tipo 2F. En cuanto al resto de funciones objetivo, el modelo de cimiento rígido presenta mayores peso de armado (+15%), número de barras (-20%), mayor número de tipos de barra, y mayor relación P/A (+20%), pero mejores resultados en las funciones de Diámetro medio (+30%).

Comparando con el modelo óptimo absoluto, 2F, las únicas funciones de constructibilidad donde se mejora son las correspondientes al Nº de barras de armado (-25%), número de tipos de barras y Diámetro medio (+25 a 60%).

Finalmente, se incluye la comparación de las funciones objetivo de los modelos más representativos 2F (zapata excéntrica con viga riostra), 5F (zapata combinada de ancho constante) y 4F (zapata combinada asimétrica), con los alcanzados en la propia solución de Calavera [1] y con los obtenidos de la aplicación del software de cálculo estructura CYPECAD [5].





**Figura 7.15. Funciones objetivo asociadas a Óptimo Económico.**

Lo primero a indicar, es la gran similitud obtenida entre los valores de las funciones objetivo de la solución aportada por Calavera [1] y la obtenida mediante la aplicación del software de cálculo estructural CYPECAD [5]. En todo caso, como ya se comentó anteriormente, ambas presentan valores superiores de coste económico respecto al modelo óptimo absoluto de la tipología 2F (en torno a un +30%). En relación al resto de funciones objetivo, la tipología 2F presenta mejores resultados de las funciones Peso Armadura (-50% respecto a la solución CYPE y -30% respecto a la solución Calavera), y número de tipos de barra, presentando peores resultados en las funciones de Diámetro medio (-50%) y número de barras de armado (+40%).

Con objeto de poder determinar alguna característica común en las soluciones óptimas alcanzadas que pueda servir como criterio de prediseño, se ha procedido al análisis de algunos parámetros relativos a las soluciones alcanzadas en cada uno de los 20 experimentos realizados en cada uno de los modelos estructurales. Se incluyen sus valores en las siguientes tablas para cada uno de los modelos estructurales estudiados.

#### Zapata Excéntrica con viga riostra. Comportamiento Rígido (Modelo 2R):

Zapata de medianería:

Se incluyen en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la realización de los 20 experimentos realizados para la localización del óptimo, relativos a la geometría de la zapata de medianería.

Tabla 7.6. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2R. Zapata 1. (SA).

Ce	Zapata Medianera								HA	B
	A	B	H	A (m2)	Vol (m3)	B/A	$\rho_x$ (‰)	$\rho_y$ (‰)		
2.087 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.206 €	1.700	3.800	700	6,46	4,52	2,24	0,90	1,13	30	500
2.074 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.074 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.151 €	1.600	3.900	750	6,24	4,68	2,44	0,90	0,98	30	500
2.175 €	2.200	3.000	700	6,60	4,62	1,36	0,90	1,19	30	500
2.235 €	2.200	3.000	700	6,60	4,62	1,36	0,90	1,19	30	500
2.097 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.218 €	2.000	3.200	750	6,40	4,80	1,60	0,90	1,02	30	500
2.164 €	2.000	3.200	750	6,40	4,80	1,60	0,90	1,02	30	500
2.153 €	2.200	3.000	700	6,60	4,62	1,36	0,90	1,18	30	500
2.117 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.103 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.142 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.159 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.158 €	2.200	3.000	700	6,60	4,62	1,36	0,90	1,18	30	500
2.103 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.159 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.101 €	1.700	3.700	700	6,29	4,40	2,18	0,90	1,13	30	500
2.256 €	1.800	3.500	750	6,30	4,73	1,94	0,90	0,97	30	500

Todos los óptimos se han alcanzado con hormigón HA-30 y acero B500. Geométricamente las soluciones disponen de un canto que varía de 700 a 750 mm. Además, en dirección x, todas las soluciones incluyen el armado de cuantía mínima, mientras que la cuantía de armado en dirección y varía de un 0,97 a 1,19 por mil. En cuanto a la relación entre lados del cimiento, el valor óptimo se ha conseguido con una relación cercana a 2 (2.18).

Zapata interior:

Se incluyen en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la realización de los 20 experimentos realizados para la localización del óptimo, relativos a la geometría de la zapata interior.

Tabla 7.7. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2R. Zapata 2. (SA).

Ce	Zapata interior								HA	B
	A	B	H	A (m2)	Vol (m3)	B/A	$\rho_x$ (‰)	$\rho_y$ (‰)		
2.087 €	2.900	2.800	550	8,12	4,47	0,97	2,41	2,40	30	500
2.206 €	3.100	2.700	600	8,37	5,02	0,87	2,26	1,95	30	500
2.074 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,17	1,95	30	500
2.074 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,17	1,95	30	500
2.151 €	2.900	2.800	550	8,12	4,47	0,97	2,44	2,43	30	500
2.175 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,12	1,92	30	500
2.235 €	2.700	3.000	600	8,10	4,86	1,11	1,69	1,96	30	500
2.097 €	2.900	2.800	550	8,12	4,47	0,97	2,41	2,39	30	500
2.218 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,14	1,92	30	500
2.164 €	2.600	3.100	600	8,06	4,84	1,19	1,62	2,00	30	500
2.153 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,12	1,92	30	500
2.117 €	2.900	2.800	550	8,12	4,47	0,97	2,41	2,40	30	500
2.103 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,17	1,95	30	500
2.142 €	3.100	2.700	600	8,37	5,02	0,87	2,27	1,95	30	500
2.159 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,18	1,97	30	500
2.158 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,11	1,90	30	500
2.103 €	2.900	2.800	600	8,12	4,87	0,97	2,01	1,99	30	500
2.159 €	3.000	2.700	600	8,10	4,86	0,90	2,18	1,97	30	500
2.101 €	2.900	2.800	550	8,12	4,47	0,97	2,41	2,40	30	500
2.256 €	2.900	2.800	650	8,12	5,28	0,97	1,70	1,70	30	500

En el caso de la zapata interior, las relaciones entre sus lados son mucho más estables, presentando variaciones entre 0,87 a 1,11, es decir configuraciones cercanas a la igualdad. En cuanto a las cuantías, estas varían entre un 1,70 a un 2,40 por mil. Geométricamente las soluciones disponen de un canto que varía de 550 a 650 mm.

#### Zapata Excéntrica con viga riostra. Modelo elástico (Modelo 2F):

Zapata de medianería:

Se incluyen en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la realización de los 20 experimentos realizados para la localización del óptimo, relativos a la geometría de la zapata de medianería.

Tabla 7.8. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2F. Zapata 1. (SA).

Ce	Zap 1								HA	B
	A	B	H	A (m2)	Vol (m3)	B/A	$\rho_x$ (‰)	$\rho_y$ (‰)		
2.020 €	1.600	4.400	700	7,04	4,93	2,75	0,90	1,04	30	500
1.968 €	1.500	4.500	750	6,75	5,06	3,00	0,90	0,89	30	500
2.025 €	1.700	4.600	700	7,82	5,47	2,71	0,90	1,07	30	500
2.025 €	1.600	4.300	700	6,88	4,82	2,69	0,90	1,04	30	500
2.035 €	1.400	4.400	750	6,16	4,62	3,14	0,90	0,85	30	500
2.025 €	1.600	4.300	700	6,88	4,82	2,69	0,90	1,04	30	500
2.508 €	1.200	4.200	750	5,04	3,78	3,50	0,90	0,74	30	500
2.008 €	1.700	4.500	700	7,65	5,36	2,65	0,90	1,08	30	500
2.030 €	1.600	3.800	650	6,08	3,95	2,38	0,90	1,12	30	500
2.068 €	1.300	4.700	800	6,11	4,89	3,62	0,90	0,75	30	500
2.144 €	1.700	4.700	700	7,99	5,59	2,76	0,90	1,08	30	500
2.068 €	1.300	4.700	800	6,11	4,89	3,62	0,90	0,75	30	500
2.026 €	1.300	5.000	850	6,50	5,53	3,85	0,90	0,69	30	500
1.988 €	1.600	4.300	700	6,88	4,82	2,69	0,90	1,04	30	500
1.995 €	1.600	4.400	700	7,04	4,93	2,75	0,90	1,04	30	500
1.968 €	1.500	4.500	750	6,75	5,06	3,00	0,90	0,89	30	500
2.255 €	1.500	4.800	750	7,20	5,40	3,20	0,90	0,89	30	500
2.026 €	1.700	4.600	700	7,82	5,47	2,71	0,90	1,07	30	500
2.116 €	3.000	3.000	700	9,00	6,30	1,00	0,90	1,30	30	500
2.418 €	1.100	5.000	900	5,50	4,95	4,55	0,90	0,54	30	500

Todos los óptimos se han alcanzado con hormigón HA-30 y acero B500 y cuantía en dirección x es siempre la mínima cuantía mecánica impuesta por norma, 0.9 por mil. En cuanto a la relación entre lados del cimiento, el valor óptimo se ha conseguido con una relación de 3.0, si bien también se obtienen valores cercanos al óptimo con relaciones desde 1,00 a 3,00. Geométricamente, las soluciones disponen de un canto que varía de 700 a 900 mm, disponiendo la óptima de un canto de 750 mm, superior a los 700 mm del óptimo del modelo rígido.

Zapata interior:

Se incluyen en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la realización de los 20 experimentos realizados para la localización del óptimo, relativos a la geometría de la zapata interior.

Tabla 7.9. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 2F. Zapata 2. (SA).

Ce	Zap 2								HA	B
	A	B	H	A (m2)	Vol (m3)	B/A	$\rho_x$ (‰)	$\rho_y$ (‰)		
2.020 €	3.500	2.200	500	7,70	3,85	0,63	0,90	1,67	30	500
1.968 €	4.100	1.900	500	7,79	3,90	0,46	0,90	1,94	30	500
2.025 €	3.300	2.300	450	7,59	3,42	0,70	0,90	1,93	30	500
2.025 €	3.600	2.100	500	7,56	3,78	0,58	0,90	1,68	30	500
2.035 €	3.100	2.400	500	7,44	3,72	0,77	0,90	1,59	30	500
2.025 €	3.600	2.100	500	7,56	3,78	0,58	0,90	1,68	30	500
2.508 €	2.700	3.200	550	8,64	4,75	1,19	0,90	1,21	30	500
2.008 €	3.500	2.200	550	7,70	4,24	0,63	0,90	1,43	30	500
2.030 €	3.500	2.200	600	7,70	4,62	0,63	0,90	1,43	30	500
2.068 €	3.300	2.300	500	7,59	3,80	0,70	0,90	1,62	30	500
2.144 €	2.700	2.800	400	7,56	3,02	1,04	0,90	2,15	30	500
2.068 €	3.300	2.300	500	7,59	3,80	0,70	0,90	1,62	30	500
2.026 €	4.100	1.900	500	7,79	3,90	0,46	0,90	1,94	30	500
1.988 €	3.600	2.100	500	7,56	3,78	0,58	0,90	1,68	30	500
1.995 €	3.900	2.000	500	7,80	3,90	0,51	0,90	1,76	30	500
1.968 €	4.100	1.900	500	7,79	3,90	0,46	0,90	1,94	30	500
2.255 €	2.500	3.000	400	7,50	3,00	1,20	0,90	2,07	30	500
2.026 €	3.300	2.300	450	7,59	3,42	0,70	0,90	1,93	30	500
2.116 €	3.200	2.200	500	7,04	3,52	0,69	0,90	1,55	30	500
2.418 €	2.000	3.800	400	7,60	3,04	1,90	0,90	1,73	30	500

La relación entre lados de la solución óptima económica ha sido de 0,46, si bien se localizan óptimos cercanos, con valores que van desde 0,40 a 0,70. En cuanto a las cuantías en dirección x se dispone la cuantía mínima mientras que en dirección y, los valores varían entre un valor de 1,21 a un 2,07 por mil. Geométricamente, las soluciones disponen de un canto que varía de 450 a 500 mm, disponiendo la óptima de un canto de 500 mm, inferior a los 600 mm del óptimo del modelo rígido.

Finalmente, se han verificado las limitaciones de rigidez impuestas solo para los modelos de cimiento rígido, verificando que 13 de las 20 soluciones analizadas, incluyendo la del óptimo absoluto, verifican dichas condiciones, pese a haberse calculado bajo un modelo elástico de tensiones en el terreno que no incluían estas restricciones.

#### Zapata Combinada de ancho constante. Comportamiento Rígido. (Modelo 5R):

Se incluyen en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la realización de los 20 experimentos realizados para la localización del óptimo, relativos a la geometría de la zapata.

Tabla 7.10. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 5R. (SA).

Ce	Zap Combinada 5R									HA	B
	A	B	H	A (m2)	Vol (m3)	B/A	$\rho_{x \text{ inf}}$ (‰)	$\rho_{y \text{ inf}}$ (‰)	$\rho_{x \text{ sup}}$ (‰)		
3.153 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.145 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.147 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.145 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.140 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.137 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.147 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.137 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.162 €	7.100	2.300	1.100	16,33	17,96	0,32	0,90	2,78	2,41	30	500
3.161 €	7.200	2.300	1.100	16,56	18,22	0,32	0,90	2,82	2,35	30	500
3.141 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.137 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.147 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.147 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.147 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,37	30	500
3.140 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.145 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.147 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500
3.166 €	7.200	2.300	1.100	16,56	18,22	0,32	0,90	2,82	2,35	30	500
3.153 €	7.000	2.200	1.150	15,40	17,71	0,31	0,90	2,86	2,36	30	500

En relación a los materiales, todas las soluciones salvo una han determinado como más óptimos un hormigón HA-30 y acero B-500S. En cuanto a la geometría todas las soluciones presentan una relación entre lados con una ligera variación de 0.31 a 0.32 y en relación a las cuantías de armado, el armado inferior dispuesto en dirección x, es siempre a cuantía mínima (0.9 por mil), mientras que inferiormente en dirección y, los valores también se muestran muy constantes, con un valor de 2,86 por mil. La cuantía de armado superior en dirección x se sitúan en valores entre un 2,36 a 2,41 por mil. El canto de todas las soluciones ha sido de valor 1.150 mm.

Zapata Combinada de ancho constante. Análisis elástico (Modelo 5F):

Se incluyen en la siguiente tabla los resultados obtenidos en la realización de los 20 experimentos realizados para la localización del óptimo.

Tabla 7.11. Óptimos “Coste Económico”. Tipo 5F. (SA).

Ce	Zap Combinada 5F									HA	B
	A	B	H	A (m2)	Vol (m3)	B/A	$\rho_{x \text{ inf}}$ (‰)	$\rho_{y \text{ inf}}$ (‰)	$\rho_{x \text{ sup}}$ (‰)		
3.017 €	7.200	2.500	950	18,00	17,10	0,35	0,90	2,59	2,49	30	500
2.982 €	7.400	2.100	1.100	15,54	17,09	0,28	0,90	3,17	2,20	30	500
3.028 €	7.200	2.400	1.000	17,28	17,28	0,33	0,90	2,70	2,38	30	500
2.999 €	7.400	2.100	1.100	15,54	17,09	0,28	0,90	3,17	2,20	30	500
3.041 €	7.000	2.800	850	19,60	16,66	0,40	0,90	2,25	2,85	30	500
3.018 €	7.100	2.600	900	18,46	16,61	0,37	0,90	2,46	2,71	30	500
3.003 €	7.100	2.600	900	18,46	16,61	0,37	0,90	2,46	2,71	30	500
3.020 €	7.200	2.300	1.050	16,56	17,39	0,32	0,90	2,82	2,29	30	500
2.982 €	7.400	2.100	1.100	15,54	17,09	0,28	0,90	3,17	2,20	30	500
2.996 €	7.400	2.100	1.100	15,54	17,09	0,28	0,90	3,17	2,20	30	500
3.004 €	7.100	2.600	900	18,46	16,61	0,37	0,90	2,46	2,70	30	500
3.009 €	7.200	2.500	950	18,00	17,10	0,35	0,90	2,59	2,49	30	500
3.024 €	7.200	2.400	1.000	17,28	17,28	0,33	0,90	2,70	2,41	30	500
3.027 €	7.000	2.900	800	20,30	16,24	0,41	0,90	2,17	3,00	30	500
3.013 €	7.200	3.000	750	21,60	16,20	0,42	0,90	2,16	2,97	30	500
3.035 €	7.200	2.400	1.000	17,28	17,28	0,33	0,90	2,70	2,41	30	500
3.013 €	7.200	3.000	750	21,60	16,20	0,42	0,90	2,16	2,97	30	500
3.045 €	7.500	2.000	1.150	15,00	17,25	0,27	0,90	3,37	2,08	30	500
2.996 €	7.400	2.100	1.100	15,54	17,09	0,28	0,90	3,17	2,20	30	500
3.031 €	7.100	2.600	900	18,46	16,61	0,37	0,90	2,46	2,71	30	500

Los resultados obtenidos son similares a los correspondientes al modelo 5R, así en todos los casos las soluciones óptimas se han obtenido para los materiales HA-30 y acero B-500S. La relación entre los lados del cimiento se sitúan en valores entre 0,27 a 0,42, también valores similares a los obtenidos con el modelo rígido. La cuantía inferior en dirección x, se corresponde siempre con la cuantía mínima impuesta (0,9 por mil), y la cuantía inferior en dirección y varía en valores de 2,25 a 3,37 por mil. La cuantía de armado superior en dirección x se sitúan en valores entre un 2,20 a 2,97 por mil. El canto de las soluciones ha sido muy variable, con valores de 750 a 1150 mm, disponiendo el óptimo de un valor de 1.100 mm similar al localizado en el modelo rígido.

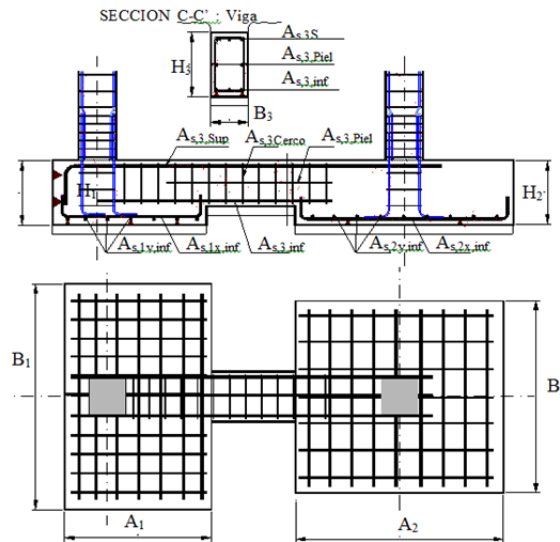
Se incluye a continuación la descripción completa de la solución óptima absoluta localizada de la función ‘Coste económico’, localizada para el ejemplo de estudio, que como se indicó anteriormente corresponde al modelo de zapata excéntrica con viga riostra y modelo elástico de transmisión de tensiones al terreno. Se incluye primero la solución obtenida sin limitación de relación entre lados del cimiento, para posteriormente incluir la solución alcanzada con la limitación  $B/A < 2$ .

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 2 FLEXIBLE . ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	1.500	4.500	700	Homigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2	4.100	1.900	500	Acero B-500 S	N1sc 420000 kN
Viga Riostr		1.100	550		N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nφ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1,xinf	27 φ 12	1360	PR	PR
As1,yinf	10 φ 20	4150	PR	PR
As2,xinf	8 φ 12	3930	PR	PR
As2,yinf	17 φ 12	1760	PR	PR

Ref(1)	nφ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As3,xsup	37 φ 12	5980	PN	PR
As3,xsup2	0 φ 0	0		
As3,xpiel	0 φ 0	0		
As3,xinf	5 φ 12	4180	PR	PR
As3,cerco	3x18 φ 6	3725		

(1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado

(2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas

(3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PN(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>1.968 €</b>
Nº Barras de armad	140
Nº Barras armado long.	104
Nº Tipo de Barras	3

Relacion Perimetro/Area	1,55
Diametro medio (cm)	11,7
Peso Armado Long (kg)	419
Peso Armado Total (kg)	404
Uniformidad de Armado (%)	72

Figura 7.16. Solución Óptima Económica. Modelo 2R.

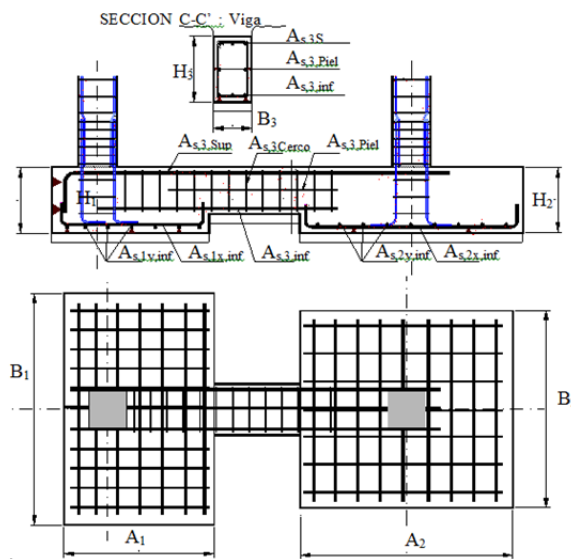


<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 2 MOD ELASTICO LIMITACION B/A&lt;2 . ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria				Materiales		Cargas	
	Dimensiones (mm)						
	A	B	H	Hormigon	HA-30	N1cp	860000 kN
Zapata 1	1.900	3.800	800	Acero	B-500 S	N1sc	420000 kN
Zapata 2	4.800	1.600	600			N2cp	1600000 kN
Viga Riostra		800	600			N2sc	1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nº (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)	Ref(1)	nº (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1,xinf	25	1760	PR	PR	As3,xsup	22	6050	PN	PR
As1,yinf	13	3320	PR	PR	As3,xsup2	0	0		
As2,xinf	8	4580	PR	PR	As3,xpiel	0	0		
As2,yinf	23	1460	PR	PR	As3x,inf	4	3880	PR	PR
					As3,cerco	3x37	6	3380	

- (1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado
- (2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas
- (3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas
- (4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>1.968 €</b>	Relacion Perimetro/Area	1,55
Nº Barras de armad	140	Diametro medio (cm)	11,7
Nº Barras armado long.	104	Peso Armado Long (kg)	419
Nº Tipo de Barras	3	Peso Armado Total (kg)	404
		Uniformidad de Armado (%)	72

Figura 7.17. Solución Óptima Económica con B/A<2. Modelo 2R.

### 7.5.2 Funciones de ‘Constructibilidad’.

Se incluyen a continuación los óptimos obtenidos para cada uno de los modelos estructurales analizados de las funciones objetivo ‘Peso Armadura, N° de barras de armado, N° Tipo de barras utilizados, Relación Perímetro/Área y Diámetro medio.

Función objetivo ‘Peso Armadura (kg)’.

Se resume en la siguiente tabla los óptimos alcanzados para cada modelo de cimiento de la función objetivo “Peso de armadura”.

**Tabla 7.12. Resultados “Peso Armadura” (SA).**

Tipología	Peso Armado Mínimo (kg)	Variación (%)	Peso Armado medio (kg)	Desviación Típica	Media T Calculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	797	88,4%	842	96,7	12
Tipo 2 Rígida	488	15,4%	511	15,1	17
Tipo 3 Rígida	778	83,9%	898	153,0	13
Tipo 4 Rígida	812	92,0%	864	53,1	13
Tipo 5 Flexible	749	77,1%	798	97,6	70
Tipo 2 Flexible	423	0,0%	446	16,8	864
Tipo 3 Flexible	723	70,9%	787	49,7	82
Tipo 4 Flexible	712	68,3%	732	21,3	79

La tipología que mejores resultados aporta es la correspondiente a la zapata excéntrica con viga riostra y modelo de tensiones elástico, Tipo 2F, seguida de la misma tipología con comportamiento rígido, Tipo 2R, que presenta valores un 15% por encima. Le siguen las tipologías 3F y 4F con valores del orden de un 70% superior y la zapata combinada de ancho constante 5F con valores un 77% por encima. El resto de tipologías, 5R, 3R y 4R presentan valores entre un 84 a 92% superiores.

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las funciones objetivo asociadas a la solución óptima alcanzada para las funciones objetivo ‘Peso de armadura’ y ‘Coste económico’, del modelo de cimiento 2F.

**Tabla 7.13. Comparativa resultados I. “Peso Armadura Total” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	Economico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Peso Arm long (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relacion p/A (mm-1)	Diametro Medio (cm)	Uniformidad Armado (%)
C. Economico	2F	1.968 €	419	404	140	3	1,55	11,7	80
Peso Armadura	2F	2.393 €	412	400	154	3	1,29	10,7	80
C. Economico	5R	3.137 €	841	841	74	2	1,19	18,7	86
Peso Armadura	5R	3.258 €	797	797	66	2	1,21	18,2	86

Como se puede comprobar, el óptimo alcanzado de la función Peso Armadura, implica fuertes incrementos de la función económica, del orden del 21% para 2F y 4% para 5R respecto a la solución óptima alcanzada desde el punto de vista económico, mientras

que la mejora alcanzada en peso de armado solo varia un 1.6% para 2F y un 5% para 5R.

Si analizamos la geometría de las soluciones:

**Tabla 7.14. Comparativa resultados II. “Peso Armadura Total” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Economico	2F	1500	4500	750	4100	1900	500	1100	500	30	500
Peso Armadura	2F	1800	3600	950	3400	2700	600	1500	600	30	500
C. Economico	5R	7000	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500
Peso Armadura	5R	7550	2100	1200	0	0	0	0	0	30	500

Queda de manifiesto, que la solución del óptimo ‘peso armadura’, se alcanza con geometrías que implican mayor volumen de la cimentación y por tanto de hormigón, lo que encarece sensiblemente el cemento. La solución presenta mayores valores del canto para los cimientos, lo que aumenta la resistencia a flexión de las secciones al aumentar el brazo mecánico y permite disminuir las cuantías de armado, a costa de necesitar mayor volumen de hormigón.

Se establece como conclusión, que la optimización económica ya garantiza soluciones cercanas al óptimo de la función ‘peso de armado’, lo cual se asocia al elevado porcentaje de repercusión del coste de acero sobre el coste total, que como se indicó en apartados anteriores se sitúa en torno al 25%. La búsqueda específica del óptimo de peso de armado, fuerza a soluciones que se alejan significativamente del óptimo económico, sin presentar frente a este, grandes mejoras del peso de armado.

#### Función objetivo Número de Barras.

Se resume en la siguiente tabla los óptimos alcanzados para cada modelo de cimiento de la función objetivo “Número de barras de armado”.

**Tabla 7.15. Resultados “Mínimo Número de Barras” (SA).**

Tipología	Min N° Barras	Variación (%)	Media N° Barras	Desviación Típica	Media T Calculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	47	0,0%	47	0,5	14
Tipo 2 Rígida	69	46,8%	72	1,3	24
Tipo 3 Rígida	62	31,9%	65	4,3	16
Tipo 4 Rígida	60	27,7%	63	1,8	23
Tipo 5 Flexible	47	0,0%	47	0,5	87
Tipo 2 Flexible	61	29,8%	72	4,4	882
Tipo 3 Flexible	60	27,7%	64	2,0	109
Tipo 4 Flexible	59	25,5%	61	2,2	93

Como se puede comprobar, es con el modelo de Zapata combinada de ancho constante con modelo de comportamiento de cimiento rígido o con modelo elástico de tensiones, con el que se han podido alcanzar mejores resultados del parámetro. Todo el resto de modelos, zapatas excéntricas con viga riostra, 2F o 2R y combinadas asimétricas tipo 3R, 4R, 3F y 4F, obtienen resultados superiores, en torno a un 25 a 46% por encima, mostrándose mejores resultados para los cimientos con modelos elásticos.

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las funciones objetivo asociadas a la solución óptima alcanzada para las funciones objetivo ‘Número de barras de armado’ y ‘Coste económico’, para los modelos de cimiento 2F y 5R.

**Tabla 7.16. Comparativa resultados I. “Número de barras” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	Economico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Peso Arm long (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relacion p/A (mm-1)	Diametro Medio (cm)	Uniformidad Armado (%)
C. Economico	2F	1.968 €	419	404	140	3	1,55	11,7	80
Nº Barras	5R	3.435 €	980	980	47	1	1,27	25,0	100
Nº Barras	2F	3.811 €	659	656	61	3	1,52	22,6	72
C. Economico	5R	3.137 €	841	841	74	2	1,19	18,7	86

Haciendo las comparaciones entre los mismos modelos, se puede comprobar que el óptimo alcanzado de la función, ‘Número de barras de armado’, implica fuertes incrementos de la función económica, del orden del 200% en el modelo 2F y del 109% para el modelo 5R, mientras que las mejoras obtenidas del nº de barras es del orden del 230% para el modelo 2F y del 115% para el modelo 5R.

Hay que destacar, que en la búsqueda del óptimo para la función número de barras para el modelo 5R, se obtienen con el mismo valor óptimo, soluciones muy diferentes, presentando variaciones de coste económico del orden del 20% entre ellas. En la tabla anterior se incluyó dentro de la solución óptima de la función número de barras, la que a su vez aportó menor coste económico. Este inconveniente no se detecta en el caso del modelo 2F.

Analizando la geometría obtenida en los modelos.

**Tabla 7.17. Comparativa resultados II. “Número de barras” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Economico	2F	1500	4500	750	4100	1900	500	1100	500	30	500
Nº Barras	5R	7500	2000	1250	0	0	0	0	0	30	500
Nº Barras	2F	2100	4100	1950	4400	1900	750	600	500	30	500
C. Economico	5R	7000	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500

Se comprueba que para la obtención del óptimo de número de barras, se obtienen cantos de cimiento sensiblemente superiores a los obtenidos para las soluciones económicamente óptimas, justificándose este aspecto, por la consecución de mayores resisten-

cia en las secciones mediante el incrementos de brazo mecánico y permitiendo la reducción de cuantías, y por tanto, del número de barras.

Se establece como conclusión, que la optimización del número de barras implica la adopción de modelos de zapata combinada de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados muy variables (hasta un 20%), situación que no aparece en el caso del modelo 2F. Imponiendo para el modelo 5R, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función número de barras implica ligeros incrementos del coste respecto a la solución óptima (9%), mejorándose en número de barras un 15%. Para el caso de cimiento tipo 2F, la optimización del número de barras si empeora significativamente el óptimo de coste económico (hasta un 100%), mejorando la función número de barras hasta un 230%.

#### Función objetivo Número de Tipos de Barras.

Se resume en la siguiente tabla los óptimos alcanzados para cada modelo de cimiento de la función “Número de tipos de barras de armado”.

**Tabla 7.18. Resultados “Mínimo Número de Tipos de Barra.” (SA).**

Tipología	Numero Tipo Barras Mínimo	Variación (%)	Numero Tipo Barras medio	Desviación Típica	Media T Calculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	1	0,0%	1	0,0	16
Tipo 2 Rígida	2	100,0%	2	0,0	28
Tipo 3 Rígida	2	100,0%	2	0,2	13
Tipo 4 Rígida	2	100,0%	2	0,2	12
Tipo 5 Flexible	1	0,0%	1	0,0	96
Tipo 2 Flexible	2	100,0%	2	0,0	1.196
Tipo 3 Flexible	2	100,0%	2	0,0	76
Tipo 4 Flexible	2	100,0%	2	0,0	72

En este caso, se vuelve a conocer el valor óptimo de la función objetivo analizada ‘Número mínimo de Tipos de Barra’, cuyo valor óptimo será de 1. Como se puede observar, solo se ha podido alcanzar este valor óptimo para la tipo de Zapata combinada de ancho constante, tanto en su modelo rígido como en el modelo de tensiones elástico. Para todo el resto de tipologías se alcanza el mismo valor de 2. En las tipologías 2, la necesidad en todos los casos de disponer armado de refuerzo a cortante con diámetros posibles diferentes en algunos casos a los impuestos para el armado longitudinal, complica la consecución de solución con valores de esta función inferiores a 2. Lo mismo ocurre en las tipologías tipo 3 y 4, donde son necesarias la disposición de armados complementarios en algunas zonas de la sección, no resistentes, y de diámetros bajos lo que complica la consecución de soluciones con valores de esta función por debajo del valor 2.

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las funciones objetivo asociadas a la solución óptima alcanzada para las funciones objetivo ‘Número de tipos de barras de armado’ y ‘Coste económico’, para los modelos de cemento 2F y 5R.

**Tabla 7.19. Comparativa resultados I. “Número tipos de barras” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	Economico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Peso Arm long (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relacion p/A (mm-1)	Diametro Medio (cm)	Uniformidad Armado (%)
C. Economico	2F	1.968 €	419	404	140	3	1,55	11,7	80
Nº Tipo Barras	5R	4.367 €	1.861	1.861	80	1	1,22	25,0	100
Nº Tipo Barras	2F	2.955 €	742	632	151	2	1,21	12,5	86
C. Economico	5R	3.137 €	841	841	74	2	1,19	18,7	86

Haciendo las comparaciones entre los mismos modelos, se puede comprobar que el óptimo alcanzado de la función, ‘Número de tipos de barras’, implica fuertes incrementos de la función económica, del orden del 150% en el modelo 2F y del 140% para el modelo 5R, mientras que las mejoras obtenidas del nº de tipos de barras es del orden del 150% para el modelo 2F y del 200% para el modelo 5R.

Hay que destacar, que en la búsqueda del óptimo para la función número de tipos de barras tanto para el modelo 5R como para el 2F, se obtienen con el mismo valor óptimo, soluciones muy diferentes entre ellas, presentando variaciones de coste económico del orden del 220% para el 2F y del 136% para el 5R. En la tabla anterior se incluyó dentro de la solución óptima de la función número de tipos de barras, la que a su vez aporta menor coste económico.

Analizando la geometría obtenida en los modelos.

**Tabla 7.20. Comparativa resultados I. “Número tipos de barras” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Economico	2F	1500	4500	750	4100	1900	500	1100	500	30	500
Nº Tipo Barras	5R	7450	2100	1200	0	0	0	0	0	30	500
Nº Tipo Barras	2F	2500	3600	1000	3600	2500	650	1500	500	30	500
C. Economico	5R	7000	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500

Se establece como conclusión, que la optimización del número de tipos de barras implica la adopción de modelos de zapata combinada de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados muy variables (hasta un 220% para el tipo 2F y del 136% para el tipo 5R). Imponiendo en los modelos, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función número de tipos de barras implica incrementos del coste respecto a la solución óptima del 150% en 2F y 140% en 2R, mejorándose en el número de tipos de barras un 150% en el tipo 2F y un 200% en el 5R.

Función objetivo Relación perímetro / Área.

Se resume en la siguiente tabla los óptimos alcanzados para cada modelo de cimiento de la función objetivo “Relación P/A ( $\text{mm}^{-1}$ ).

**Tabla 7.21. Resultados “Relación P/A.” (SA).**

Tipología	Relación P/A Mínimo ( $\text{mm}^{-1}$ )	Variación (%)	Relación P/A medio ( $\text{mm}^{-1}$ )	Desviación Típica	Media T Cálculo Total (seg)
Tipo 5 Rígida	0,270	0,0%	0,287	0,0	164
Tipo 2 Rígida	0,672	248,9%	0,676	0,0	116
Tipo 3 Rígida	0,410	151,9%	0,430	0,0	168
Tipo 4 Rígida	0,441	163,3%	0,483	0,0	195
Tipo 5 Flexible	0,282	104,4%	0,353	0,1	971
Tipo 2 Flexible	0,672	248,9%	0,681	0,0	9.021
Tipo 3 Flexible	0,359	133,0%	0,419	0,0	762
Tipo 4 Flexible	0,372	137,8%	0,494	0,1	868

Como era previsible, los mejores resultados son los alcanzados por las tipologías de cimiento combinado de ancho constante, con valores ligeramente mejores para el modelo de comportamiento rígido (-4.4%). Les siguen los modelos de cimiento 3 y 4 (Zapatas combinadas asimétricas), con ligeras mejoras en su modelo de análisis elástico respecto al de cimiento rígido, pero con valores en torno al 33% a 63% superiores al óptimo. Finalmente, como era de esperar, los peores resultados son los obtenidos por el modelo de zapata excéntrica con viga riostra, solución mucho más irregular geométricamente que el resto y por tanto con peores resultados de este parámetros, en torno a +150% del valor óptimo.

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las funciones objetivo asociadas a la solución óptima alcanzada para las funciones objetivo ‘Relación P/A’ y ‘Coste económico’, para los modelos de cimiento 2F y 5R.

**Tabla 7.22. Comparativa resultados I. “Relación P/A” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	Economico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Peso Arm long (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relacion p/A ( $\text{mm}^{-1}$ )	Diametro Medio (cm)	Uniformidad Armado (%)
C. Economico	2F	1.968 €	419	404	140	3	1,55	11,7	80
Relacion p/A	5R	63.186 €	12.244	12.244	372	2	0,27	22,8	86
Relacion p/A	2F	3.031 €	1.251	1.140	188	4	0,67	17,3	58
C. Economico	5R	3.137 €	841	841	74	2	1,19	18,7	86

Haciendo las comparaciones entre los mismos modelos, se puede comprobar que el óptimo alcanzado de la función, ‘Relación P/A’, implica elevados incrementos de la función económica, del orden del 150% en el modelo 2F y del 2.000% para el modelo 5R, mientras que las mejoras obtenidas de la relación P/A es del orden del 440% para el modelo 5R y del 230% para el modelo 2F.

Hay que destacar, que en la búsqueda del óptimo para la función relación P/A, para el modelo 2F, se obtienen con el mismo valor óptimo, soluciones muy diferentes entre ellas, presentando variaciones de coste económico del orden del 204% para el 2F. En la tabla anterior se incluyó dentro de la solución óptima de la función relación P/A, la que a su vez aporta menor coste económico.

Analizando la geometría obtenida en los modelos.

**Tabla 7.23. Comparativa resultados I. “Relación P/A” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Economico	2F	1500	4500	750	4100	1900	500	1100	500	30	500
Relacion p/A	5R	11100	22200	2000	0	0	0	0	0	30	500
Relacion p/A	2F	2500	5000	850	5400	5000	650	4200	500	30	500
C. Economico	5R	7000	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500

Se establece como conclusión, que la optimización de la relación Perímetro/área implica la adopción de modelos de zapata combinada de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados variables (hasta un 204% para el tipo 2F y del 106% para el tipo 5R). Imponiendo en los modelos, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función relación P/A implica incrementos del coste respecto a la solución óptima del 150% en 2F y 2.014% en 5R, mejorándose en la relación P/A un 230% en el tipo 2F y un 440% en el 5R.

Función objetivo Diámetro Medio (mm).

Se resume en la siguiente tabla los óptimos alcanzados para cada modelo de cimiento de la función objetivo “Diámetro Medio (cm)”.

**Tabla 7.24. Resultados “Diámetro Medio”. (SA).**

Tipología	Diámetro medio máximo (cm)	Variación (%)	Media Diámetro medio (cm)	Desviación Típica	Media T Calculo Total (seg)
<b>Tipo 1</b>					
<b>Tipo 5 Rígida</b>	25,0	0,0%	25,0	0,0	38
<b>Tipo 2 Rígida</b>	24,9	-0,4%	24,5	0,1	20
<b>Tipo 3 Rígida</b>	24,9	-0,4%	24,9	0,0	15
<b>Tipo 4 Rígida</b>	24,9	-0,4%	24,9	0,0	13
<b>Tipo 5 Flexible</b>	25,0	0,0%	25,0	0,0	163
<b>Tipo 2 Flexible</b>	24,9	-0,4%	24,5	0,1	1.839
<b>Tipo 3 Flexible</b>	24,9	-0,4%	24,9	0,0	68
<b>Tipo 4 Flexible</b>	24,9	-0,4%	24,9	0,0	77



Al contrario que en el resto de funciones objetivo, en este caso es conocido el valor máximo de la misma, que coincide con el diámetro máximo de armadura permitido y que como se puede comprobar es alcanzado en la optimización por los modelos de zapata combinada de ancho constante. En todo caso, el resto de modelos de cimentación también alcanzan el valor máximo posible, puesto que para la tipología 2 no es posible alcanzar el máximo valor de 25, al existir en todos los casos armado de refuerzo a cortante para la viga riostra, cuyos diámetros posibles máximos son de 16 mm. En los modelos 3 y 4 ocurre algo similar, al ser necesario disponerse algún armado mínimo por cuantía, que el propio procedimiento de cálculo utilizado obliga a disponer con diámetros pequeños.

En la siguiente tabla se muestran todos los valores de las funciones objetivo asociadas a la solución óptima alcanzada para las funciones objetivo ‘Diámetro Medio’ y ‘Coste económico’, para los modelos de cimiento 2F y 5R.

**Tabla 7.25. Comparativa resultados I. “Diámetro Medio” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	Economico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Peso Arm long (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relacion p/A (mm-1)	Diámetro Medio (cm)	Uniformidad Armado (%)
C. Economico	5R	3.137 €	841	841	74	2	1,19	18,7	86
Diámetro Medio	5R	4.404 €	1.766	1.766	92	1	1,14	25,0	100
C. Economico	2F	1.968 €	419	404	140	3	1,55	11,7	80
Diámetro Medio	2F	12.509 €	3.165	3.150	198	2	0,87	24,6	86

Haciendo las comparaciones entre los mismos modelos, se puede comprobar que el óptimo alcanzado de la función, ‘Diámetro medio’, implica elevados incrementos de la función económica, del orden del 140% en el modelo 5R y del 635% para el modelo 2F, mientras que las mejoras obtenidas de la función DM es del orden del -25% para el modelo 5R y del -50% para el modelo 2F.

Hay que destacar, que en la búsqueda del óptimo para la función Diámetro medio, para el modelo 5R, se obtienen con el mismo valor óptimo, soluciones muy diferentes entre ellas, presentando variaciones de coste económico del orden del 550% para el 5R. En la tabla anterior se incluyó dentro de la solución óptima de la función Diámetro medio, la que a su vez aporta menor coste económico.

Analizando la geometría obtenida en los modelos.

**Tabla 7.26. Comparativa resultados II. “Diámetro Medio” (SA).**

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Economico	5R	7000	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500
Diámetro Medio	5R	7300	2300	1200	0	0	0	0	0	30	500
C. Economico	2F	1500	4500	750	4100	1900	500	1100	500	30	500
Diámetro Medio	2F	2300	4500	2000	5800	5000	2000	1000	500	30	500

Se establece como conclusión, que la optimización de la función DM implica la adopción de modelos de zapata combinada de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados variables (hasta un 550% para el tipo 5R). Imponiendo en los modelos, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función DM implica incrementos del coste respecto a la solución óptima del 140% en 5R y 635% en 2F, mejorándose en la función DM un 178% en el tipo 2F y un 104% en el 5R.

En la siguiente tabla se incluyen la descripción de la geometría y armado de las soluciones óptimas alcanzadas para cada uno de las funciones objetivo analizadas, Coste económico, Peso de la armadura, Peso de la armadura longitudinal, Número de barras de armado, Número de tipos de barra distintos, Relación Area/Perímetro y diámetro medio.

Tabla 7.27. Óptimos para cada función objetivo I. (SA).

OPTIMOS	Tipo ZAP	Economico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Peso Arm long (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relacion p/A (mm-1)	Diametro Medio (cm)
C. Economico	2F	1.968 €	419	404	140	3	1,55	11,7
Peso Armadura	2F	2.393 €	412	400	154	3	1,29	10,7
Peso Arm. Long	2F	2.319 €	475	386	158	2	1,47	12,4
Nº Barras	5R	3.435 €	980	980	47	1	1,27	25,0
Nº Tipo Barras	5R	4.367 €	1.861	1.861	80	1	1,22	25,0
Relacion p/A	5R	63.186 €	12.244	12.244	372	2	0,27	22,8
Diametro Medio	5R	4.404 €	1.766	1.766	92	1	1,14	25,0

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Economico	2F	1500	4500	750	4100	1900	500	1100	500	30	500
Peso Armadura	2F	1800	3600	950	3400	2700	600	1500	600	30	500
Peso Arm. Long	2F	1900	3800	850	2900	2700	650	1000	600	30	500
Nº Barras	5R	7500	2000	1250	0	0	0	0	0	30	500
Nº Tipo Barras	5R	7450	2100	1200	0	0	0	0	0	30	500
Relacion A/P	5R	11300	19000	1400	0	0	0	0	0	30	500
Diametro Medio	5R	7300	2300	1200	0	0	0	0	0	30	500

OPTIMOS	Tipo ZAP	As1,x,inf			As1,y,inf			As2,x,inf			As2,y,inf			As1,x,sup		
		n	φ	L /mm)	n	φ	L /mm)	n	φ	L /mm)	n	φ	L /mm)	n	φ	L /mm)
C. Economico	2F	27	12	1360	10	20	4150	8	12	3930	17	12	1760	0	0	0
Peso Armadura	2F	28	12	1.660	11	16	3.000	13	12	3.140	17	12	1.980	0	0	0
Peso Arm. Long	2F	26	12	1.760	8	20	3.380	14	12	2.590	16	12	2.060	0	0	0
Nº Barras	5R	7	25	7360	24	25	1900	0	0	0	0	0	0	10	25	7440
Nº Tipo Barras	5R	17	25	7.110	31	25	2.500	0	0	0	0	0	0	21	25	7.190
Relacion A/P	5R	87	25	10.960	89	25	4.900	0	0	0	0	0	0	92	16	11.040
Diametro Medio	5R	8	25	7.160	58	25	2.200	0	0	0	0	0	0	18	25	7.240

Tabla 7.28. Óptimos para cada función objetivo II. (SA).

OPTIMOS	Tipo ZAP	AsVR,x,sup			AsVR,x,,inf			AsVR,x,piel			As,cercos		
		n	∅	L /mm)	n	∅	L /mm)	n	∅	L /mm)	ramas	nº cercos	∅
C. Economico	2F	37	12	5980	5	12	4180	0	0	0	3	18	6
Peso Armadura	2F	40	12	5.980	7	12	4.580	0	0	0	4	19	6
Peso Arm. Long	2F	37	12	5.990	5	12	4.830	0	0	0	3	26	12
Nº Barras	5R	0	0	0	0	0	0	6	25	7360	0	0	0
Nº Tipo Barras	5R	0	0	0	0	0	0	18	25	7.110	0	0	0
Relacion A/P	5R	0	0	0	0	0	0	104	25	10.960	0	0	0
Diámetro Medio	5R	0	0	0	0	0	0	8	25	7.160	0	0	0

Se puede concluir que las funciones asociadas al coste económico arrojan mejores resultados para la tipología de zapata excéntrica con viga riostra y modelo de tensiones elásticas. Sin embargo, desde el punto de vista de la constructibilidad, los mejores resultados se observan para la tipología de zapata combinada de ancho constante con comportamiento de cimiento rígido. Destacar que las funciones objetivo de N° Tipo de barras y Diámetro medio se alcanzaban también por el modelo 5F, pero se ha estimado que el incremento de tiempo de cálculo necesario para su evaluación, permite clasificarla como de peor calidad que la solución con el modelo 5R. También se observa que las soluciones para cada óptimo de las funciones de constructibilidad arrojan resultados muy desfavorables desde el punto de vista económico y además configuraciones muy distintas para cada función objetivo optimizada.

En el anexo II se incluyen fichas con la descripción completa, tanto de geometría como de armado, de las soluciones óptimas alcanzadas. También se incluyen las fichas descriptivas de la solución aportada por Calavera [1] en su libro “Cálculo de cimentaciones” así como las obtenidas mediante la aplicación del programa de cálculo de estructuras CYPECAD [5] versión 2014.

### 7.5.3 Verificación de soluciones.

Con el objeto de poder verificar la bondad de las soluciones alcanzadas mediante la aplicación del algoritmo de S.A. en los modelos de cálculo elástico, se han modelizado las soluciones alcanzadas con el software de cálculo estructural SAFE [7] ver 14.0.0 y SAP2000 [8] ver. 17.1.1 de Computers and Structures Inc, verificándose en todos los casos que tanto las deformaciones, tensiones transmitidas al terreno y esfuerzos de diseño han sido coincidentes. A modo de ejemplo, se incluyen los resultados alcanzados, con el uso de la aplicación informática SAFE [7], para la solución alcanzada como óptimo económico con el modelo de zapata excéntrica con viga riostra y cálculo elástico.

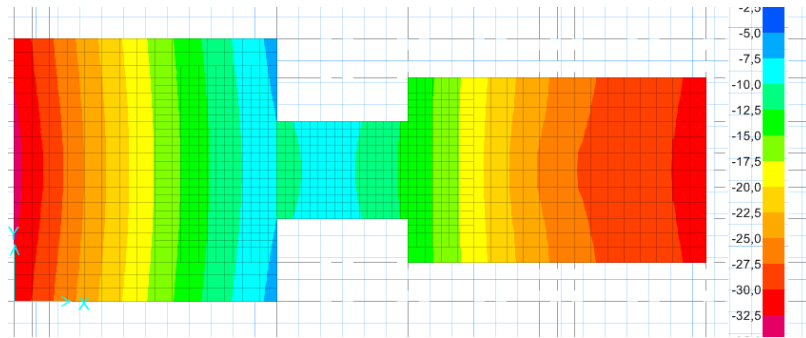


Figura 7.18. Tensiones en el terreno ( $t/m^2$ ). SAP2000 [8].

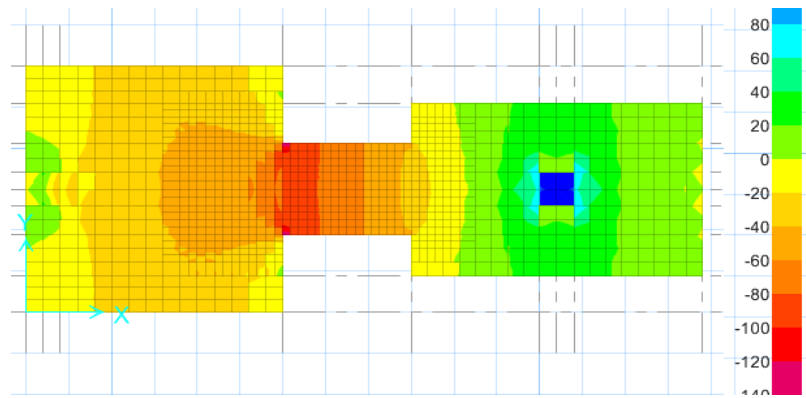


Figura 7.19. Momentos en dirección x ( $t m$ ). SAP2000 [8].

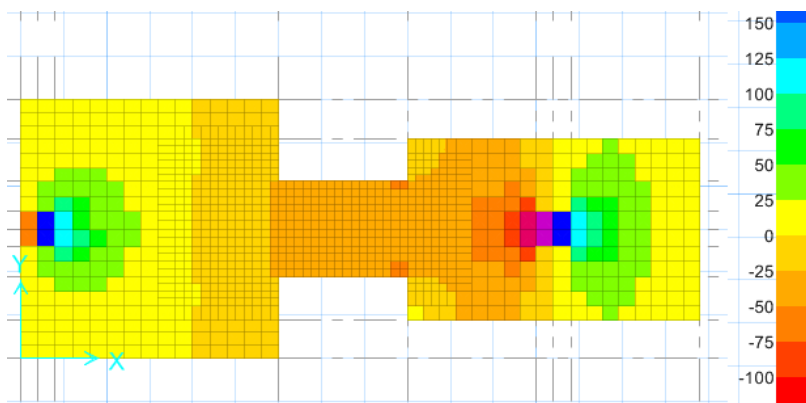


Figura 7.20. Cortantes dirección x ( $t$ ). SAP2000 [8].

#### 7.5.4 Estudio de sensibilidad.

Se incluye en este apartado un análisis de sensibilidad que pretende analizar la variación de los resultados obtenidos al modificar los valores de algunas de las variables del problema en estudio. Se ha escogido como variables relevantes las siguientes:

- Tensión admisible del terreno.
- Módulo de Balasto,  $k_{30}$ .
- Materiales. Hormigones y aceros

En los siguientes apartados se muestran los resultados alcanzados en cada caso.

##### 7.5.4.1 Análisis de Sensibilidad. Tensión admisible del terreno:

Para el estudio de la sensibilidad de las soluciones del problema ante los valores del parámetro ‘Tensión admisible del terreno’, se ha procedido a la aplicación del algoritmo de optimización SA, modificando los valores de  $\sigma_{adm}$ , entre los siguientes valores.

- $\sigma_{adm} = 0.05 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.10 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.15 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.20 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.25 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.30 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.35 \text{ N/mm}^2$ .
- $\sigma_{adm} = 0.40 \text{ N/mm}^2$ .

Los resultados se han obtenido para todos los modelos de estudio realizando 20 experimentos para la determinación del valor óptimo, suponiendo un terreno tipo granular con un valor de  $K_{30} = 0.17 \text{ N/mm}^3$ .

Lo primero a destacar es la falta de soluciones para tensiones bajas, ( $< 0,15 \text{ N/mm}^2$ ). Para el resto de tensiones, los modelos 3, 4 y 5 con comportamiento de cimiento rígido, presentan valores similares y tendencias de caída del coste económico frente al aumento de la tensión del terreno muy similares.

La solución óptima en todos los casos continua siendo el modelo de cimiento de viga excéntrica con viga riostra, tipo 2.

Comparando los mismos modelos con análisis como cimiento rígido o mediante modelo elástico, se comprueba que se obtienen siempre mejores resultados con el modelo elástico, aunque las diferencias son ligeras, situándose entre un 5 a 7%.

También se comprueba que hasta tensiones admisibles de  $0.2 \text{ N/mm}^2$  no ha sido posible localizar soluciones factibles para el modelo de zapata excéntrica con viga riostra, mientras que con el resto de modelos se obtienen soluciones desde tensiones de  $0.15 \text{ N/mm}^2$ .

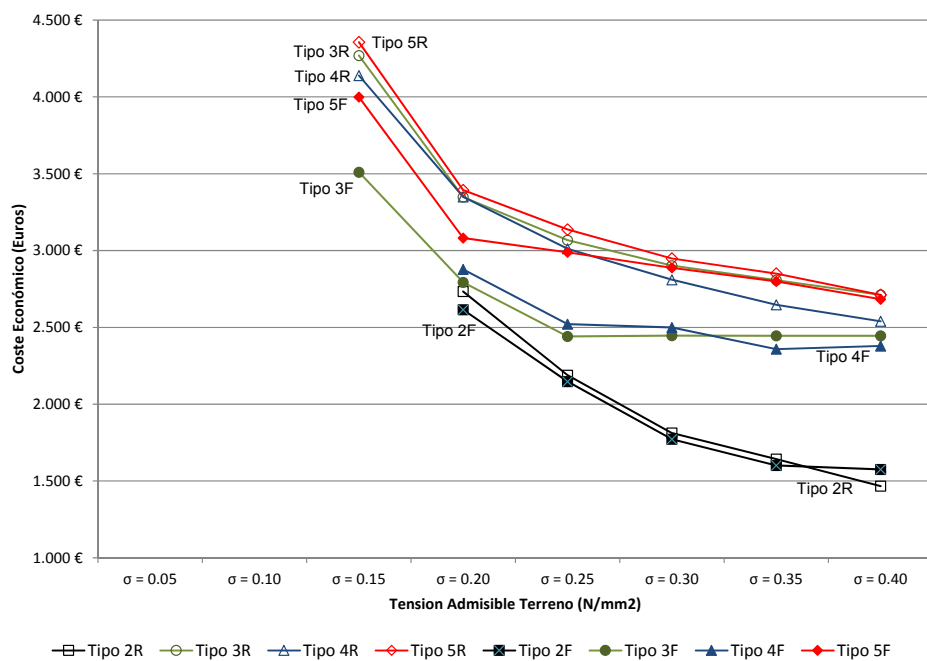


Figura 7.21. Estudio sensibilidad parámetro ' $\sigma_{adm}$ '. (I).

Representando los porcentajes de disminución de una tensión a la siguiente:

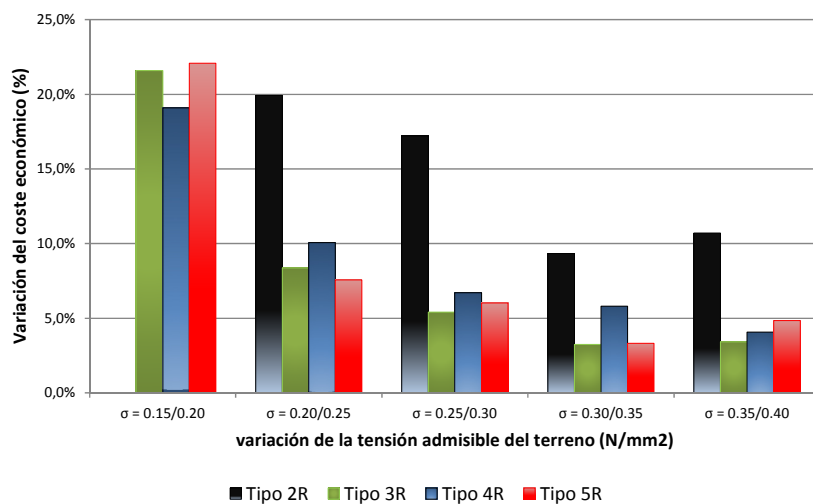


Figura 7.22. Estudio sensibilidad parámetro ' $\sigma_{adm}$ '. (II)

Se observa como de nuevo los modelos 3R, 4R, y 5R presentan variaciones muy similares, con disminuciones del 20% en el paso de tensiones de 0.15 a 0.20 N/mm<sup>2</sup> y menores al 5% para el paso de tensiones de 0.25 a 0.30 N/mm<sup>2</sup> en adelante. El modelo 2R presenta mayor sensibilidad ante el valor de la tensión admisible, con variaciones siempre por encima del 10%, incluso en tensiones bajas. En general, la variación para el modelo 2R se sitúa alrededor del doble del valor correspondiente al resto de tipologías.

En la siguiente gráfica se muestran los rangos de variación para cada modelo analizado.

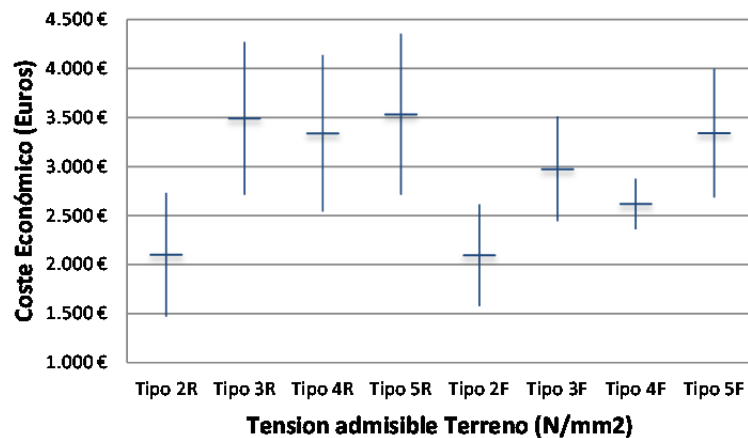


Figura 7.23. Gráfica sensibilidad parámetro  $\sigma_{adm}$ .

Como se puede comprobar, la sensibilidad de las soluciones al parámetro de tensión admisible del terreno es muy similar para los modelos de cimiento 3,4 y 5, siendo únicamente para el modelo tipo 4F, algo inferior al resto. En todo caso, los rangos de variación son siempre algo menores en los modelos de análisis elástico, que los mismos modelos con análisis de cimiento rígido.

Como era evidente, el incremento de la tensión admisible, permite obtener mejores óptimos económicos, presentando estos grandes variaciones al disminuir el parámetro de tensión en valores medios (Mejoras de hasta el 20% para variaciones de 0.15 a 0.20 N/mm<sup>2</sup>), y presentando menores ganancias para la variación a tensiones altas (Mejoras en torno al 5% para variaciones de 0.30 a 0.35 y superiores).

#### 7.5.4.2 Análisis de sensibilidad. Módulo de Balasto ( $K_{30}$ ).

El siguiente parámetro escogido para el análisis de sensibilidad es el Módulo de Balasto,  $K_{30}$ . En los modelos de cimiento rígido, este parámetro solo interviene en la verificación de la condición de rigidez del cimiento mientras que en los modelos de cálculo con transmisión de tensiones elástico al terreno, representa la constante de proporciona-

lidad entre la presión ejercida sobre el terreno y la deformación alcanzada en un punto del cimiento. Para la determinación de los escalones de variación de este parámetro se recurrirá a la clasificación aportada en CTE [3] para diversos tipos de terreno, a los que les asigna un valor estimado de módulo de balasto.

**Tabla 7.29. Módulo de Balasto para distintos tipos de suelo. CTE [3].**

Tipo de suelo	$K_{30}$ (MN/m <sup>3</sup> )
Arcilla blanda	15 – 30
Arcilla media	30 – 60
Arcilla dura	60 – 200
Limo	15 – 45
Arena floja	10 – 30
Arena media	30 – 90
Arena compacta	90 – 200
Grava arenosa floja	70 – 120
Grava arenosa compacta	120 – 300
Margas arcillosas	200 – 400
Rocas algo alteradas	300 – 5.000
Rocas sanas	>5.000

Atendiendo a los valores aportados por CTE [3], se establecerán los siguientes intervalos, distinguiendo entre suelos cohesivos y suelos granulares.

- Suelos Cohesivos:
  - Arcillas Blandas y limos  $K_{30} = 0.02$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arcillas medias  $K_{30} = 0.04$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arcillas medias  $K_{30} = 0.08$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arcillas duras  $K_{30} = 0.12$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arcillas duras  $K_{30} = 0.16$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arcillas duras  $K_{30} = 0.20$  N/mm<sup>3</sup>.
  
- Suelos Granulares:
  - Arena floja  $K_{30} = 0.02$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arena media  $K_{30} = 0.06$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Arena compacta o grava arenosa floja  $K_{30} = 0.10$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Grava arenosa compacta  $K_{30} = 0.20$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Margas arcillosas  $K_{30} = 0.30$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Roca alterada  $K_{30} = 1.00$  N/mm<sup>3</sup>.
  - Roca sana  $K_{30} = 5.00$  N/mm<sup>3</sup>.

En la siguiente tabla se muestran los resultados alcanzados con el análisis realizado para el caso de suelos granulares:



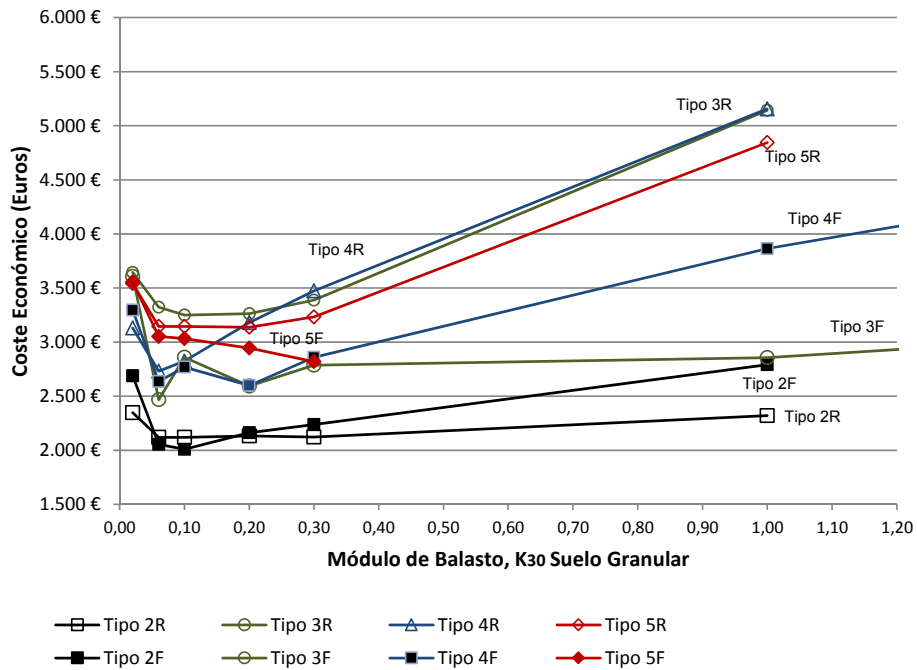


Figura 7.24. Sensibilidad  $K_{30}$ -Suelo Granular.

Como se puede observar, el rango de valores del parámetro ‘Módulo de Balasto’, con el que se alcanzan los óptimos económicos, se sitúa en el rango entre 0.05 y 0.20  $N/mm^3$ , que correspondería según CTE [3] a terrenos de arenas medias o compactas y gravas arenosas compactas.

Para valores inferiores a 0.05  $N/mm^3$  (Arenas flojas), o mayores a 0.20  $N/mm^3$  (Margas arcillosas o rocas), los resultados se alejan de los valores óptimos económicos, especialmente en el caso de rocas.

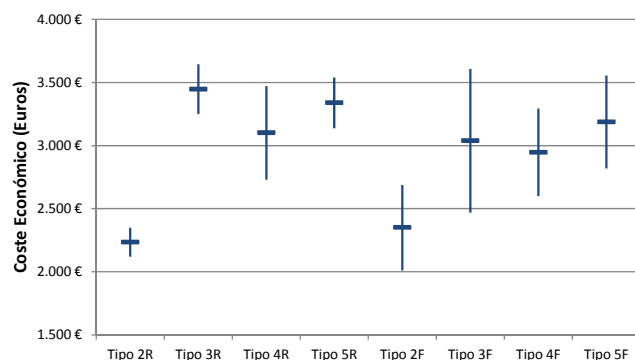


Figura 7.25. Gráfica Sensibilidad 'Módulo de Balasto  $K_{30}$ '. Suelo Granular.

Como se puede apreciar, entre los modelos de cemento rígido la sensibilidad al parámetro, Módulo de balasto, varía entre un 10 a 11% para los modelos 2R, 3R y 5R, mientras el modelo 4R presenta hasta un 20% de variación. Si se incluyen los modelos elásticos, los óptimo económicos obtenidos son algo mejores y los rangos de variación del parámetro se sitúan entre el 20% al 30%. Así pues, salvo en el modelo 4, el resto de modelos presenta variaciones en torno al 10% para los modelos de cemento rígido y de un 20% a 30% para los modelos con distribución elástica de tensiones sobre el terreno. En la siguiente tabla se muestran los resultados alcanzados con el análisis realizado para el caso de suelos cohesivos:

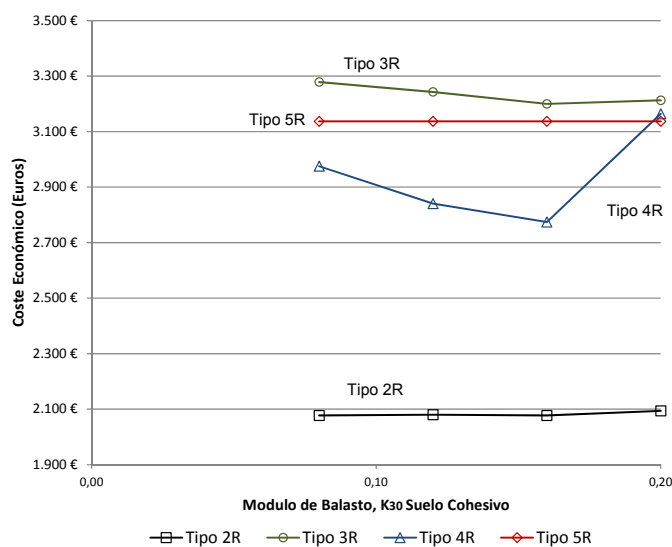


Figura 7.26. Sensibilidad parámetro  $K_{30}$ . Suelos Cohesivos.

Como se puede observar, en este caso los modelos rígidos prácticamente no se ven afectados por el parámetro ‘Módulo de balasto’, con variaciones inferiores al 2%, a excepción del tipo 4R que presenta variaciones algo inferiores al 10%. Comparándose los resultados obtenidos entre suelos cohesivos y suelos granulares, se puede determinar que para el rango de valores del módulo de balasto analizados, los resultados obtenidos mediante suelos cohesivos, son similares a los obtenidos para un suelo granular con un módulo de balasto  $K_{30} = 0.1 \text{ N/mm}^3$ , asimilable a un suelo compuesto por Arenas compactas o gravas arenosas flojas.

#### 7.5.4.3 Análisis de sensibilidad. Materiales.

Se incluirá en este apartado, el estudio de la sensibilidad de la solución de óptimo económico, frente a la variación de los materiales (Hormigón y acero), constituyentes de la solución. Las combinaciones analizadas serán las siguientes.

- Hormigón HA-25 y acero B-400.
- Hormigón HA-30 y acero B-400.
- Hormigón HA-35 y acero B-400.
- Hormigón HA-25 y acero B-500.
- Hormigón HA-30 y acero B-500.
- Hormigón HA-55 y acero B-500.

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente gráfica:

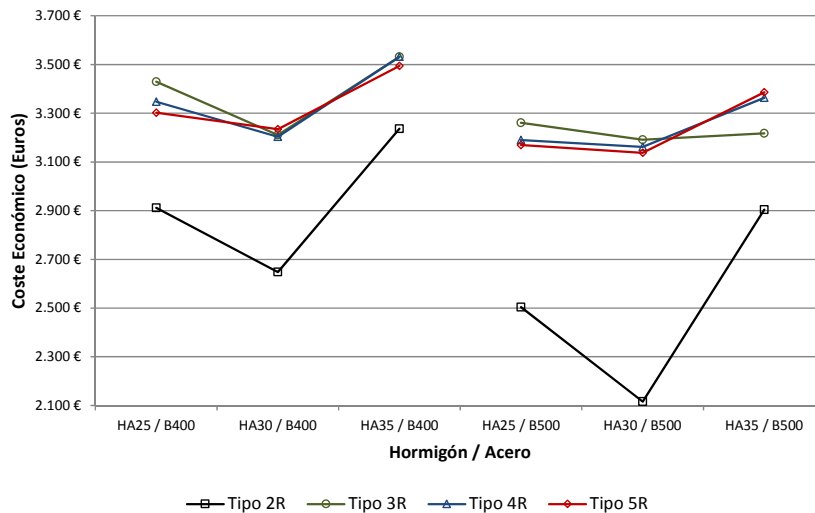


Figura 7.27. Gráfica sensibilidad. Materiales.

Como se puede comprobar, el uso de aceros de mayor límite elástico, mejora los resultados en todos los casos. En el caso de los hormigones, se obtienen los mejores resulta-

dos con hormigones HA-30, si bien con HA-25 los resultados son solo ligeramente inferiores. El uso de hormigones de mayor resistencia, HA-35, si empeora sensiblemente la solución. Mostrando la variación de valores obtenidos:

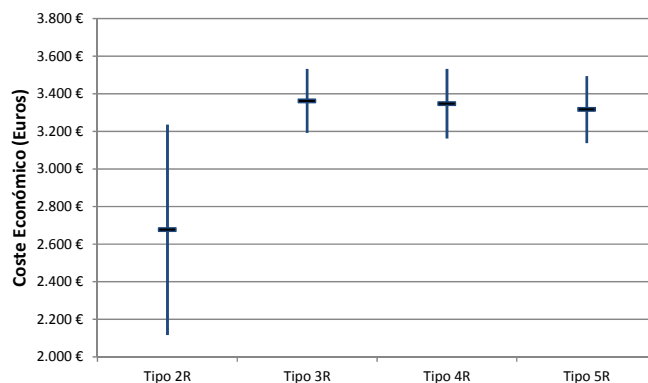


Figura 7.28. Gráfica sensibilidad 'Tipo Hormigón-Acero'.

Se puede ver la gran sensibilidad del coste económico frente a los materiales escogidos para el cemento de zapata excéntrica con viga riostra, donde la variación llega hasta el 50%, mientras que el resto de modelos presenta variaciones en torno al 11%

Mostrando solo la variación respecto al hormigón, disponiendo acero B-500 en todos los casos, las variación del coste económico sería:

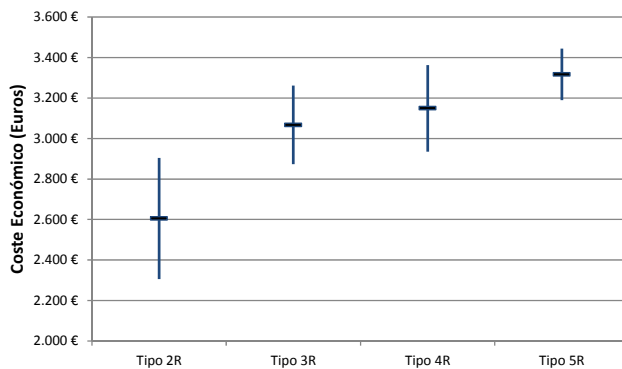


Figura 7.29. Gráfica sensibilidad 'Tipo Hormigón'.

Donde se comprueban las mismas tendencias, si bien en este caso la variación de costes para la zapata excéntrica con viga riostra es tan solo del 26%, mientras que para la zapata combinada de ancho constante el rango de variación es similar al anterior caso, un 8% y para las zapatas combinadas asimétricas del 14%,

## 7.6 Optimización Multi-objetivo (MOSA).

### 7.6.1 Introducción.

En los apartados anteriores, se ha estudiado el uso de la técnica de optimización mono-objetivo de Simulated Annealing (S.A.), para la búsqueda de forma individualizada de los óptimos de cada una de las funciones objetivos seleccionadas.

A continuación, se aplicará, sobre el mismo problema, la técnica de Optimización multi-objetivo descrita en el Capítulo 5, aplicando la heurística de Simulated Annealing multi-objetivo (MOSA), en la búsqueda de varios óptimos simultáneos de las funciones objetivo. Tras el análisis realizado en el capítulo anterior, donde se determinaron las funciones objetivo que no disponían de relación entre ellas, el estudio se centrará en las siguientes funciones:

- Coste Económico.
- Número de Barras de armado.
- Número de tipos de barras de armado.
- Relación perímetro/área.
- Diámetro Medio.

### 7.6.2 Resultados obtenidos.

Los análisis se centrarán en los modelos de zapata excéntrica con viga riostra (Tipo 2), que tal y como se demostró en los apartados anteriores ofrecían las soluciones óptimas desde el punto de vista económico y medioambiental y sobre el modelo de zapata combinada de ancho constante, (Tipo 5), que era el que ofreció mejores resultados desde el punto de vista de la facilidad constructiva.

#### 7.6.2.1 Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Diámetro medio'

Se aplica el algoritmo **MOSA**, para la obtención simultánea del mínimo de la función de coste económico y el máximo de la función de constructibilidad, 'Diámetro medio'. Los óptimos alcanzados en cada caso, para los modelos 2R y 5R han sido:

**Tabla 7.30. Optimización mono-objetivo. CE-DM.**

Modelo	Coste Económico (Euros)	Diámetro Medio (cm)
2R. Óptimo Económico	2.117	15,8
2R. Óptimo DM	12.123	24.5
5R. Óptimo Económico	3.117	18.7
5R. Óptimo DM	3.536	25.0

En las siguientes figuras se muestra la frontera de Pareto obtenida tras la ejecución de 5.000 experimentos. Sobre ella, se grafia el valor de utopía de Pareto, que sería la solución que dispondría de los valores óptimos de ambas funciones, obtenidos en la opti-

mización por separado del coste económico y del Diámetro medio. Finalmente, se evalúa que solución de la frontera de Pareto, se sitúa más próxima al punto ‘Utopía de Pareto’.

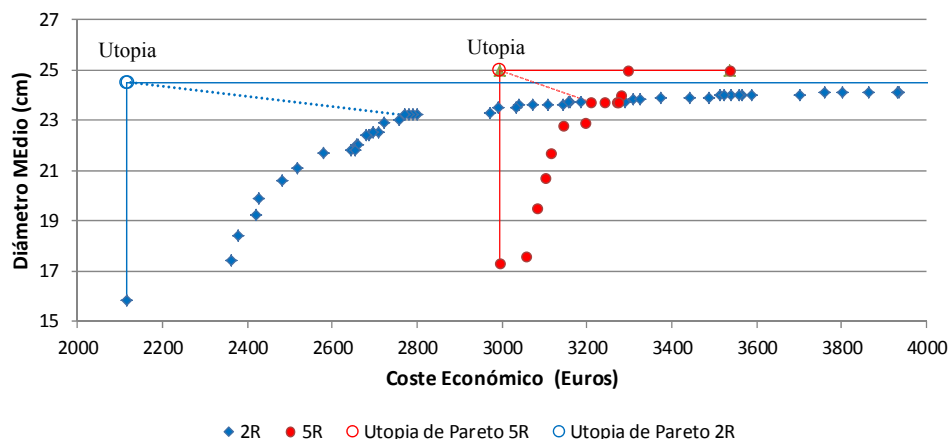


Figura 7.30. MOSA. Frontera de Pareto CE-DM.

En la siguiente tabla se muestra la solución más cercana al valor ‘Utopía de Pareto’ para los índices conjuntos de Coste Económico y Diámetro medio.

Tabla 7.32. Optimización multi-objetivo. CE-DM. (MOSA).

Modelo	Coste Económico (Euros)	Diámetro Medio (cm)
2R. Óptimo Económico/DM	2.771	23.2
5R. Óptimo Económico/DM	3.210	23.7

Al contrario de lo que sucedió en la búsqueda mono-objetivo del óptimo de la función Diámetro Medio para la tipología 5R (Apartado 9.5.2.), donde se determinó la necesidad para este caso de imponer un segundo criterio de búsqueda, dada la falta de convergencia, al realizar la optimización simultánea de las funciones Coste Económico – Diámetro medio, las soluciones alcanzadas si son convergentes.

De los resultados obtenidos se puede extrapolar que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Diámetro medio’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la ‘constructibilidad, función Diámetro medio’, arrojan costes económicos desfavorables. La obtención de la solución más cercana al óptimo de Pareto, implica sobrecostes económicos del orden del +30.9% para la tipología 2R y de un 2% para la tipología 5R, en relación al óptimo económico absoluto para cada modelo y una reducción del 5% para el tipo 5R y 2R, en relación al óptimo absoluto de la

función Diámetro medio. En las siguientes tablas se muestra la descripción geométrica de los óptimos alcanzados (Coste Económico/DM) y los valores de cada función objetivo asociada.

Tabla 7.33. Optimización multi-objetivo, CE-DM. Resultados.

OPTIMOS	Tipo ZAP	Económico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relación p/A (mm <sup>-1</sup> )	Diámetro Medio (cm)
C. Económico / DM	5R	3.210 €	1.102	149	2	1,27	23,7
C. Económico / DM	2R	2.771 €	1.107	94	2	1,40	23,2

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Económico / DM	5R	7400	2000	1100	0	0	0	0	0	25	500
C. Económico / DM	2R	2300	2900	700	3100	2600	700	1100	600	25	500

#### 7.6.2.2 Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Relación P/A'

Se aplica el algoritmo **MOSA**, para la obtención simultánea del mínimo de la función de coste económico y el mínimo de la función de constructibilidad, 'Relación Perímetro / Área'. Los óptimos alcanzados en cada caso, para los modelos 2R y 5R han sido:

Tabla 7.34. Optimización mono-objetivo. CE-PA.

Modelo	Coste Económico (Euros)	Relación P/A (mm <sup>-1</sup> )
2R. Óptimo Económico	2.117	1.606
2R. Óptimo P/A	5.582	0.672
5R. Óptimo Económico	3.137	1.19
5R. Óptimo P/A	17.792	0.58

En las siguientes figuras se muestra la frontera de Pareto obtenida tras la ejecución de 5.000 experimentos. Sobre ella se grafía el valor de utopía de Pareto, que sería la solución que dispondría de los valores óptimos de ambas funciones obtenidos en la optimización por separado del coste económico y del relación 'Perímetro Área'.

Finalmente, se evalúa que solución de la frontera de Pareto, se sitúa más próxima al punto 'Utopía de Pareto'

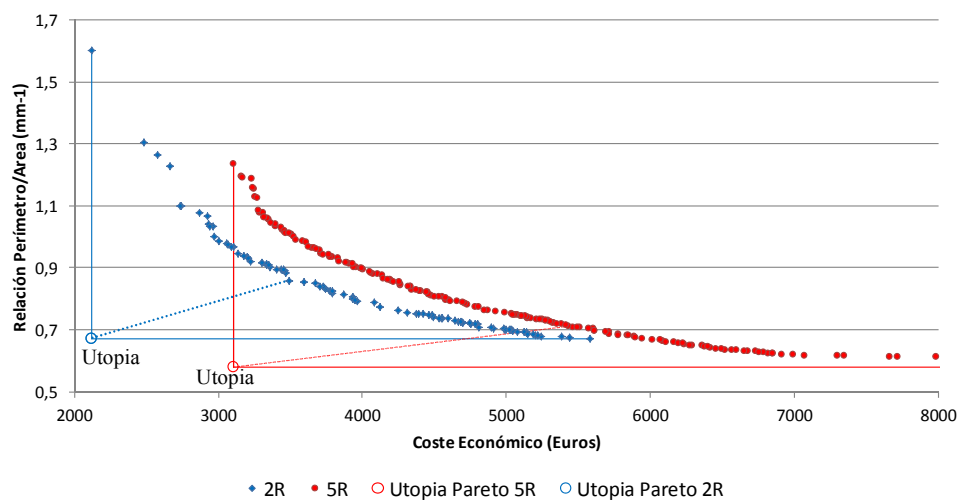


Figura 7.31. MOSA. Frontera de Pareto CE-PA.

En la siguiente tabla se muestra la solución más cercana al valor ‘Utopía de Pareto’ para los índices conjuntos de Coste Económico y Perímetro/Área.

Tabla 7.35. Optimización multi-objetivo. CE-PA. (MOSA).

Modelo	Coste Económico (Euros)	PA (mm <sup>-1</sup> )
2R. Óptimo Económico/PA	3.489	0.859
5R. Óptimo Económico/PA	5.432	0.710

Queda claro que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Relación Perímetro / Área’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la ‘constructibilidad’, arrojan costes económicos elevados.

La obtención del óptimo de Pareto en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +64.8% para la tipología 2R y un +73% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y un aumento del 22% para el tipo 5R y del 27% para el tipo 2R, en relación al óptimo absoluto de la relación Perímetro/Área.

En las siguientes tablas se muestra la descripción geométrica de los óptimos alcanzados (Coste Económico/PA) y los valores de cada función objetivo asociada.



Tabla 7.36. Optimización multi-objetivo. CE-PA. Resultados.

OPTIMOS	Tipo ZAP	Económico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relación p/A (mm <sup>-1</sup> )	Diámetro Medio (cm)
C. Económico / PA	5R	5.432 €	1.288	134	1	0,71	16,0
C. Económico / PA	2R	3.489 €	966	168	4	0,86	16,2

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Económico / PA	5R	7800	4400	1050	0	0	0	0	0	25	500
C. Económico / PA	2R	2200	3900	900	3700	3900	600	3100	450	25	500

### 7.6.2.3 Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Nº Barras'.

Se aplica el algoritmo **MOSA**, para la obtención simultánea del mínimo de la función de coste económico y el mínimo de la función de constructibilidad, 'Número de barras de armado'. Los óptimos alcanzados en cada caso, para los modelos 2R y 5R han sido:

Tabla 7.37. Optimización mono-objetivo. CE-NB.

Modelo	Coste Económico (Euros)	Nº Barras armado
2R. Óptimo Económico	2.178	115
2R. Óptimo Nº Barras	2.533	73
5R. Óptimo Económico	3.137	74
5R. Óptimo Nº Barras	3.367	48

En las siguientes figuras se muestra la frontera de Pareto obtenida tras la ejecución de 5.000 experimentos. Sobre ella se grafía el valor de utopía de Pareto, que sería la solución que dispondría de los valores óptimos de ambas funciones obtenidos en la optimización por separado del coste económico y del número de barras de armado.

Finalmente, se evalúa que solución de la frontera de Pareto, se sitúa más próxima al punto 'Utopía de Pareto'

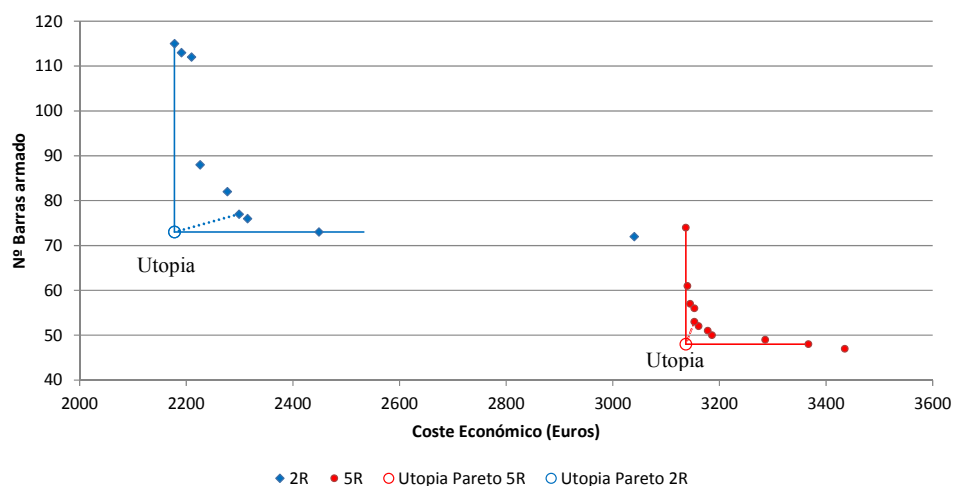


Figura 7.32. MOSA. Frontera de Pareto CE-NB.

En la siguiente tabla se muestra la solución más cercana al valor ‘Utopía de Pareto’ para los índices conjuntos de Coste Económico y Número de barras.

Tabla 7.38. Optimización multi-objetivo. CE-NºBarras. (MOSA).

Modelo	Coste Económico (Euros)	Número de Barras
2R. Óptimo Económico/NºB	2.299	77
5R. Óptimo Económico/NºB	3.153	53

Queda claro que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Número de barras de armado’ muy desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad arrojan costes económicos desproporcionados.

La obtención del óptimo de Pareto en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +5.5% para la tipología 2R y un +1% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y un aumento del 10% para el tipo 5R y del 5% para el tipo 2R, en relación al óptimo absoluto de la función número de barras.

En las siguientes tablas se muestra la descripción geométrica de los óptimos alcanzados (Coste Económico/NºB) y los valores de cada función objetivo asociada.

Tabla 7.39. Optimización multi-objetivo. CE-NºBarras. Resultados.

OPTIMOS	Tipo ZAP	Económico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relación p/A (mm <sup>-1</sup> )	Diámetro Medio (cm)
C. Económico / NB	5R	3.153 €	856	53	2	1,19	21,8
C. Económico / NB	2R	2.299 €	682	77	4	1,61	20,8

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Económico / NB	5R	7000	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500
C. Económico / NB	2R	1800	3500	750	2700	3000	600	700	600	30	500

#### 7.6.2.4 Coste Económico frente a $F^{on}$ Constructibilidad 'Nº tipo de barras'

Se aplica el algoritmo **MOSA**, para la obtención simultánea del mínimo de la función de coste económico y el mínimo de la función de constructibilidad, 'Número de tipos de barras de armado'.

Los óptimos alcanzados en cada caso, para los modelos 2R y 5R han sido:

Tabla 7.40. Optimización mono-objetivo. CE-NºTipoBarra.

Modelo	Coste Económico (Euros)	Nº Tipo Barra
2R. Óptimo Económico	2.178	2
2R. Óptimo Nº Tipo Barra	4.662	1
5R. Óptimo Económico	3.137	2
5R. Óptimo Nº Tipo Barra	9.201	1

En las siguientes figuras se muestra la frontera de Pareto obtenida tras la ejecución de 5.000 experimentos.

Sobre ella se grafía el valor de utopía de Pareto, que sería la solución que dispondría de los valores óptimos de ambas funciones obtenidos en la optimización por separado del coste económico y del número de tipos barras de armado. Finalmente, se evalúa que solución de la frontera de Pareto, se sitúa más próxima al punto 'Utopía de Pareto'

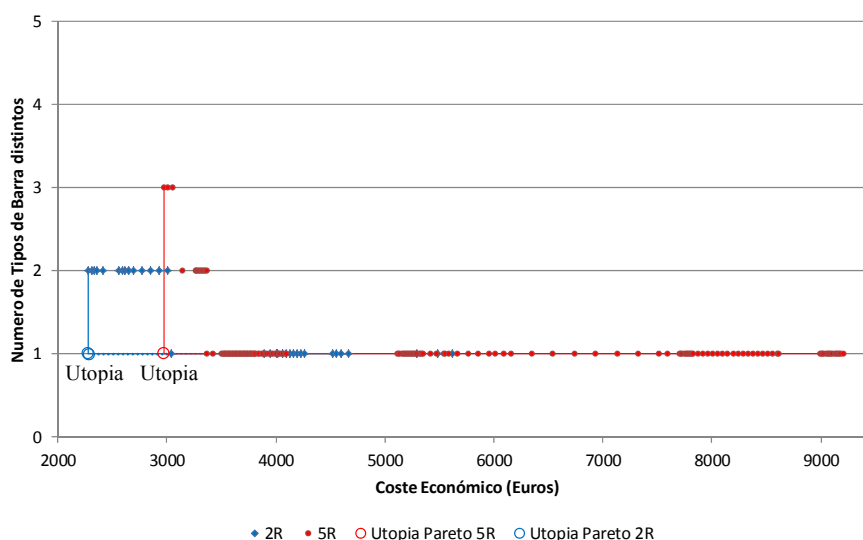


Figura 7.33. MOSA. Frontera de Pareto CE-NºTB.

En la siguiente tabla se muestra la solución más cercana al valor ‘Utopía de Pareto’ para los índices conjuntos de Coste Económico y Número de tipos de barras.

Tabla 7.41. Optimización multi-objetivo. CE-DM. (MOSA).

Modelo	Coste Económico (Euros)	Nº Tipo Barra
2R. Óptimo Económico/NºTBarra	3.042	1
5R. Óptimo Económico/ NºTBarra	3.366	1

Queda claro que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Número de tipos de barra’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad, arrojan costes económicos más elevados.

La obtención del óptimo de Pareto en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +33.2% para la tipología 2R y de un +7.3% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto, manteniéndose el valor de la función número de tipos de barras, con el mismo valor alcanzado en la optimización individual de esta función.

En las siguientes tablas se muestra la descripción geométrica de los óptimos alcanzados (Coste Económico/NºB) y los valores de cada función objetivo asociada.

Tabla 7.42. Optimización multi-objetivo. CE-NºTiposBarras. Resultados.

OPTIMOS	Tipo ZAP	Económico (Euros)	Peso Armadura (kg)	Nº Barras	N Tipo Barras	Relación p/A (mm <sup>-1</sup> )	Diámetro Medio (cm)
C. Económico / NTB	5R	3.366 €	970	72	1	1,18	20,0
C. Económico / NTB	2R	3.042 €	746	225	1	1,11	11,9

OPTIMOS	Tipo ZAP	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	fck (N/mm <sup>2</sup> )	fyk (N/mm <sup>2</sup> )
C. Económico / NTB	5R	7300	2200	1150	0	0	0	0	0	30	500
C. Económico / NTB	2R	2400	2900	800	2800	3100	1000	2100	550	30	500

#### 7.6.2.5 Análisis de sensibilidad.

Con el objeto de poder estudiar la sensibilidad que presenta las distintas funciones objetivo evaluadas mediante la técnica heurística MOSA, se procederá a la evaluación de sus valores ante distintos incrementos porcentuales de la función coste económico. Para ello, se partirá de los resultados obtenidos para el Óptimo de Coste económico y los valores de sus restantes funciones de constructibilidad, y se aplicará incrementos porcentuales al valor de coste económico. El resto de funciones asociadas se determinará a través de las ecuaciones polinómicas de ajuste obtenidas de las distintas fronteras de Pareto analizadas en los apartados anteriores.

Tabla 7.43. Análisis sensibilidad. Tipo 2R. (MOSA).

Coste Económico (Euros)	%	Nº Barras	%	Relación P/A (mm <sup>-1</sup> )	%	Diámetro Medio (cm)	%	Nº Tipo Barras	%
2117		74		1,606		15,8		4	
2128	0,50%	99	-13%	1,552	-3,4%	15,3	-3%	2	-50%
2149	1,00%	98	-14%	1,537	-4,3%	15,6	-1%	2	-50%
2181	1,50%	95	-17%	1,513	-5,8%	16,2	3%	2	-50%
2225	2,00%	92	-19%	1,483	-7,7%	16,9	7%	2	-50%
2280	2,50%	89	-22%	1,446	-10,0%	17,8	13%	2	-50%
2349	3,00%	85	-25%	1,403	-12,6%	18,8	19%	2	-50%
2431	3,50%	80	-30%	1,354	-15,7%	19,8	25%	2	-50%
2528	4,00%	75	-34%	1,301	-19,0%	20,9	32%	2	-50%
2642	4,50%	70	-39%	1,243	-22,6%	22,0	39%	2	-50%
2774	5,00%	65	-43%	1,183	-26,3%	23,0	46%	2	-50%
2927	5,50%	60	-47%	1,120	-30,3%	23,7	50%	2	-50%
3102	6,00%	54	-53%	1,055	-34,3%	24,0	52%	2	-50%

Como se puede apreciar, incrementos de coste económico del 5%, conllevan asociadas mejoras en las funciones de constructibilidad, reduciendo un 43% el número de barras,

un 26% la relación P/A, un 50% el número de tipos de barra e incrementando un 46% el diámetro medio.

Tabla 7.44. Análisis sensibilidad. Tipo 5R. (MOSA).

Coste Económico (Euros)	%	Nº Barras	%	Relación P/A (mm <sup>-1</sup> )	%	Diámetro Medio (cm)	%	Nº Tipo Barras	%
3137		74		1,194		18,7		3	
3153	0,50%	59	-20%	1,114	-31%	22,4	+42%	2	-50%
3184	1,00%	52	-30%	1,104	-31%	23,3	+47%	2	-50%
3232	1,50%	47	-36%	1,091	-32%	24,6	+56%	2	-50%
3297	2,00%	47	-36%	1,073	-33%	25,0	+58%	2	-50%
3379	2,50%	47	-36%	1,051	-35%	25,0	+58%	1	-75%
3480	3,00%	47	-36%	1,025	-36%	25,0	+58%	1	-75%
3602	3,50%	47	-36%	0,996	-38%	25,0	+58%	1	-75%
3746	4,00%	47	-36%	0,964	-40%	25,0	+58%	1	-75%
3915	4,50%	47	-36%	0,929	-42%	25,0	+58%	1	-75%
4111	5,00%	47	-36%	0,892	-44%	25,0	+58%	1	-75%
4337	5,50%	47	-36%	0,853	-47%	25,0	+58%	1	-75%
4597	6,00%	47	-36%	0,812	-49%	25,0	+58%	1	-75%

De los datos obtenidos se puede deducir que incrementos de coste económico del 5%, conllevan asociadas mejoras en las funciones de constructibilidad, reduciendo un 36% el número de barras, un 44% la relación P/A, un 75% el número de tipos de barra e incrementándose un 58% el diámetro medio.

## **7.7 Análisis y Conclusiones.**

Tras la aplicación del algoritmo de optimización de Simulated Annealing sobre el problema en estudio, se puede extrapolar las siguientes conclusiones sobre los resultados obtenidos:

La primera conclusión aportada es la robustez y precisión del algoritmo empleado (Simulated Annealing, SA), para la consecución de óptimos del problema analizado. Para corroborar la idoneidad y precisión de los resultados, se ha realizado un análisis estadístico de los resultados obtenidos en la optimización mediante su ajuste a distintas funciones de probabilidad, consiguiendo un ajuste estadísticamente significativo ante la función de probabilidad ‘Weibull 3-parámetros’, lo que ha permitido determinar el parámetro umbral de los mismos y compararlo con el valor mínimo obtenido. En todos los casos, se ha confirmado la idoneidad del ajuste a la función, así como que la diferencia entre los óptimos localizados y el valor umbral del ajuste, se sitúa por debajo del 1.0%, confirmando la precisión en la obtención de los óptimos y confirmando la validez de los parámetros de calibración de los algoritmos determinados en el Capítulo 6.

La siguiente conclusión establecida ha sido la imposibilidad de localizar soluciones factibles mediante el modelo de zapata aislada, que confirma la dificultad de este modelo estructural para dar soluciones, no solo ya óptimas, sino factible para este tipo de cimentaciones en medianerías. Los altos valores de excentricidad de la carga, generan tensiones máximas que no permiten validar el estado límite de tensiones en el terreno y generar soluciones que verifiquen todas las restricciones impuestas.

### *7.7.1.1 Funciones de Coste económico.*

Tras la aplicación del algoritmo de optimización SA sobre el ejemplo en estudio, se ha determinado con carácter general, que los modelos de análisis analizados con un modelo elástico, arrojan mejores resultados que sus homólogos con comportamiento de cimiento rígido, a costa de precisar de tiempos de cálculo muy superiores. Estas diferencias son poco relevantes para los modelos de zapata excéntrica con viga riostra y zapata combinada de ancho constante (del orden de un 5%), pero si son más significativos en los modelos de cimiento combinado asimétrico (del orden de un 22%).

Los valores de óptimo absoluto de coste económico, se han obtenido para el modelo de zapata excéntrica con viga riostra (Tipo 2F: 1.968 Euros, Tipo 2R: 2.074 Euros). El resto de modelos presentan en el mejor de los casos, valores en torno a un 30% a 60% superiores.

También se ha verificado que una de las restricciones geométricas incluidas como criterio de diseño habitual, relativa a la limitación en la relación de las dimensiones de las zapatas entre sus lados,  $B/A < 2$ , ha resultado limitativa a la hora de la obtención de los óptimos. En concreto, con la inclusión de la restricción se ha obtenido una solución para el modelo 2F que arroja un óptimo económico de valor 2.070 euros, mientras que

el análisis sin dicha restricción, arroja resultados óptimos con un valor de coste económico de 1.968 euros, es decir, alrededor de un 5% inferior.

En relación con la solución aportada por Calavera [1] y las soluciones obtenidas del software de cálculo estructural Cypecad [5], la solución óptima alcanzada con la aplicación de SA, (Tipo 2F: 1.968 Euros), presenta mejora en un 27.0% con respecto a la solución de Calavera (SolCalav Tipo 2R: 2.696 Euros), y un 26% de mejora con respecto a la solución aportada por Cypecad [5], (SolCype Tipo 2R: 2.682 Euros). Del resto de modelos analizados (zapatas combinadas de ancho constante y asimétricas), los mejores resultados se presentan para el modelo 3F, si bien la configuración 4F obtiene valores muy similares también.

Del análisis de distribución del coste económico realizado, se puede concluir que la relación entre los mismos (coste de excavación, coste del hormigón, coste del acero, coste encofrado y coste del relleno y compactado), permanecen prácticamente constantes sea cual sea el modelo de cimiento analizado o el modelo de análisis realizado (cimiento rígido o modelo elástico). A su vez, el coste más significativo es el relativo al hormigón (de un 50% a un 60%), seguido del armado (de un 20% a un 28%), mientras que la suma del coste de hormigón, más acero, más encofrado aporta entre un 92% a 94% del coste total.

En relación al grado de rigidez de los cimientos obtenidos en la tipología 2F, se comprueba que la solución óptima alcanzada con este modelo, verifica las condiciones de rigidez definidas para los modelos resueltos como cimiento rígido, pese a haberse calculado bajo un modelo elástico de tensiones en el terreno que no incluían estas restricciones

En cuanto a la comparación entre los distintos modelos de cimiento propuestos, con el modelo con el que se alcanza la solución de coste óptimo (Tipo 2F: Zapata excéntrica con viga riostra con modelo elástico de tensiones en el terreno), se pueden indicar las siguientes conclusiones:

- La diferencia fundamental entre los modelos 2F y 2R, radica en la consecución de menores pesos de armadura en el modelo elástico de transmisión de tensiones al terreno, lo que genera ligeras mejoras en coste económico. Ello es debido a los menores esfuerzos obtenidos en el modelo elástico de tensiones, en relación al modelo de cimiento rígido.
- Entre los modelos de zapata excéntrica con viga riostra (2) y zapatas combinadas de ancho constante o asimétricas (3, 4 y 5) las diferencias son mucho más acusadas. En cuanto al peso de la armadura, esta se sitúa siempre cercanas al doble, mientras que en relación al volumen de hormigón, la diferencia se sitúa cercana a un 15% para las tipologías 3F y 4F y un 23% para la tipología 5F, siempre a favor de la tipología 2.
- Comparando el óptimo 2F, con las soluciones aportados por Calavera [1] o la obtenida mediante el uso del software Cypecad [5], la solución óptima presen-



ta disminuciones en el peso de armado del orden al 50%, mientras que en peso de hormigón la mejora se sitúa en el +37%.

Del análisis de resultados óptimos alcanzados para el problema en estudio, se ha podido determinar los siguientes criterios.

- En el modelo 2R, La relación óptima entre lados para la zapata de medianería alcanzada ha sido de 2.18, acercándose a lo reflejado en la publicación ‘Guía de aplicación de la EHE-08 [4], donde se determinaba una relación óptima de valor 2. La cuantía de armado a disponer en dirección perpendicular a la medianería, se corresponde con la cuantía mínima indicada en EHE [2], mientras que en dirección paralela a la medianería esta se sitúa cercana al 1 por mil (0,97 a 1,19 por mil). Para la zapata interior, la relación entre sus lados se acerca a la igualdad (0,87 a 1,11), mientras que las cuantías en ambas direcciones se sitúan entre un 1,70 a 2,40 por mil. Los materiales adoptados en todos los casos fueron HA-30 y B500. El canto ha variado en la zapata medianera de 700 mm y en la interior de 550 a 650 mm, siendo los óptimos alcanzados de 700 y 600 mm respectivamente.
- En el modelo 2F, La relación óptima entre lados para la zapata de medianería alcanzada ha sido de 3.00. La cuantía de armado a disponer en dirección perpendicular a la medianería se corresponde con la cuantía mínima indicada en EHE [2], mientras que en dirección paralela a la medianería esta se sitúa en un 0.9 por mil. Para la zapata interior, la relación entre sus lados se sitúa en un 0.46 si bien se obtienen buenos resultados con valores que varían de un (0,40 a 0,70). La cuantía de armado a disponer en dirección perpendicular a la medianería, se corresponde con la cuantía mínima indicada en EHE [2], mientras que en dirección paralela a la medianería esta se sitúa cercana al 1.94 por mil (1,62 a 2,07 por mil). Los materiales adoptados en todos los casos fueron HA-30 y B500. El canto ha variado en la zapata interior de 700 a 900 mm y en la interior de 450 a 500 mm, siendo los óptimos alcanzados de 750 y 500 mm respectivamente, valores muy similares a los alcanzados con cemento rígido.
- Modelo 5R. En relación a los materiales, todas las soluciones salvo una han determinado como más óptimos un hormigón HA-30 y acero B-500S. En cuanto a la geometría todas las soluciones presentan una relación entre lados con una ligera variación de 0.31 a 0.32 y en relación a las cuantías de armado, el armado inferior dispuesto en dirección x, es siempre a cuantía mínima (0.9 por mil), mientras que inferiormente en dirección y, los valores también se muestran muy constantes, con un valor de 2,86 por mil. La cuantía de armado superior en dirección x se sitúan en valores de un a 2,36 por mil. El canto de todas las soluciones ha sido de valor 1.150 mm.

- Modelo 5F. Los resultados obtenidos son muy similares a los correspondientes al modelo 5R, así en todos los casos las soluciones óptimas se han obtenido para los materiales HA-30 y acero B-500S. La relación entre los lados del cimiento se sitúan en valores entre 0,27 a 0,41, también valores similares a los obtenidos con el modelo rígido. La cuantía inferior en dirección x, se corresponde siempre con la cuantía mínima impuesta (0,9 por mil), y la cuantía inferior en dirección y varía en valores de 2,08 a 2,97 por mil. La cuantía de armado superior en dirección x se sitúan en valores entre un 2,08 a 3,00 por mil. El canto de las soluciones ha sido muy variable, con valores de 750 a 1100 mm, disponiendo el óptimo de un valor de 1.100 mm ligeramente inferior al localizado en el modelo rígido.

#### *7.7.1.2 Funciones objetivo Medioambientales.*

Tal y como ya se demostró en el capítulo anterior, todos los índices evaluados como funciones medioambientales, (Emisiones de CO<sub>2</sub>, Consumo Energía, Consumo de Agua y Peso de la solución), presentaban una relación estadísticamente significativa de dependencia con respecto a la función de coste económico, por lo que todas las conclusiones extraídas para esta última, son aplicables a las funciones medioambientales. La consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, implica la consecución de óptimos también desde el punto de vista medioambiental.

#### *7.7.1.3 Funciones objetivo de 'Constructibilidad'.*

Del análisis de optimización de las funciones objetivo relativas a la 'constructibilidad' de la solución se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La tipología de zapata combinada de ancho constante, con modelo de comportamiento rígido (5R), es la que presenta mejores resultados de los parámetros relativos al número de barras de armado, número de tipos de barras de armado distintas, relación perímetro/área y diámetro medio. Tan solo para la función relativa al peso de la armadura, el modelo óptimo no es el 5R sino el 2F, debido a la influencia relevante del coste de la armadura en las soluciones.
- Respecto a la función objetivo 'Mínimo Peso de armadura', se puede concluir que la búsqueda de óptimos de este parámetro, implican sobrecostes económicos relevantes (+20%), consiguiéndose por el contrario, ligeras mejoras en el peso de armadura (-1.6%). Para la obtención de los óptimos de esta función se fuerza a la disposición de mayores cantos en los cimientos, aumentándose los brazos mecánicos de las secciones y disminuyendo las cuantías de armado necesarias. La optimización económica ya garantiza soluciones cercanas al óptimo de la función 'peso de armado', lo cual se asocia al elevado porcentaje de repercusión del coste de acero sobre el coste total, que como se indicó en apartados anteriores se sitúa en torno al 25%.
- Respecto a la función objetivo 'Número de barras de armado', la optimización de esta función objetivo implica la adopción de modelos de zapata combinada

de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados muy variables (hasta un 20%), situación que no aparece en el caso del modelo 2F. Imponiendo para el modelo 5R, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función número de barras implica ligeros incrementos del coste respecto a la solución óptima (9%), mejorándose en número de barras un 15%. Para el caso de cimiento tipo 2F, la optimización del número de barras si empeora significativamente el óptimo de coste económico (hasta un 100%), mejorando la función número de barras hasta un 230%.

- En cuanto a la función objetivo de ‘Mínimo Número de barras de armado’, se puede concluir que la búsqueda de óptimos de este parámetro, implican sobrecostes económicos muy elevados, debido a que se generan soluciones de zapatas con cantos elevados, para conseguir con ellos secciones más resistentes con cuantías bajas y por tanto con un número de barras bajo.
- En cuanto a la función objetivo ‘Mínimo Número de tipos de barras’, se puede concluir que la búsqueda de óptimos de este parámetro, implica la adopción de modelos de zapata combinada de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados muy variables (hasta un 220% para el tipo 2F y del 136% para el tipo 5R). Imponiendo en los modelos, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función número de tipos de barras implica incrementos del coste respecto a la solución óptima del 150% en 2F y 140% en 2R, mejorándose en el número de tipos de barras un 150% en el tipo 2F y un 200% en el 5R.
- En cuanto a la función objetivo ‘Mínima Relación P/A’, se puede concluir que la búsqueda de óptimos de este parámetro, implica la adopción de modelos de zapata combinada de ancho constante, con el inconveniente de conseguirse múltiples soluciones óptimas con valores de geometría y costes económicos asociados variables (hasta un 204% para el tipo 2F y del 106% para el tipo 5R). Imponiendo en los modelos, como segundo criterio de elección, el coste económico, el óptimo para la función relación P/A implica incrementos del coste respecto a la solución óptima del 150% en 2F y 2.014% en 2R, mejorándose en la relación P/A un 230% en el tipo 2F y un 440% en el 5R.
- En cuanto a la función objetivo de ‘Diámetro medio’, se puede concluir que la búsqueda de óptimos de este parámetro, implican sobrecostes económicos muy elevados, pudiéndose alcanzar valores óptimos del parámetro con una gran variedad de geometrías y cuantías de armado, considerándose por tanto, que no es un parámetro adecuado por sí solo, para evaluar la constructibilidad de una solución.

#### 7.7.1.4 Sensibilidad de las soluciones óptimas.

Del análisis de sensibilidad de las soluciones óptimas económicas alcanzadas, ante la variación de los parámetros, Tensión admisible del terreno, Módulo de balasto y materiales, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Tensión admisible en el terreno. El incremento del parámetro de tensión admisible no implica cambios en relación a la tipología de cimiento óptima alcanzable, que en todos los casos continua siendo la tipología de zapata excéntrica con viga riostra. Este mismo modelo es el que presenta mayor sensibilidad a los cambios en este parámetro, del orden del doble que los sufridos por el resto de modelos de cimiento. En todos los casos, las variaciones tiende a disminuir con el aumento de la tensión admisible, que para los modelos 3, 4 y 5 se sitúan por debajo del 5% para tensiones superiores a  $0.25 \text{ N/mm}^2$
- Módulo de balasto. La variación de valores en el parámetro Modulo de Balasto, no implica cambios en relación a la tipología de cimiento óptima alcanzable.

Para el caso de suelos granulares, el rango de valores del parámetro ‘Módulo de Balasto’, con el que se alcanzan los óptimos económicos, se sitúa en el rango entre  $0.05$  y  $0.2 \text{ N/mm}^3$ , que correspondería según CTE [3] a terrenos de arenas medias o compactas y gravas arenosas compactas. Para valores inferiores a  $0.05 \text{ N/mm}^3$  (Arenas flojas), o mayores a  $0.20 \text{ N/mm}^3$  (Margas arcillosas o rocas), los resultados se alejan de los valores óptimos económicos, especialmente en el caso de rocas. Los modelos 2, 3 y 5 presentan variaciones en torno al 10% para los modelos de cimiento rígido y de un 20% a 30% para los modelos con distribución elástica de tensiones sobre el terreno. Los modelos elásticos de transmisión de tensiones ofrecen en general mejores resultados, con excepción de la tipología 2, que a partir de valores  $K_{30} > 0.3 \text{ N/mm}^3$  presenta mejores resultados para el modelo rígido.

Para el caso de suelos cohesivos, los modelos rígidos prácticamente no se ven afectados por el parámetro ‘Módulo de balasto’, presentando variaciones inferiores al 2%, a excepción del tipo 4R que presenta variaciones algo inferiores al 10%. Comparándose los resultados obtenidos entre suelos cohesivos y suelos granulares, se puede determinar que para el rango de valores del módulo de balasto analizados, los resultados obtenidos mediante suelos cohesivos, son similares a los obtenidos para un suelo granular con un módulo de balasto  $K_{30} = 0.1 \text{ N/mm}^3$ , asimilable a un suelo compuesto por Arenas compactas o gravas arenosas flojas.

- Materiales: En todos los casos la adopción de aceros de armado con mayor límite elástico mejora la función de coste económico. La variación de los materiales de acero y hormigón que constituyen el cimiento, no implica cambios en relación a la tipología de cimiento óptima alcanzable, que en todos los casos continua siendo la tipología de zapata excéntrica con viga riostra. En relación a los hormigones, se obtienen los mejores resultados con hormigones HA-30,

si bien con HA-25 los resultados son cercanos. El uso de hormigones de mayor resistencia, HA-35, si empeora sensiblemente la solución.

#### *7.7.1.5 Resultados optimización multi-objetivo.*

Se incluyen a continuación los resultados obtenidos tras la aplicación de la heurística de Simulated Annealing multi-objetivo (MOSA), en la búsqueda de varios óptimos simultáneos de las funciones objetivo.

- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Diámetro Medio.** De los resultados obtenidos se puede extrapolar que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Diámetro medio’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad ‘Diámetro medio’, arrojan costes económicos desfavorables. Por otro lado, la obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +31% para la tipología 2R y de un 2% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y una reducción del 5% para los tipos 5R y 2R, en relación al óptimo absoluto de la función Diámetro Medio.
- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Relacion P/A.** Del análisis simultáneo Coste Económico/Relación Perímetro Area se confirma que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Relación Perímetro / Área’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad, arrojan costes económicos elevados. La obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +65% para la tipología 2R y un +73% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y un aumento del 22% para el tipo 5R y del 27% para el tipo 2R, en relación al óptimo absoluto de la función Perímetro / Area.
- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Nº Barras.** La consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Número de barras de armado’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad arrojan costes económicos desproporcionados. La obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +6% para la tipología 2R y un +1% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y un aumento del 10% para el tipo 5R y del 5% para el tipo 2R, en relación al óptimo absoluto de la función número de barras de armado.
- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Nº tipos de Barras.** La consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Número de tipos de

barra', desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad arrojan costes económicos desproporcionados. La obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +33.2% para la tipología 2R y de un +7.3% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto, manteniéndose el valor de la función número de tipos de barras, con el mismo valor alcanzado en la optimización individual de esta función.

- En cuanto a la sensibilidad de las funciones objetivo emparejadas, se establecen las siguientes conclusiones:
  - Para las zapatas excéntricas con viga riostra. (Tipo 2). Incrementos de coste económico del 5%, conllevan asociadas mejoras en las funciones de constructibilidad, reduciendo un 43% el número de barras, un 26% la relación P/A, un 50% el número de tipos de barra e incrementándose un 46% el diámetro medio.
  - Para las zapatas combinadas de ancho constante. (Tipo 5). Incrementos de coste económico del 5%, conllevan asociadas mejoras en las funciones de constructibilidad, reduciendo un 36% el número de barras, un 44% la relación P/A, un 75% el número de tipos de barra e incrementándose un 58% el diámetro medio.

## 7.8 Referencias bibliográficas.

- [1]. J. Calavera. (2000). *Cálculo de estructuras de Cimentación. Edición 4.* Instituto Tecnico de Materiales de Construccion.
- [2]. Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Real Decreto 1247/2008
- [3]. Ministerio de la Vivienda, (2006). Real Decreto 314/2006. *Código Técnico de la Edificación, Parte II: Documento Básico: DB SE Seguridad Estructural.* Boletín oficial del estado.
- [4]. Ministerio de Fomento de España. (2014). *Guía de aplicación de la instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. Centro de publicaciones. Secretaría General técnica. Ministerio de Fomento España.
- [5]. Software para arquitectura, Ingeniería y Construcción. CYPE Ingenieros S.A. ©CYPECAD ver 2014.
- [6]. Software Estadístico Minitab 12.2.3. ©2012. Minitab Inc.
- [7]. Software SAFE ver Computers & Structures Inc.

# Capítulo 8

## Estudio de Parametrización.

### 8.1 Introducción.

En este capítulo se desarrollará el estudio paramétrico de cimentaciones de medianería, intentando abarcar un amplio abanico de casos que se pueden dar en la práctica profesional.

Se estudiará el caso de dos soportes, uno de medianería y otro frente a él, realizando un cálculo para la obtención del óptimo económico de las tipologías de cimiento de zapata excéntrica con viga riostra y zapata combinada de ancho constante, ambos con comportamiento rígido, para un amplio rango de valores de los parámetros más significativos. Se han seleccionado estas dos tipologías por ser una de ellas, la que se ha demostrado obtener mejores resultados de la función coste económico.

Los parámetros del problema adoptarán los siguientes valores

Tabla 8.1. Parámetros problema.

Parametric	Valor
<b>Geométricos</b>	
Distancia entre ejes de soportes	$l_1 = 5.000 / 6.000 / 7.000$ mm
Distancia desde eje soporte 1 a borde zapata 1	$e_1 = 200$ mm
Dimensión 'x' del soporte 1	$a_{1p} = 400$ mm
Dimensión 'y' del soporte 1	$b_{1p} = 400$ mm
Dimensión 'x' del soporte 2	$a_{2p} = 400$ mm
Dimensión 'y' del soporte 2	$b_{2p} = 400$ mm
<b>Terreno</b>	
Tipo	Granular

Parametric	Valor
Tensión admisible	$\sigma_{\text{admisible}} = 0.15 / 0.20 / 0.25 \text{ y } 0.30 \text{ N/mm}^2$
Módulo de balasto para placa de 30 x 30 cm	$K_{30} = 0.05 / 0.1 / 0.2 \text{ y } 0.3 \text{ N/mm}^3$
<b>Cargas</b>	
Axil característico actuante en soporte 1	$N_{1\text{cpk}} = 12 / 36 / 60 / 84 / 108 \text{ y } 132 \text{ KN}$
	$N_{1\text{sck}} = 8 / 24 / 40 / 56 / 72 \text{ y } 88 \text{ KN}$
	$M_{1x,k} = 0$
	$V_{1x,k} = 0$
Axil característico actuante en soporte 2	$N_{2\text{cpk}} = 12 / 36 / 60 / 84 / 108 \text{ y } 132 \text{ KN}$
	$N_{2\text{sck}} = 8 / 24 / 40 / 56 / 72 \text{ y } 88 \text{ KN}$
	$M_{2x,k} = 0$
	$V_{2x,k} = 0$

## 8.2 Análisis de resultados.

En el Anexo 2, se han incluido las tablas con los resultados obtenidos en la optimización de la función objetivo ‘coste económico’, para cada uno de los modelos de cálculo estudiados.

Del análisis de resultados se derivan las siguientes conclusiones:

- Como se puede apreciar, la tipología óptima es en todos los casos, la correspondiente a zapata excéntrica con viga riostra y solo en las situaciones de altas cargas actuantes y bajas tensiones en el terreno, donde no es posible localizar soluciones factibles con el modelo 2, el modelo de zapata combinada de ancho constante (tipo 5), aporta resultados factibles.
- Tipología 2, zapata excéntrica con viga riostra:
  - Para el caso de cargas actuantes en el soporte interior de valor  $N_2=2.200 \text{ KN}$ , solo se obtienen soluciones para tensiones de terreno de valor superior o igual a  $0.20 \text{ N/mm}^2$ .
  - Para tensiones de terreno de  $0.15 \text{ N/mm}^2$ , con cargas en el soporte medianero superiores o iguales a  $1.400 \text{ KN}$  no se obtienen soluciones factibles.
  - Para tensiones de terreno de  $0.20 \text{ N/mm}^2$ , con cargas en el soporte medianero superiores o iguales a  $1.800 \text{ KN}$  no se obtienen soluciones factibles.
- Tipología 5, zapata combinada de ancho constante:
  - Para tensiones de terreno de  $0.15 \text{ N/mm}^2$ , con cargas en el soporte medianero superiores o iguales a  $2.200 \text{ KN}$  no se obtienen soluciones factibles.



En relación a los materiales, y confirmando los resultados obtenidos en el Capítulo 6, en el análisis del ejemplo realizado, se confirma la obtención de los mejores resultados con la utilización de aceros de mayor límite elástico (Aceros B-500). En cuanto a los hormigones, el óptimo se localiza en todos los casos con el uso de hormigones HA-30, si bien se obtienen resultados cercanos con hormigones HA-25. El uso de hormigones HA-35 si empeora significativamente los valores de coste económico.

En la siguiente tabla, se incluyen todas las situaciones estudiadas, indicando para cada combinación el modelo con el que se obtienen resultados óptimos desde el punto de vista económico.

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)
			200	600	1.000	1.400	1.800	2.200	
0.15	0.05	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.000	3R	5R	2R	2R	5R	5R
			1.400				5R	5R	
			1.800						
			2.200						
		6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.400		5R	5R	5R	5R	5R
			1.800						
			2.200						
		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.400	5R	5R	5R	5R	5R	5R
			1.800				5R	5R	5R
			2.200						
	0.1	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.000	5R	2R	2R	5R	5R	5R
			1.400						
			1.800						
			2.200						
6.0		200	2R	2R	2R	2R	2R		
		600	2R	2R	2R	2R	2R	5R	
		1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R	
		1.400		5R	5R	5R	5R	5R	
		1.800							
		2.200							

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)		
			200	600	1.000	1.400	1.800	2.200			
0.15		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R			
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R		
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R		
			1.400	5R	5R	5R	5R	5R	5R		
			1.800								
			2.200								
	0.2	5.0	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R		
				600	2R	2R	2R	2R	2R	5R	
				1.000	2R	2R	2R	5R	5R	5R	
				1.400				5R	5R		
				1.800							
				2.200							
		6.0	6.0	6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
					600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
					1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R
					1.400		5R	5R	5R	5R	5R
					1.800						
					2.200						
		7.0	7.0	7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
					600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
					1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R
					1.400		5R	5R	5R	5R	5R
					1.800					5R	
					2.200						
0.3	0.3	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R			
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R		
			1.000	5R	5R	2R	5R	5R	5R		
			1.400				5R	5R			
			1.800								
			2.200								

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)
			200	600	1.000	1.400	1.800	2.200	
0.15	0.3	6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.400			5R	5R	5R	5R
			1.800						
			2.200						
		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	
			600	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	5R
			1.400		5R	5R	5R	5R	5R
			1.800						
			2.200						
0.2	0.05	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	5R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400		5R	5R	2R	5R	5R
			1.800				5R	5R	5R
			2.200						
		6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800		5R	5R	5R	5R	5R
			2.200					5R	5R
		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	5R	5R	5R	2R	2R	2R
			2.200			5R	5R	5R	5R

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)
				200	600	1.000	1.400	1.800	2.200
0.20	0.1	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	5R	2R	5R	5R	5R
			1.800				5R	5R	5R
			2.200						
		6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	5R	5R	5R	5R	5R
			1.800	5R	5R	5R	5R	5R	5R
			2.200					5R	5R
		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	5R	5R	5R	5R	5R
			1.800	5R	5R	5R	5R	5R	5R
			2.200					5R	5R
	0.2	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	2R	5R	5R	5R	5R
			1.800				5R	5R	5R
			2.200						
6.0		200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		1.800		5R	5R	5R	5R	5R	
		2.200					5R	5R	

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	
				200	600	1.000	1.400	1.800	2.200	
0.20	0.2	7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	5R	5R	2R	5R	5R	5R	
			2.200				5R	5R	5R	
	0.3	5.0	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.400	5R	5R	5R	2R	5R	5R
				1.800				5R	5R	5R
				2.200						
		6.0	6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.800		5R	5R	5R	5R	5R
				2.200					5R	5R
		7.0	7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R
				1.800	5R	5R	5R	5R	5R	5R
				2.200				5R	5R	5R
0.05	0.05	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
			1.400		5R	2R	2R	2R	2R	
			1.800				5R	2R	5R	
			2.200					5R	5R	

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	N <sub>1</sub> (KN)	N <sub>2</sub> (KN)	N <sub>2</sub> (KN)	N <sub>2</sub> (KN)	N <sub>2</sub> (KN)	N <sub>2</sub> (KN)	N <sub>2</sub> (KN)	
				200	600	1.000	1.400	1.800	2.200	
0.25	0.05	6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800		5R	5R	2R	2R	2R	2R
			2.200				5R	5R	5R	5R
		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	5R	5R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200		5R	5R	5R	2R	2R	2R
	0.10	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	5R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	5R	5R	5R	2R	5R	5R	5R
			2.200				5R	5R	5R	5R
		6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	5R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200		5R	5R	5R	2R	2R	2R
7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R		
	600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R		
	1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R		
	1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R		
	1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R		
	2.200	5R	2R	2R	2R	2R	2R	2R		

$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	
			200	600	1.000	1.400	1.800	2.200		
0.25	0.2	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200				5R	5R	5R	5R
		6.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200	5R	5R	5R	5R	5R	5R	5R
		7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200	5R	5R	5R	5R	5R	5R	5R
	0.3	5.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200	5R	5R	5R	5R	5R	5R	5R
6.0		200	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		600	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R	2R	
		2.200	5R	5R	5R	5R	5R	5R	5R	



$\sigma_{adm}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$K_{30}$ (N/mm <sup>3</sup> )	L (m)	$N_1$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)	$N_2$ (KN)
			200	600	1.000	1.400	1.800	2.200	
0.25	0.3	7.0	200	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			600	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.000	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.400	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			1.800	2R	2R	2R	2R	2R	2R
			2.200	5R	5R	5R	5R	5R	5R

### 8.3 Referencias bibliográficas.

- [1]. Ministerio de la Vivienda, (2006). Real Decreto 314/2006. *Código Técnico de la Edificación, Parte II: Documento Básico: DB SE Seguridad Estructural*. Boletín oficial del estado.

# Capítulo 9

## Conclusiones y Futuras líneas de investigación.

### 9.1 Conclusiones.

El objetivo principal de este trabajo, ha sido la aplicación de un método heurístico para la obtención de soluciones óptimas al problema estructural consistente en la disposición de un cimiento de hormigón armado a dos soportes enfrentados, cuando uno de ellos se sitúa en una medianería, y por tanto, tiene limitada en esa zona, la disposición del cimiento.

Se resumen a continuación las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo, descritas a lo largo de los capítulos anteriores.

#### 9.1.1 *Estado del arte*

Tras la revisión bibliográfica realizada e incluida en los apartados anteriores, se deduce que la utilización de técnicas de optimización sobre estructuras se ha centrado mayoritariamente en las estructuras metálicas, así como en ciertas tipologías estructurales de hormigón armado. En el ámbito de las cimentaciones, no existen demasiados estudios al respecto, aunque sí se han localizado algunos estudios de optimización mediante el empleo de técnicas heurísticas. En todos los casos, los estudios se centraban en la optimización de cimentaciones mediante pilotes o en cimentaciones a base de zapatas aisladas sometidas a cargas verticales centradas o descentradas. También en todos los casos, los modelos de análisis empleados, siempre consideraban para los cimientos un comportamiento rígido. No se han podido localizar estudios de optimización sobre zapatas combinadas, objeto del presente estudio.

En cuanto a los modelos propuestos para la solución del problema, la bibliografía aporta numerosas alternativas, escogiéndose para el análisis los modelos que se han considerado de uso más común en la práctica.

- Modelo de zapata aislada. (Tipo 1).
- Modelo de zapata excéntrica con viga riostra de ancho constante. (Tipo 2).
- Modelo de zapata combinada de ancho constante. (Tipo 3).
- Modelo de zapata combinada asimétrica. Configuración 1. (Tipo 4).
- Modelo de zapata combinada asimétrica. Configuración 2. (Tipo 4).

En cuanto a los modelos de interacción suelo-cimiento-estructura, la bibliografía también aporta numerosos estudios al respecto, seleccionándose para el análisis el modelo más sencillo entre ellos y más comúnmente usado en la práctica, (Modelo de cimiento rígido) y un segundo modelo más complejo, Modelo elástico simplificado), que supone que el asiento es proporcional a la presión en cualquier punto del cimiento y que permite el análisis de soluciones de cimiento con comportamientos flexibles. En ambos modelos no se considerara la interacción con la estructura.

Los criterios localizados en la bibliografía consultada para la selección de los modelos de cimiento más adecuados en cada caso, así como los criterios para la obtención del diseño óptimo en cada caso han sido:

- **Lahuerta [9]**, 1948, artículo *Dos propuestas sobre la cimentación en medianeras*. En él, se analizan las soluciones mediante zapatas aisladas excéntricas para la cimentación de soportes en medianera, proponiendo como soluciones alternativas para reducir las superficies del cimiento, el disponer el cimiento a más profundidad o como solución más ventajosa la de centrar la carga mediante la generación de un momento flector contrario a la excentricidad geométrica existente. Esta última, es la opción que indica más ventajosa desde el punto de vista económico y constructivamente.
- **Bowles [13]**, 1968, en su libro *Foundation Analysis And Design*, desarrolla una solución mediante la disposición de dos zapatas aisladas unidas mediante una viga. Esta solución se propone cuando la distancia entre soportes es elevada, y una solución mediante zapata combinada daría como resultado momentos elevados, o cuando la posición del centro de gravedad de la sección se sitúa por debajo de 1/3 de la longitud de la zapata. En la resolución de la medianería con zapata aislada, indica que la influencia de la excentricidad del soporte en el área de solución del cimiento es grande, resultando más económico la disposición de zapatas rectangulares, con mayores dimensiones en dirección de la medianería.
- **Calavera [15]**, 1982, en su libro, *Estructuras de cimentación* Edición 4, indica, para la solución de zapatas aisladas:
  - Siempre son más económicas las zapatas cuanto más flexibles (menores cantos).

- Se recomienda el uso de diámetros mínimos de 10 mm para las armaduras con calidad B400 o superior.
- **Calavera et al.** [18], en su publicación, 1992 “**Manual de Ferralla**”, Ed Anifer, En su Capítulo 12 establece unos condicionantes para la racionalización de la ferralla, como única forma de conseguir un armado fácil, económico y seguro. Las recomendaciones incluidas son:
  - Emplear acero del mayor límite elástico posible ya que el límite elástico crece más rápidamente que el coste por kg.
  - Emplear el menor número de barras posible de mayor diámetro lo que favorece que todas las barras estén bien rodeadas de hormigón.
  - Emplear el menor número de diámetros posibles. Esto reduce el almacenamiento, facilita la elaboración y la soldadura, reduce el tipo de separadores a emplear y simplifica el control.
  - Optimizar el armado, basándose en la repetición de pocas formas sencillas.
  - Optimizar es reducir el coste, no el número de kilos.
- **CTE** [17], establece los siguientes criterios de selección para distintos tipos de cimentaciones:

Zapatas aisladas:

- Si es posible, las zapatas de medianería serán de planta rectangular, preferentemente con una mayor dimensión paralela a la medianería.
- Será conveniente en zapatas fuertemente excéntricas, como las de medianería o equina, la disposición de vigas centradoras a otras zapatas para redistribuir cargas y presiones sobre el terreno. Para cumplir este objetivo se pueden disponer otras múltiples posibilidades de diseño como la contribución de forjados, tirantes etc..

Zapatas combinadas:

- Recomendadas para terrenos de pequeña o moderada capacidad portante, soportes muy próximos o cargas elevadas. También recomendable para evitar asientos diferenciales, o para situaciones con fuertes momentos en soportes.
- Establece como forma habitual las zapatas de forma rectangular, aunque puede resultar conveniente en algunos casos forma trapecial.

- El **Ministerio de Fomento** [19], 2014, **Guía de aplicación de la instrucción EHE**. Para zapatas de medianera con viga riostra se indica que una proporción de las dimensiones de la zapata, que facilita un resultado más económico, es la resultante de igualar los vuelos respecto del eje del pilar en las dos direcciones.

$$v = \sqrt{\frac{Area}{2}} \rightarrow B = 2 \cdot A$$

### 9.1.2 Algoritmo de optimización utilizado.

Tras la aplicación del algoritmo de optimización de Simulated Annealing (SA) sobre el problema en estudio, se puede extrapolar las siguientes conclusiones sobre los resultados obtenidos:

#### 9.1.2.1 Calibración del algoritmo.

Para la calibración de los distintos parámetros definatorios del algoritmo de optimización de Simulated Annealing, se ha procedido a realizar números experimentos con distintos valores de dichos parámetros, describiéndose a continuación los valores con los que se han obtenido mejores resultados.

- Número de Variables a modificar. Se adoptará un valor de hasta 4 variables a modificar.
- Ley de evolución de la temperatura. Se adoptará una ley de evolución exponencial, con los siguientes parámetros.

$$T_{k+1} = 0.6^n \cdot T_0$$

Donde  $T_0$  es la temperatura inicial

$N$ , es el número de etapa o escalón.

- Criterio de equilibrio (Longitud de la Cadena de Markov).

Las condiciones para el paso entre escalones serán:

- Que el número máximo de soluciones aceptadas en cada escalón sea superior a un 0.2 % la vecindad.
- El número de intentos realizados en cada escalón sea como máximo 2 veces la vecindad.
- Criterio de congelación. Las condiciones impuestas para la finalización del proceso serán:
  - Ratio de aceptación. El número de intentos validos aceptados en el escalón este por debajo del 1% de los intentos válidos.

- Número máximo de escalones permitidos igual a 90. Criterio para evitar problemas de generación de bucles infinitos.
- Número experimentos.

Se ha obtenido un ajuste estadísticamente significativo de los valores óptimos obtenidos mediante la técnica de SA, con la función de probabilidad Weibull 3 parámetros, determinándose que la realización de 20 experimentos permite obtener un valor umbral estable.

#### *9.1.2.2 Resultados.*

La conclusión obtenida es la robustez y precisión del algoritmo empleado (Simulated Annealing, SA), para la consecución de óptimos del problema analizado. Para corroborar la idoneidad y precisión de los resultados, se ha realizado un análisis estadístico de los resultados obtenidos en la optimización, mediante su ajuste a distintas funciones de probabilidad, consiguiendo un ajuste estadísticamente significativo ante la función de probabilidad ‘Weibull 3-parámetros’, lo que ha permitido determinar el parámetro umbral de los mismos y compararlo con el valor mínimo obtenido.

En todos los casos, se ha confirmado la idoneidad del ajuste a la función, así como que la diferencia entre los óptimos localizados y el valor umbral del ajuste, se sitúa por debajo del 1.0 %, confirmando la precisión en la obtención de los óptimos y confirmando la validez de los parámetros de calibración de los algoritmos determinados en el Capítulo 6.

#### *9.1.3 Ejemplo de aplicación.*

En el Capítulo 6, se ha procedido a la aplicación del método de optimización de Simulated Annealing SA, sobre un ejemplo incluido en el libro ‘Cálculo de estructuras de cimentación’ de Calavera [1]. Las principales conclusiones obtenidas en el análisis, se describen a continuación:

La primera conclusión alcanzada ha sido la imposibilidad de localizar soluciones factibles mediante el modelo de zapata aislada, que confirma la dificultad de este modelo estructural para dar soluciones, no solo óptimas, sino factibles para este tipo de cimentaciones en medianerías. Los altos valores de excentricidad de la carga, generan tensiones máximas que no permiten validar la restricción del estado límite de tensiones en el terreno.

Se muestran a continuación el resto de conclusiones del estudio para cada función objetivo evaluada.

### 9.1.3.1 Función de Coste Económico.

Tras la aplicación del algoritmo de optimización SA sobre el ejemplo en estudio, se ha determinado con carácter general, que los modelos de análisis analizados con un modelo elástico, arrojan mejores resultados que sus homólogos con comportamiento de cimentación rígido, a costa de precisar de tiempos de cálculo muy superiores. Estas diferencias son poco relevantes para los modelos de zapata excéntrica con viga riostra y zapata combinada de ancho constante (del orden de un 5%), pero si son más significativos en los modelos de cimentación combinada asimétrica (del orden de un 22%).

Los valores de **óptimo absoluto de coste económico**, se han obtenido para el modelo de **zapata excéntrica con viga riostra (Tipo 2F: 1.968 Euros, Tipo 2R: 2.074 Euros)**. El resto de modelos presentan en el mejor de los casos, valores en torno a un 30% a 60% superiores.

También se ha verificado que una de las restricciones geométricas incluidas como criterio de diseño habitual, relativa a la limitación en la relación de las dimensiones de las zapatas entre sus lados,  $B/A < 2$ , ha resultado limitativa a la hora de la obtención de los óptimos. En concreto, con la inclusión de la restricción se ha obtenido una solución para el modelo 2F que arroja un óptimo económico de valor 2.070 euros, mientras que el análisis sin dicha restricción, arroja resultados óptimos con un valor de coste económico de 1.968 euros, es decir, alrededor de un 5% inferior.

En relación con la solución aportada por Calavera [1] y las soluciones obtenidas del software de cálculo estructural Cypecad [5], la solución óptima alcanzada con la aplicación de SA, (Tipo 2F: 1.968 Euros), presenta **mejora en un 27.0% con respecto a la solución de Calavera** (SolCalav Tipo 2R: 2.696 Euros), **y un 26% de mejora con respecto a la solución aportada por Cypecad [5]**, (SolCype Tipo 2R: 2.682 Euros). Del resto de modelos analizados (zapatas combinadas de ancho constante y asimétricas), los mejores resultados se presentan para el modelo 3F, si bien la configuración 4F obtiene valores muy similares también.

Del análisis de distribución del coste económico realizado, se puede concluir que la relación entre los mismos (coste de excavación, coste del hormigón, coste del acero, coste encofrado y coste del relleno y compactado), permanecen prácticamente constantes sea cual sea el modelo de cimentación analizado o el modelo de análisis realizado (cimentación rígida o modelo elástico). A su vez, el coste más significativo es el relativo al hormigón (de un 50% a un 60%), seguido del armado (de un 20% a un 28%), mientras que la suma del coste de hormigón, más acero, más encofrado aporta entre un 92% a 94% del coste total.

En relación al grado de rigidez de los cimientos obtenidos en la tipología 2F (calculada mediante un modelo de tensiones sobre el terreno elástico), se comprueba que la solución óptima alcanzada con este modelo, verifica las condiciones de rigidez definidas para los modelos resueltos como cimentación rígida, pese a haberse calculado bajo un modelo elástico de tensiones en el terreno que no incluían estas restricciones.

En cuanto a la comparación entre los distintos modelos de cimiento propuestos, con el modelo con el que se alcanza la solución de coste óptimo, (Tipo 2F: Zapata excéntrica con viga riostra con modelo elástico de tensiones en el terreno), se pueden indicar las siguientes conclusiones:

- La diferencia fundamental entre los modelos 2F y 2R, radica en la consecución de menores pesos de armadura en el modelo elástico de transmisión de tensiones al terreno, lo que genera ligeras mejoras en coste económico. Ello es debido a los menores esfuerzos obtenidos en el modelo elástico de tensiones, en relación al modelo de cimiento rígido.
- Entre los modelos de zapata excéntrica con viga riostra (2) y zapatas combinadas de ancho constante o asimétricas (3, 4 y 5) las diferencias son mucho más acusadas. En cuanto al peso de la armadura, esta se sitúa siempre cercanas al doble, mientras que en relación al volumen de hormigón, la diferencia se sitúa cercana a un 15% para las tipologías 3F y 4F y un 23% para la tipología 5F, siempre a favor de la tipología 2.
- Comparando el óptimo 2F, con las soluciones aportados por Calavera [1] o la obtenida mediante el uso del software Cypecad [5], la solución óptima presenta disminuciones en el peso de armado del orden al 50%, mientras que en peso de hormigón la mejora se sitúa en el +37%.

Del análisis de resultados óptimos alcanzados para el problema en estudio, se ha podido determinar los siguientes criterios.

- Los materiales adoptados en todos los casos fueron, hormigones HA-30 y aceros B500.
- Para los modelos de zapata excéntrica con viga riostra, la cuantía de armado a disponer en dirección perpendicular a la zapata de medianería se corresponde con la cuantía mínima indicada en EHE [2],
- En el modelo 2R, La relación óptima entre lados para la zapata de medianería alcanzada ha sido de 2.18, acercándose a lo reflejado en la publicación ‘Guía de aplicación de la EHE-08 [4], donde se determinaba una relación óptima de valor 2. Para la zapata interior, la relación entre sus lados se acerca a la igualdad (0,98).
- En el modelo 2F, La relación óptima entre lados para la zapata de medianería alcanzada ha sido de 3.00. Para la zapata interior, la relación entre sus lados se sitúa en un valor de 0.46.
- Modelo 5R. La relación entre lados adopta un valor de 0.31 y en relación a las cuantías de armado, el armado inferior dispuesto en dirección x, es siempre a cuantía mínima (0.9 por mil).
- Modelo 5F. Los resultados obtenidos son muy similares a los correspondientes al modelo 5R. La relación entre los lados del cimiento adopta un valor de 0,28. La cuantía inferior en dirección x, se corresponde siempre con la cuantía mínima impuesta (0,9 por mil).



### 9.1.3.2 Optimización Funciones objetivo Medioambientales.

Tal y como ya se demostró en el capítulo anterior, todos los índices evaluados como funciones medioambientales, (Emisiones de CO<sub>2</sub>, Consumo Energía, Consumo de Agua y Peso de la solución), presentaban una relación estadísticamente significativa de dependencia con respecto a la función de coste económico, por lo que todas las conclusiones extraídas para esta última, son aplicables a las funciones medioambientales. La consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, implica la consecución de óptimos también desde el punto de vista medioambiental.

### 9.1.3.3 Optimización Funciones objetivo de 'Constructibilidad'.

Del análisis de optimización de las funciones objetivo relativas a la 'constructibilidad' de la solución se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Desde el punto de vista de la '**constructibilidad**', los mejores resultados de las funciones objetivo 'Mínimo número de barras', 'Mínimo número de tipos de barras de armado', 'Mínima relación Perímetro/área y 'Máximo Diámetro Medio', se observan para la tipología de zapata combinada de ancho constante con comportamiento de cimiento rígido (**Tipo 5R**). Tan solo para la función, 'Mínimo Peso de armadura', se obtienen los valores óptimos para la tipología de zapata excéntrica con viga riostra, (**Tipo 2F**), que como se indicó anteriormente también se corresponde con el modelo óptimo para la función 'Coste económico', y es debido a la relación existente entre el peso del armado y el coste total de la solución, que como se indicó en apartados anteriores se sitúa en torno al 25%.

Destacar que los óptimos de las funciones objetivo, N° Tipo de barras y Diámetro medio se alcanzaban también por el modelo 5F, pero se ha estimado que el incremento de tiempo de cálculo necesario para su evaluación, permite clasificarla como de peor calidad que la solución con el modelo 5R

#### – **Peso de la armadura:**

- Tipología optima 2F. (Zapata excéntrica con viga riostra y modelo elástico de tensiones al terreno).
- Para la tipología 2F.
  - La variación con el óptimo económico alcanza hasta un 20%, consiguiéndose sin embargo muy bajas mejoras en el peso de la armadura (inferiores al 2%).
  - En comparación con las soluciones de óptimo económico, las soluciones en este caso disponen de cantos mayores para los cimientos, buscando mayores resistencias de las secciones a base de incrementar los brazos mecánicos, lo que disminuyen a su vez las cuantías de armado necesarias.
  - Se determina que no es una función objetivo adecuada para la consecución de soluciones de mejor 'constructibilidad', pues-

- to que las mejoras alcanzadas de este parámetro son muy bajas para que su repercusión sea relevante.
- Para la tipología 5R.
    - La solución óptima de este parámetro se sitúa cercana a una solución óptima desde el punto de vista económico, generando sobrecostos del orden de un 4% y mejoras en peso del orden de un 5%.
    - En comparación con las soluciones de óptimo económico, las soluciones en este caso disponen de cantos mayores para los cimientos, buscando mayores resistencias de las secciones a base de incrementar los brazos mecánicos, lo que disminuyen a su vez a su vez las cuantías de armado necesarias.
    - Se determina que no es una función objetivo adecuada para la consecución de soluciones de mejor ‘constructibilidad’, puesto que las mejoras alcanzadas de este parámetro son muy bajas para que su repercusión sea relevante.
  - **Número de barras de armado:**
    - Tipología optima 5R. (Zapata combinada de ancho constante con comportamiento de cimiento rígido).
    - Para las tipologías 5R.
      - La soluciones óptimas alcanzadas presentan, para el mismo valor del número de barras, geometrías muy variadas, lo que obliga a imponer un según criterio de elección que podría ser el de otra función de ‘constructibilidad’ de las analizadas, o la función de coste económico, que es la utilizada en este estudio.
      - La solución óptima de este parámetro se sitúa cercana a una solución óptima desde el punto de vista económico, generando sobrecostos del orden de un 9% y disminuciones en el número de barras del orden de un 15%. Por el contrario empeora los resultados de peso de armadura que se incrementan un 16%, mostrándose claramente como funciones contradictorias.
      - En comparación con las soluciones de óptimo económico, las soluciones en este caso disponen de cantos mayores para los cimientos, buscando mayores resistencias de las secciones a base de incrementar los brazos mecánicos disminuyendo a su vez las cuantías de armado necesarias.
    - Para las tipologías 2F.
      - La solución óptima de este parámetro da como resultados soluciones muy alejadas de las obtenidas en la optimización de coste económico, (se obtiene del orden del doble de coste),

disminuyéndose el número de barras en esa misma proporción.

- En comparación con las soluciones de óptimo económico, las soluciones en este caso disponen de diámetros de armado y cantos mayores para los cimientos, buscando mayores resistencias de las secciones a base de incrementar los brazos mecánicos disminuyendo a su vez las cuantías de armado necesarias y por tanto el número de barras. El sobrecoste alcanzado se motiva por el incremento del canto y de todos los diámetros de armado hasta el máximo valor permitido (25mm), lo que implica sobreamados importantes en aquellas armaduras que normalmente se determinan por cuantías mínimas como serían el armado inferior y de piel de viga riostra o el armado inferior en dirección x del cimiento de medianería. La mejora en número de barras se sitúa en el 200% pero por el contrario se empeora los resultados de peso de armadura que se incrementan un 60%, mostrándose claramente como funciones contradictorias.
- **Número de tipos de barras de armado:**
  - Tipología optima 5R. (Zapata combinada de ancho constante con comportamiento de cimiento rígido).
  - Para las tipologías 5R y 2F.
    - Las soluciones óptimas alcanzadas presentan, para el mismo valor del número de tipos de barras, geometrías muy variadas, lo que obliga a imponer un según criterio de elección que podría ser el de otra función de ‘constructibilidad’ de las analizadas, o la función de coste económico, que es la utilizada en este estudio.
    - Con respecto a los óptimos económicos, la optimización de esta función provoca únicamente la disminución de un tipo de barra de armado, (en el tipo 5R pasa de 2 tipos distintos de barras a 1 y en tipo 2F pasa de 3 tipos distintos de barra a 2), pero provoca incrementos de coste del orden del 150%.
- **Relación Perímetro / Área:**
  - Tipología optima 5R. (Zapata combinada de ancho constante con comportamiento de cimiento rígido).
  - Para las tipologías 5R.
    - La solución óptima de este parámetro provoca solución de coste económico muy elevados (superiores a un 2000% del óptimo), disminuyendo la función P/A hasta un 440%.
    - La solución óptima presente geometrías que presentan valores del área muy superiores a las obtenidas en la optimización del coste, alcanzándose los valores límite establecidos para el

valor de las dimensiones geométricas. La mejora de este parámetro implica por el contrario que se empeora los resultados de peso de armadura que se incrementan muy notablemente, mostrándose claramente como funciones contradictorias. Por todo ello, se considera que este parámetro por sí solo, no es adecuado para la obtención de óptimos desde el punto de vista de la facilidad constructiva.

- Para la tipología 2F.
  - Las soluciones óptimas alcanzadas presentan, para el mismo valor de la función 'relación P/A', geometrías muy variadas, lo que obliga a imponer un según criterio de elección que podría ser el de otra función de 'constructibilidad' de las analizadas, o la función de coste económico, que es la utilizada en este estudio.
  - En comparación con las soluciones de óptimo económico, las soluciones en este caso disponen de relaciones geométricas entre los lados del cimiento más próximas a la unidad (zapata de medianera pasa de  $B/A=3.0$  a  $2.0$  y la zapata interior de  $B/A=0.46$  a  $1.0$ ), así como áreas de cimiento muy superiores (por encima del doble). Además, se incrementa notablemente el ancho de la viga riostra para provocar aumentos de área de la cimentación (pasa de  $B=1.100$  mm a  $B=4.200$  mm). Este aumento del área y volumen del cimiento provoca incrementos de coste de hasta un 150% en comparación con el óptimo económico, mejorándose el parámetro P/A hasta un 230% pero provocando empeoramiento de las funciones de Peso armado (+280%) y número de barras (+134%).
- **Diámetro medio:**
  - Tipología óptima 5R. (Zapata combinada de ancho constante con comportamiento de cimiento rígido).
  - Para las tipologías 5R.
    - Las soluciones óptimas alcanzadas presentan, para el mismo valor de la función 'Diámetro medio', geometrías muy variadas, lo que obliga a imponer un según criterio de elección que podría ser el de otra función de 'constructibilidad' de las analizadas, o la función de coste económico, que es la utilizada en este estudio.
    - La optimización del DM implican sobrecostes de hasta un 140%, consiguiendo mejoras del DM de un -25%, pero empeorando las funciones de peso de armado (+200%) y número de barras (+124%).
    - La geometría de la solución óptima alcanzada, es muy similar a la obtenida en la optimización del coste económico.

- Para las tipologías 2F.
  - La optimización del DM implica sobrecostes de hasta un 600%, consiguiendo mejoras del DM de un -50%, pero empeorando las funciones de peso de armado (+750%) y número de barras (+140%).
  - La geometría de la solución óptima alcanzada destaca por la adopción de un valor para el canto de los cimientos muy elevados, concretamente con el valor máximo permitido para esta variable (2.000 mm).

#### 9.1.3.4 Sensibilidad de las soluciones.

Del análisis de sensibilidad realizado sobre las soluciones óptimas económicas alcanzadas, ante los parámetros de Tensión admisible del terreno, Módulo de balasto y materiales, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Tensión admisible en el terreno. El incremento del parámetro de tensión admisible no implica cambios en relación a la tipología de cimiento óptima alcanzable, que en todos los casos continua siendo la tipología de zapata excéntrica con viga riostra. Este mismo modelo es el que presenta mayor sensibilidad a los cambios en este parámetro, del orden del doble que los sufridos por el resto de modelos de cimiento. En todos los casos, las variaciones tiende a disminuir con el aumento de la tensión admisible, que para los modelos 3, 4 y 5 se sitúan por debajo del 5% para tensiones superiores a  $0.25 \text{ N/mm}^2$
- Módulo de balasto. La variación de valores en el parámetro Módulo de Balasto, no implica cambios en relación a la tipología de cimiento óptima alcanzable.

Para el caso de suelos granulares, el rango de valores del parámetro ‘Módulo de Balasto’, con el que se alcanzan los óptimos económicos, se sitúa en el rango entre  $0.05$  y  $0.2 \text{ N/mm}^3$ , que correspondería según CTE [3] a terrenos de arenas medias o compactas y gravas arenosas compactas. Para valores inferiores a  $0.05 \text{ N/mm}^3$  (Arenas flojas), o mayores a  $0.20 \text{ N/mm}^3$  (Margas arcillosas o rocas), los resultados se alejan de los valores óptimos económicos, especialmente en el caso de rocas. Los modelos 2, 3 y 5 presentan variaciones en torno al 10% para los modelos de cimiento rígido y de un 20% a 30% para los modelos con distribución elástica de tensiones sobre el terreno. Los modelos elásticos de transmisión de tensiones ofrecen en general mejores resultados, con excepción de la tipología 2, que a partir de valores  $K_{30} > 0.3 \text{ N/mm}^3$  presenta mejores resultados para el modelo rígido.

Para el caso de suelos cohesivos, los modelos rígidos prácticamente no se ven afectados por el parámetro ‘Módulo de balasto’, presentando variaciones inferiores al 2%, a excepción del tipo 4R que presenta variaciones algo inferiores al 10%. Comparándose los resultados obtenidos entre suelos cohesivos y suelos granulares, se puede determinar que para el rango de valores del módulo de

balasto analizados, los resultados obtenidos mediante suelos cohesivos, son similares a los obtenidos para un suelo granular con un módulo de balasto  $K_{30} = 0.1 \text{ N/mm}^3$ , asimilable a un suelo compuesto por Arenas compactas o gravas arenosas flojas.

- **Materiales:** En todos los casos la adopción de aceros de armado con mayor límite elástico mejora la función de coste económico. La variación de los materiales de acero y hormigón que constituyen el cimientado, no implica cambios en relación a la tipología de cimientado óptima alcanzable, que en todos los casos continua siendo la tipología de zapata excéntrica con viga riostra. En relación a los hormigones, se obtienen los mejores resultados con hormigones HA-30, si bien con HA-25 los resultados son cercanos. El uso de hormigones de mayor resistencia, HA-35, si empeora sensiblemente la solución.

#### *9.1.3.5 Resultados optimización multi-objetivo.*

Se incluyen a continuación los resultados obtenidos tras la aplicación de la heurística de Simulated Annealing multi-objetivo (MOSA), en la búsqueda de varios óptimos simultáneos de las funciones objetivo. El análisis ha consistido en la optimización simultánea por parejas de las siguientes funciones objetivo:

- Coste Económico.
- Número de Barras de Armado.
- Número de tipos de barra de armado.
- Relación perímetro / Área.
- Diámetro Medio.

Se ha podido verificar que la optimización de la función de coste económico presenta tendencias opuestas a la optimización de cualquiera de las otras funciones objetivo de constructibilidad.

- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Diámetro Medio.** De los resultados obtenidos se puede extrapolar que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Diámetro medio’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad ‘Diámetro medio’, arrojan costes económicos desfavorables. Por otro lado, la obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +31% para la tipología 2R y de un 2% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y una reducción del 5% para los tipos 5R y 2R, en relación al óptimo absoluto de la función Diámetro Medio.
- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Relación P/A.** Del análisis simultáneo Coste Económico/Relación Perímetro Área se confirma que la consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como

resultado valores de constructibilidad de la función ‘Relación Perímetro / Área’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad, arrojan costes económicos elevados. La obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +65% para la tipología 2R y un +73% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y un aumento del 22% para el tipo 5R y del 27% para el tipo 2R, en relación al óptimo absoluto de la función Perímetro / Área.

- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Nº Barras.** La consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Número de barras de armado’ desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad arrojan costes económicos desproporcionados. La obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +6% para la tipología 2R y un +1% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto y un aumento del 10% para el tipo 5R y del 5% para el tipo 2R, en relación al óptimo absoluto de la función número de barras de armado.
- **Búsqueda simultánea óptimos Coste Económico-Nº tipos de Barras.** La consecución de soluciones óptimas desde el punto de vista económico, dan como resultado valores de constructibilidad de la función ‘Número de tipos de barra’, desfavorables y al contrario, soluciones óptimas desde el punto de vista de la constructibilidad arrojan costes económicos desproporcionados. La obtención del óptimo de Pareto, en la optimización simultánea, implica sobrecostes económicos del orden del +33.2% para la tipología 2R y de un +7.3% para la tipología 5R, con relación al óptimo económico absoluto, manteniéndose el valor de la función número de tipos de barras, con el mismo valor alcanzado en la optimización individual de esta función.
- En cuanto a la sensibilidad de las funciones objetivo emparejadas, se establecen las siguientes conclusiones:
  - Para las zapatas excéntricas con viga riostra. (Tipo 2). Incrementos de coste económico del 5%, conllevan asociadas mejoras en las funciones de constructibilidad, reduciendo un 43% el número de barras, un 26% la relación P/A, un 50% el número de tipos de barra e incrementándose un 46% el diámetro medio.
  - Para las zapatas combinadas de ancho constante. (Tipo 5). Incrementos de coste económico del 5%, conllevan asociadas mejoras en las funciones de constructibilidad, reduciendo un 36% el número de barras, un 44% la relación P/A, un 75% el número de tipos de barra e incrementándose un 58% el diámetro medio.

#### **9.1.4 Estudio de parametrización.**

Del estudio de parametrización realizado se derivan las siguientes conclusiones:

- La tipología óptima es en todos los casos, la correspondiente a zapata excéntrica con viga riostra y solo en la situaciones de altas cargas actuantes y bajas tensiones en el terreno, donde no es posible localizar soluciones factibles con el modelo 2, el modelo de zapata combinada de ancho constante (tipo 5), aporta resultados factibles.
- Tipología 2, zapata excéntrica con viga riostra:
  - Para el caso de cargas actuantes en el soporte interior de valor  $N_2=2.200$  KN, solo se obtienen soluciones para tensiones de terreno de valor superior o igual a  $0.20$  N/mm<sup>2</sup>.
  - Para tensiones de terreno de  $0.15$  N/mm<sup>2</sup>, con cargas en el soporte medianero superiores o iguales a  $1.400$  KN no se obtienen soluciones factibles.
  - Para tensiones de terreno de  $0.20$  N/mm<sup>2</sup>, con cargas en el soporte medianero superiores o iguales a  $1.800$  KN no se obtienen soluciones factibles.
- Tipología 5, zapata combinada de ancho constante:
  - Para tensiones de terreno de  $0.15$  N/mm<sup>2</sup>, con cargas en el soporte medianero superiores o iguales a  $2.200$  KN no se obtienen soluciones factibles.

En relación a los materiales, y confirmando los resultados obtenidos en el Capítulo 6, en el análisis del ejemplo realizado, se confirma la obtención de los mejores resultados con la utilización de aceros de mayor límite elástico (Aceros B-500). En cuanto a los hormigones, el óptimo se localiza en todos los casos con el uso de hormigones HA-30, si bien se obtienen resultados cercanos con hormigones HA-25. El uso de hormigones HA-35 si empeora significativamente los valores de coste económico.

## **9.2 Futuras líneas de investigación.**

Se incluyen en este apartado las posibles líneas futuras de investigación del problema en estudio:

- A. Estudio de restricciones normativas y constructivas adicionales.

Consistente en el estudio de la aplicación de otras normativas internacionales de referencia, (Eurocódigos, normas ACI, etc..), sobre el problema de cimentación analizado, de forma que se puedan evaluar las soluciones obtenidas a partir de distintos criterios normativos y analizar sus diferencias.

- B. Modelo estructural. Incluir el análisis de otros modelos estructurales como pueden ser los de zapata excéntrica con reacción en la estructura del piso supe-



rior, zapata excéntrica y reacción mediante un tirante a nivel de cara superior de zapata o modelos que introduzcan el efecto de la rigidez de la estructura.

- C. Modelo de análisis. Incluir el análisis de los modelos estructurales mediante elementos finitos, para evaluar la diferencia de sus resultados con los ya analizados de cimiento rígido.
- D. Interacción suelo-cimiento-estructura. En la presente tesis se ha incluido un modelo de interacción suelo-cimiento, estableciéndose como una futura vía de investigación, la de incluir en el modelo, la interacción de la estructura, de forma que se puede evaluar la posible relevancia de la rigidez de la estructura en los resultados obtenidos.
- E. Aplicación de otros algoritmos de optimización.

El presente estudio ha contemplado la utilización de la técnica de optimización Metaheurística “Simulated Annealing”, existiendo sin embargo otro tipo de técnicas metaheurísticas cuya aplicación permitirá estudiar la validez de las mismas mediante el análisis de todas las soluciones obtenidas.

- F. Mejora en los patrones de armado.

Evaluar la posible repercusión de mejoras en los patrones de armado especificados en el presente informe, como pueden ser:

- Modelo Tipo 2 “Zapata de medianería con viga Riostra”. Disposición del armado superior de viga riostra en varias tandas de armados.
- Modelo Tipo 5 “Zapata combinada de ancho constante”. Disposición del armado superior longitudinal en varias tandas de armados.
- Modelo Tipo 5 “Zapata combinada de ancho constante”. Disposición del armado inferior longitudinal en varias tandas de armados.
- Modelos Tipo 3 y 4 “Zapata combinada asimétricas”. Disposición del armado superior longitudinal en varias tandas de armados.

- G. Parametrización: La tesis ha incluido un estudio de parametrización, que permite conocer para un conjunto amplio de valores de las principales variables del problema, cuales son las soluciones óptimas desde el punto de vista económico. Una futura línea de investigación podría aplicar, sobre los resultados obtenidos, técnicas de Genetic Programming o redes neuronales, con el objeto de obtener ecuaciones paramétricas que simplificarían el uso de los resultados obtenidos y facilitarían su inclusión en software de cálculo estructural.
- H. Parametrización: Otra posible línea de investigación podría desarrollar nuevos estudios de parametrización del resto de funciones objetivo incluidas en el estudio, relativas a la ‘constructibilidad’.

### **9.3 Referencias bibliográficas.**

- [1]. J. Calavera. (2000). *Cálculo de estructuras de Cimentación. Edición 4*. Instituto Técnico de Materiales de Construcción.
- [2]. Software para arquitectura, Ingeniería y Construcción. CYPE Ingenieros S.A. ©CYPECAD ver 2014.
- [3]. Ministerio de Fomento. (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)*. Real Decreto 1247/2008
- [4]. Ministerio de Fomento de España. (2014). *Guía de aplicación de la instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. Centro de publicaciones. Secretaría General técnica. Ministerio de Fomento España.

## **ANEXO I: DESCRIPCION SOLUCIONES ÓPTIMAS**

Se incluyen a continuación de forma gráfica, sobre el patrón de armado previsto para cada uno de los modelos estructurales, la definición completa de los óptimos económicos alcanzados en el Capítulo 7, para cada uno de los modelos de cimiento analizados.

<b>SOLUCION LIBRO J. CALAVERA PARA ZAPATA TIPO 2. ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria

	Dimensiones (mm)		
	A	B	H
Zapata 1	2.250	3.000	950
Zapata 2	3.000	3.000	950
Viga Riostr		500	900

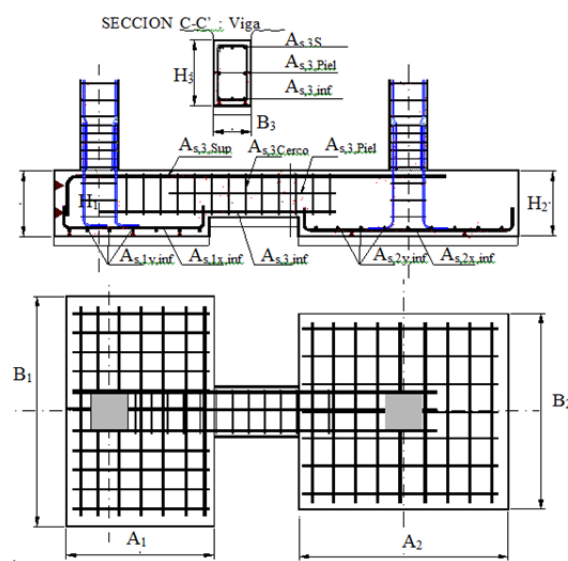
Materiales

Hormigon	HA-25
Acero	B-400 S

Cargas

N1cp	860000 kN
N1sc	420000 kN
N2cp	1600000 kN
N2sc	1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	n $\phi$ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1,xinf	19 $\phi$ 10	2110	PR	PR
As1,yinf	13 $\phi$ 16	2860	PR	PR
As2,xinf	13 $\phi$ 20	2900	PR	PR
As2,yinf	13 $\phi$ 20	2900	PR	PR

Ref(1)	n $\phi$ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As3,xsup	4 $\phi$ 25	6500	PV	PR
As3,xsup2	5 $\phi$ 25	4765		
As3,xpiel	2 $\phi$ 20	3350	PR	PR
As3,yinf	2 $\phi$ 25	5150	PR	PR
As3,cerco	2x22 $\phi$ 10	2600		

(1) Referencia de disposición de armado, según patron adoptado

(2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas

(3) Longitud en mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>2.695 €</b>
Nº Barras de armad	83
Nº Barras a armado long.	67
Nº Tipo de Barras	4

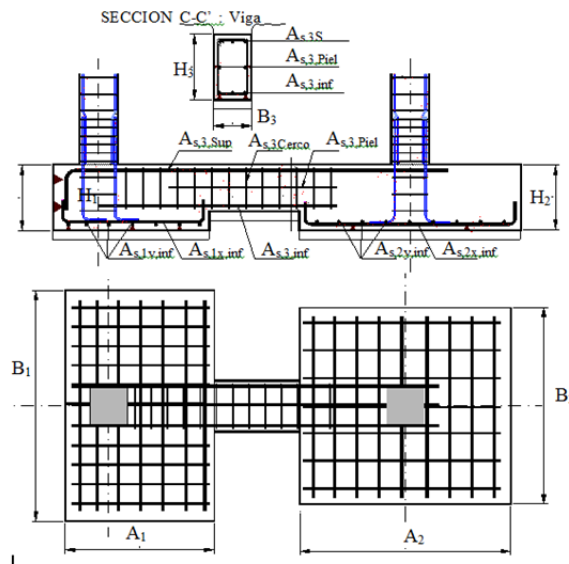
Relacion Perimetro/Area	1,52
Diametro medio (cm)	17,9
Peso Armado Long (kg)	520
Peso Armado Total (kg)	558
Uniformidad de Armado (%)	57

<b>SOLUCION CYPE 1 PARA ZAPATA TIPO 2. ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
--	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	1.850	3.600	1.000	Hormigon HA-25	N1cp 860000 kN
Zapata 2	3.000	3.000	1.000	Acero B-400 S	N1sc 420000 kN
Viga Riostr	400	1.000			N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nφ(2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)	Ref(1)	nφ(2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)		
As1,xinf	17	∅ 16	1940	PV(16)	PV(16)	As3,xsup	8	∅ 25	7780	PV(59)	PR
As1,yinf	7	∅ 25	3500	PR	PR	As3,xsup2	0	∅ 0	0		
As2,xinf	12	∅ 20	2900	PR	PR	As3,xpiel	4	∅ 12	6610	PR	PR
As2,yinf	12	∅ 20	2900	PR	PR	As3,yinf	8	∅ 25	7280	PV(39)	PR
					As3,cerro	2x16	∅ 8	2610			

(1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado

(2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas

(3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

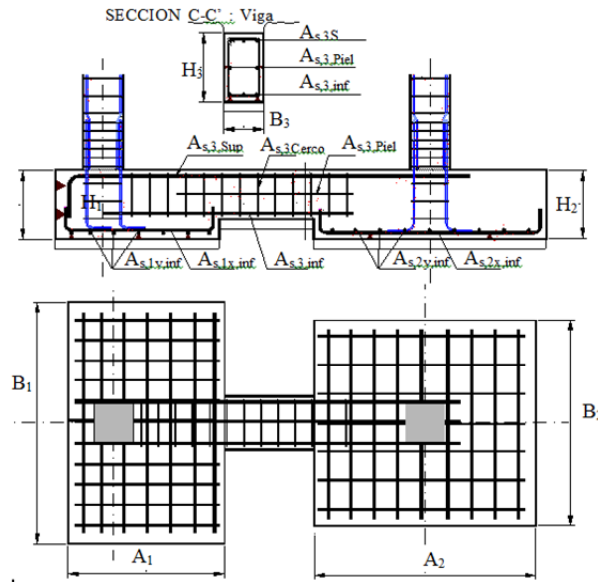
Coste Economico (Euros)	<b>3.103 €</b>	Relacion Perimetro/Area	1,67
Nº Barras de armad	98	Diametro medio (cm)	19,39
Nº Barras a armado long.	82	Peso Armado Long (kg)	859
Nº Tipo de Barras	4	Peso Armado Total (kg)	876
		Uniformidad de Armado (%)	57

<b>SOLUCION CYPE 2 PARA ZAPATA TIPO 2. ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
--	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	1.800	3.600	900	Hormigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2	3.000	3.000	900	Acero B-500 S	N1sc 420000 kN
Viga Riostr		400	900		N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nø (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1,x,inf	14 Ø 16	1940	PV(16)	PV(16)
As1,y,inf	6 Ø 25	3340	PR	PR
As2,x,inf	17 Ø 16	2840	PR	PR
As2,y,inf	17 Ø 16	2840	PR	PR

Ref(1)	nø (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As3,xsup	8 Ø 25	7920	PV(66)	PR
As3,xsup2	0 Ø 0	0		
As3,xpiel	4 Ø 12	6720	PR	PR
As3,x,inf	3 Ø 12	6570	PV(13)	PR
As3,cercos	2x16 Ø 8	2410		

- (1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado
- (2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas
- (3) Longitud en mm del armado incluyendo dimensiones de patillas
- (4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>2.717 €</b>
Nº Barras de armado	58
Nº Barras a rma do long.	69
Nº Tipo de Barras	4

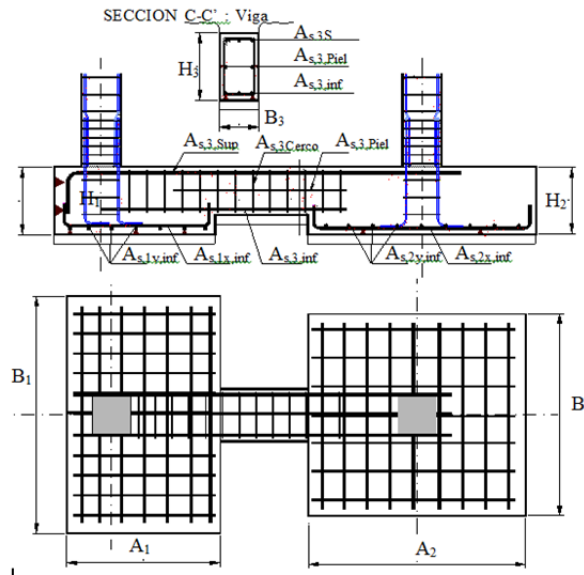
Relacion Perimetro/Area	1,67
Diametro medio (cm)	19,0
Peso Armado Long (kg)	611
Peso Armado Total (kg)	627
Uniformidad de Armado (%)	57

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 2 RIGIDA . ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	1.700	3.700	700	Hormigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2	3.000	2.700	600	Acero B-500 S	N1sc 420000 kN
Viga Riostr		700	600		N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	n	∅ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1,xinf	21	∅ 12	1560	PR	PR
As1,yinf	15	∅ 16	3320	PR	PR
As2,xinf	18	∅ 16	2180	PR	PR
As2,yinf	16	∅ 16	2450	PR	PR
As3,xsup	16	∅ 20	6200	PV	PR
As3,xsup2	0	∅ 0	0		
As3,xpiel	0	∅ 0	0		
As3x,inf	4	∅ 12	4780	PR	PR
As3,cerco	3x20	∅ 6	3150		

(1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado

(2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas

(3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PV(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PV(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>2.074 €</b>
Nº Barras de armad	130
Nº Barras armado long.	90
Nº Tipo de Barras	4

Relacion Perimetro/Area	1,62
Diametro medio (cm)	14,5
Peso Armado Long (kg)	511
Peso Armado Total (kg)	<b>497</b>
Uniformidad de Armado (%)	58

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 2 MOD ELASTICO . ZAPATA EXCENTRICA CON VIGA RIOSTRA.</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

**Parametros iniciales.**

**Geometria**

	Dimensiones (mm)		
	A	B	H
Zapata 1	1.500	4.500	700
Zapata 2	4.100	1.900	500
Viga Riostr		1.100	550

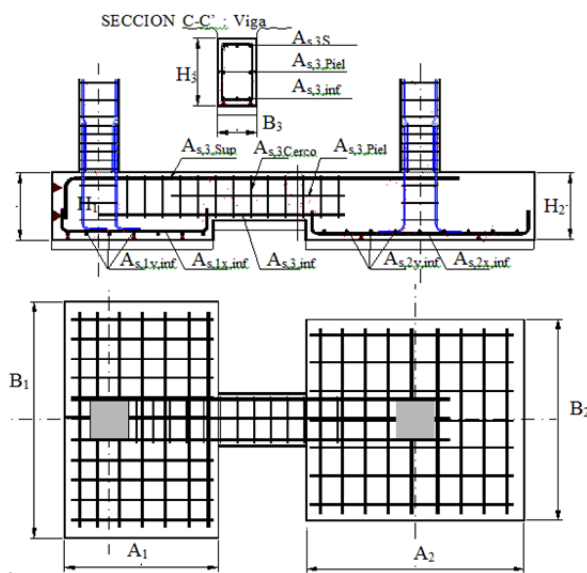
**Materiales**

Hormigon	HA-30
Aceero	B-500 S

**Cargas**

N1cp	860000 kN
N1sc	420000 kN
N2cp	1600000 kN
N2sc	1400000 kN

**Patron de armado**



**Solucion de armado:**

Ref(1)	nØ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1,inf	27 Ø 12	1360	PR	PR
As1x,inf	10 Ø 20	4150	PR	PR
As2,inf	8 Ø 12	3930	PR	PR
As2,inf	17 Ø 12	1760	PR	PR

Ref(1)	nØ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As3,xsup	37 Ø 12	5980	PN	PR
As3,xsup2	0 Ø 0	0		
As3,xpiel	0 Ø 0	0		
As3x,inf	5 Ø 12	4180	PR	PR
As3,cercos	3x18 Ø 6	3725		

- (1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado
- (2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas
- (3) Longitud en mm del armado incluyendo dimensiones de patillas
- (4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

**Funciones objetivo:**

Coste Economico (Euros)	<b>1.968 €</b>
Nº Barras de armad	140
Nº Barras armado long.	104
Nº Tipo de Barras	3

Relacion Perimetro/Area	1,55
Diametro medio (cm)	11,7
Peso Armado Long (kg)	419
Peso Armado Total (kg)	404
Uniformidad de Armado (%)	72

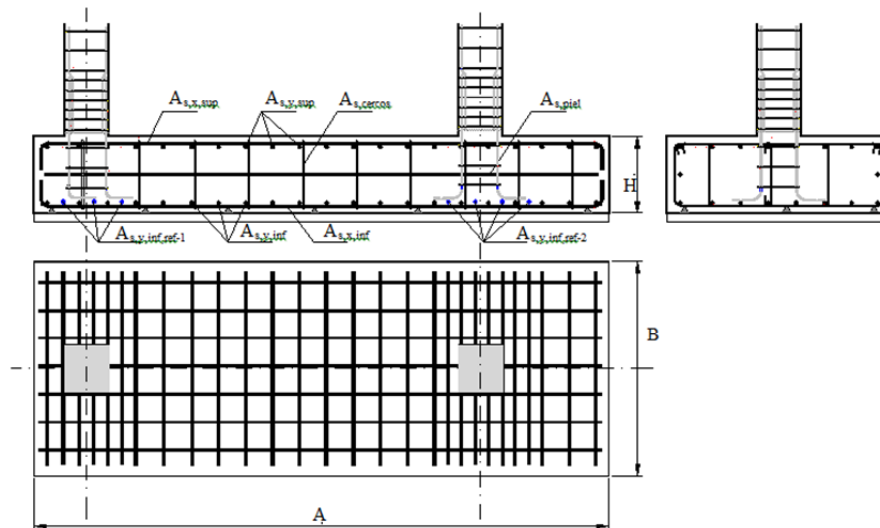


<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 5 RIGIDA . ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CONSTANTE</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	7.000	2.200	1.150	Hormigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2				Aceero B-500 S	N1sc 420000 kN
Viga Riostr					N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nØ (2)	Long(mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As <sub>x,inf</sub>	12 Ø 16	6860	PR	PR
As <sub>y,inf</sub>	37 Ø 16	2100	PR	PR
As <sub>y,inf,ref-1</sub>				
As <sub>y,inf,ref-2</sub>				

Ref(1)	nØ (2)	Long(mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As <sub>x,sup</sub>	13 Ø 25	6940	PV	PR
As <sub>y,sup</sub>				
As <sub>piel</sub>	12 Ø 16	6860	PR	PR
As <sub>3,cerco</sub>				

(1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado

(2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas

(3) Longitud en mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PV(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>3.137 €</b>	Relacion Perimetro/Area	1,19
Nº Barras de armad	74	Diametro medio (cm)	18,7
Nº Barras armado long.	74	Peso Armado Long (kg)	841
Nº Tipo de Barras	2	Peso Armado Total (kg)	841
		Uniformidad de Armado (%)	86

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 5 MOD ELASTICO . ZAPATA COMBINADA DE ANCHO CONSTANTE</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria

	Dimensiones (mm)		
	A	B	H
Zapata 1	7.400	2.100	1.100
Zapata 2			
Viga Riostr			

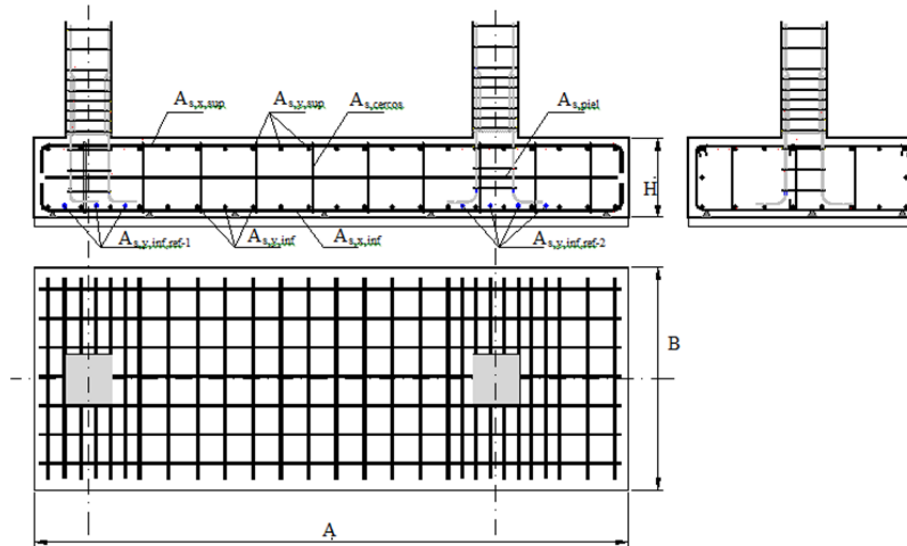
Materiales

Hormigon	HA-30
Acero	B-500 S

Cargas

N1cp	860000 kN
N1sc	420000 kN
N2cp	1600000 kN
N2sc	1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	n $\phi$ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
Asx,inf	19 $\phi$ 12	7260	PR	PR
Asy,inf	65 $\phi$ 12	2000	PR	PR
Asy,inf,ref-1				
Asy,inf,ref-2				

Ref(1)	n $\phi$ (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
Asx,sup	17 $\phi$ 20	7340	PV	PR
Asy,sup				
Aspiel	20 $\phi$ 12	7260	PR	PR
As3,cercos				

(1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado

(2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas

(3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>2.982 €</b>
Nº Barras de armad	121
Nº Barras armado long.	121
Nº Tipo de Barras	2

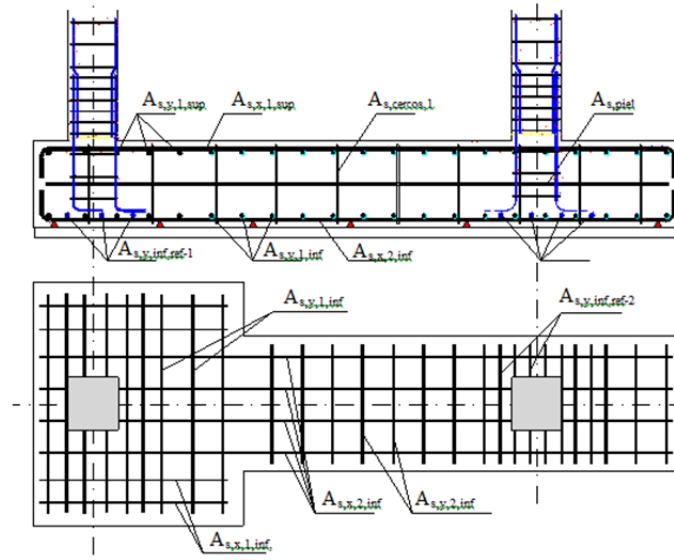
Relacion Perimetro/Area	1,22
Diametro medio (cm)	14,0
Peso Armado Long (kg)	753
Peso Armado Total (kg)	753
Uniformidad de Armado (%)	86

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 3 RIGIDA . ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

**Parametros iniciales.**

	Geometria			Materiales		Cargas	
	Dimensiones (mm)			Hormigon	Acero		
	A	B	H	HA-30	B-500 S	N1cp	860000 kN
Zapata 1	1.100	3.300	1.150			N1sc	420000 kN
Zapata 2	5.900	1.900	1.150			N2cp	1600000 kN
						N2sc	1400000 kN

**Patron de armado**



**Solucion de armado:**

Ref(1)	n	Ø (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1x,xinf	10	Ø 16	6860	PR	PR
As1y,inf	6	Ø 16	3160	PR	PR
As2x,xinf	8	Ø 16	960	PR	PR
As2y,inf	31	Ø 16	1760	PR	PR

Ref(1)	n	Ø (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
Asx1,sup	12	Ø 25	6810	PR	PR
Asx2,sup	8	Ø 10	960	PR	PR
Aspiel1	18	Ø 16	960	PR	PR
Aspiel2	18	Ø 12	6860	PR	PR
As3,cercos					

- (1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado
- (2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas
- (3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas
- (4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

**Funciones objetivo:**

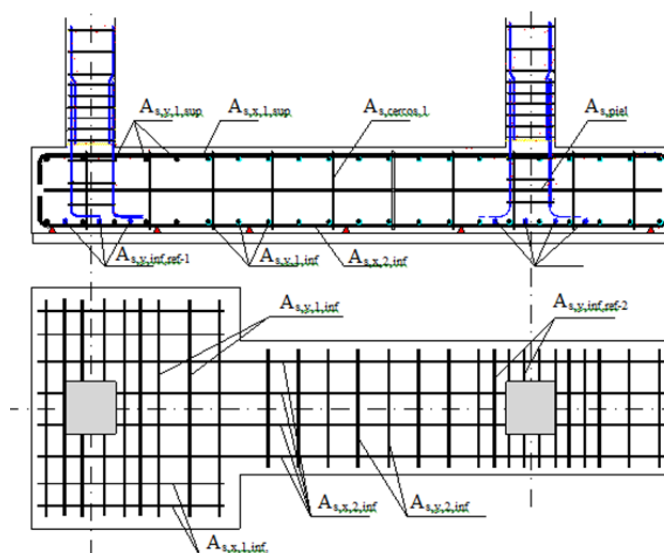
Coste Economico (Euros)	<b>3.191 €</b>	Relacion Perimetro/Area	1,38
Nº Barras de armad	111	Diametro medio (cm)	18,9
Nº Barras armado long.	111	Peso Armado Long (kg)	803
Nº Tipo de Barras	3	Peso Armado Total (kg)	803
		Uniformidad de Armado (%)	72

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 3 MOD ELASTICO . ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	5.400	2.400	750	Hormigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2	2.700	1.600	750	Acero B-500 S	N1sc 420000 kN
					N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nø (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1x,xinf	10 ø 12	7960	PR	PR
As1y,yinf	19 ø 16	2260	PR	PR
As2x,xinf	5 ø 12	5260	PR	PR
As2y,yinf	17 ø 12	1460	PR	PR

Ref(1)	nø (2)	Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
Asx1,sup	13 ø 25	7960	PR	PR
Asx2,sup	5 ø 10	5260	PR	PR
Asy1,1	8 ø 16	5260	PR	PR
Asy1,2	10 ø 12	7960	PR	PR
As3,ceco				

- (1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado  
 (2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se aña de inicialmente el numero de ramas  
 (3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas  
 (4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

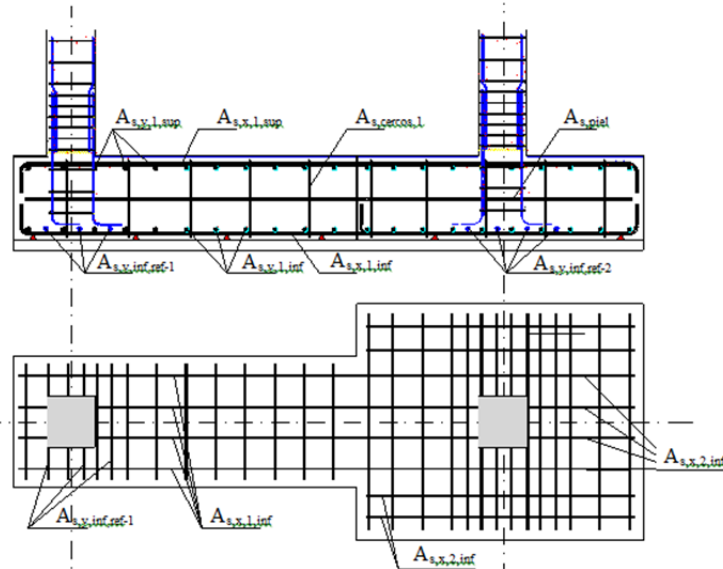
Coste Economico (Euros)	<b>2.600 €</b>	Relacion Perimetro/Area	1,21
Nº Barras de armad	87	Diametro medio (cm)	17,4
Nº Barras armado long.	87	Peso Armado Long (kg)	785
Nº Tipo de Barras	4	Peso Armado Total (kg)	785
		Uniformidad de Armado (%)	58

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 4 RIGIDA . ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parametros iniciales.

Geometria	Dimensiones (mm)			Materiales	Cargas
	A	B	H		
Zapata 1	4.800	1.700	1.150	Hormigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2	2.700	2.500	1.150	Aceero B-500 S	N1sc 420000 kN
					N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patron de armado



Solucion de armado:

Ref(1)	nº(2)	Long(mm)(3)	Patilla 1(4)	Patilla 2(5)
As1x,xfnf	9 Ø 16	7520	PR	PR
As1y,inf	16 Ø 20	1560	PR	PR
As2x,xfnf	5 Ø 16	2560	PR	PR
As2y,inf	14 Ø 16	2470	PR	PR

Ref(1)	nº(2)	Long(mm)(3)	Patilla 1(4)	Patilla 2(5)
Asx1,sup	16 Ø 20	7360	PR	PR
Asx2,sup	5 Ø 10	2560	PR	PR
Aspiel1	4 Ø 25	7360	PR	PR
Aspiel2	24 Ø 12	2560	PR	PR
As3,cerco				

- (1) Referencia de disposicion de armado, según patron adoptado
- (2) Descripción de armado. Numero de redondos y diametro. En armados a cortante se añade inicialmente el numero de ramas
- (3) Longituden mm del armado incluyendo dimensiones de patillas
- (4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongacion recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

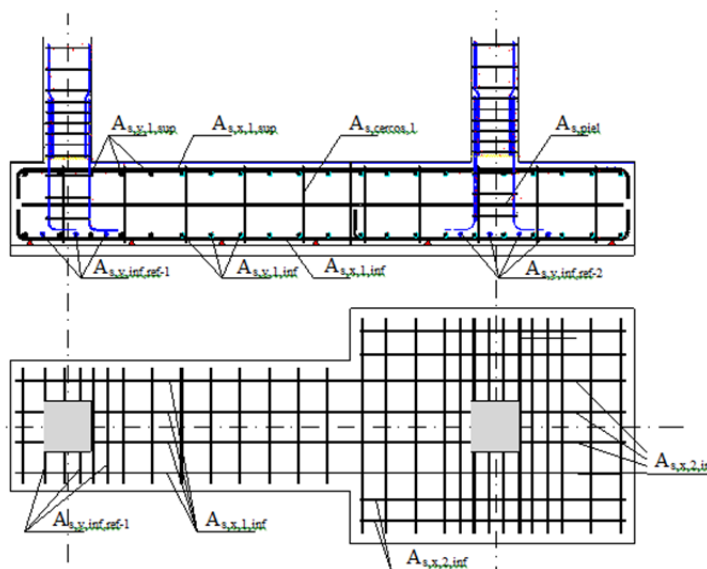
Coste Economico (Euros)	<b>3.162 €</b>	Relacion Perimetro/Area	1,34
Nº Barras de armad	93	Diametro medio (cm)	18,7
Nº Barras armado long.	93	Peso Armado Long (kg)	792
Nº Tipo de Barras	4	Peso Armado Total (kg)	792
		Uniformidad de Armado (%)	58

<b>SOLUCION OPTIMA S.A. PARA ZAPATA TIPO 4 MOD ELASTICO . ZAPATA COMBINADA ASIMETRICA</b>	Optimo: <b>COSTE ECONOMICO</b>
---	-----------------------------------

Parámetros iniciales.

	Geometría			Materiales	Cargas
	Dimensiones (mm)				
	A	B	H		
Zapata 1	5.600	2.600	700	Hormigon HA-30	N1cp 860000 kN
Zapata 2	1.400	3.400	700	Acero B-500 S	N1sc 420000 kN
					N2cp 1600000 kN
					N2sc 1400000 kN

Patrón de armado



Solución de armado:

Ref(1)	nØ (2)		Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
As1x,xinf	15	Ø 12	6860	PR	PR
As1y,inf	32	Ø 12	3260	PR	PR
As2x,xinf	5	Ø 12	1260	PR	PR
As2y,inf	8	Ø 12	2460	PR	PR

Ref(1)	nØ (2)		Long (mm) (3)	Patilla 1 (4)	Patilla 2 (5)
Asx1,sup	22	Ø 20	6860	PR	PR
Asx2,sup	5	Ø 10	1260	PR	PR
Aspiel1	12	Ø 16	6860	PR	PR
Aspiel2	12	Ø 16	1260	PR	PR
As3,cercos					

(1) Referencia de disposición de armado, según patrón adoptado

(2) Descripción de armado. Número de redondos y diámetro. En armados a cortante se añade inicialmente el número de ramas

(3) Longitud en mm del armado incluyendo dimensiones de patillas

(4) y (5) Patillas dispuestas a cada lado de la barra. "PR" Patilla en prolongación recta, "PN(x)" Patilla normalizada indicando su longitud en mm y "PV(x)" Patilla con desarrollo vertical, indicando su longitud en mm.

Funciones objetivo:

Coste Economico (Euros)	<b>2.613 €</b>
Nº Barras de armad	115
Nº Barras armado long.	115
Nº Tipo de Barras	3

Relacion Perimetro/Area	1,07
Diametro medio (cm)	14,8
Peso Armado Long (kg)	730
Peso Armado Total (kg)	730
Uniformidad de Armado (%)	72

## ANEXO II: RESULTADOS DEL ESTUDIO DE PARAMETRIZACION

Se incluyen a continuación las tablas con todos los resultados obtenidos en la optimización tras el estudio de parametrización realizado para cada una de los modelos estructurales analizados. Los datos incluidos son:

- $\sigma$ : Tensión admisible en el terreno, en  $N/mm^2$ .
- $K_{30}$ : Módulo de balasto para placa de 30x30cm en  $N/mm^3$ .
- L: Distancia entre soportes en mm.
- A1, B1, H1; Dimensiones de la zapata de medianería o combinada de nacho constante (ancho, largo y canto) en mm.
- A2, B2, H2; Dimensiones de la zapata interior (ancho, largo y canto ) en mm para solución de zapata excéntrica con viga riostra.
- B3, H3; Dimensiones de la viga riostra (ancho y canto ) en mm para solución de zapata excéntrica con viga riostra.
- HA: Tipo de hormigón.
- B: Tipo de acero. Valor de límite elástico en  $N/mm^2$ .
- Armados. (n,  $\emptyset$ , L). Número de barras, Diámetro de barras en mm y Longitud de barras en mm.

Las casillas que no presenten valores en las tablas, indicaran que no se han podido conseguir soluciones factibles para estos valores de los parámetros del problema.







Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

TIP 2 R			GEOMETRIA										ATERIALE					Zap1 A inf			Zap1 A sup			Zap2 A inf			Zap2 A sup			VR pícl			Acortante																
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	B-	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø							
N/mm²	N/mm²	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
15,00	0,550	7000	200	200	8000	1500	2,50	8200	12300	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1060	5	12	1060	5	12	1060	5	12	650	0	0	0	0	2	37	6										
15,00	0,550	7000	200	600	8000	1500	3,50	2300	18300	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1060	5	12	1060	5	12	1060	5	12	650	0	0	0	0	2	33	6										
15,00	0,550	7000	200	800	8000	1600	4,50	2700	24000	300	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1460	5	12	1460	5	12	1460	5	12	1460	5	12	5760	0	0	0	0	2	33	6										
15,00	0,550	7000	200	1400	8000	1600	5,50	3600	28000	450	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1460	5	12	1460	5	12	1460	5	12	1460	5	12	5300	0	0	0	0	2	29	6										
15,00	0,550	7000	200	800	8000	1600	6,50	3700	33000	450	400	250	30	500	9	12	860	6	12	1500	20	20	2100	30	16	3360	10	12	7550	2	12	5260	0	0	0	0	2	30	6										
15,00	0,550	7000	200	2200	8000	1800	7,00	4000	36000	550	400	250	30	500	9	12	860	6	12	1500	20	20	2100	30	16	3360	10	12	7550	2	12	5260	0	0	0	0	2	33	6										
15,00	0,550	7000	200	600	8000	1800	8,00	5000	42000	600	450	400	30	500	16	12	1060	7	12	1700	9	12	1700	9	12	1700	9	12	1560	4	12	6700	0	0	0	0	2	29	6										
15,00	0,550	7000	200	800	8000	1800	9,00	5000	48000	600	450	400	30	500	17	12	1060	7	12	1700	9	12	1700	9	12	1700	9	12	1560	4	12	5960	0	0	0	0	2	27	6										
15,00	0,550	7000	200	1400	8000	1800	10,00	5000	54000	600	450	400	30	500	18	12	1060	7	12	1700	9	12	1700	9	12	1700	9	12	1560	4	12	5460	0	0	0	0	2	26	6										
15,00	0,550	7000	200	800	8000	1800	11,00	5000	60000	600	450	400	30	500	21	12	1060	7	12	1700	9	12	1700	9	12	1700	9	12	1560	4	12	5360	0	0	0	0	2	26	6										
15,00	0,550	7000	200	2200	8000	2000	12,00	5000	66000	600	450	400	30	500	18	16	1560	10	12	1800	7	12	1800	7	12	1800	7	12	1650	28	16	6930	4	12	6560	0	0	0	3	30	6								
15,00	0,550	7000	200	600	8000	2000	13,00	5000	72000	600	450	400	30	500	28	12	1560	7	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	6990	4	12	630	0	0	3	27	6									
15,00	0,550	7000	200	800	8000	2000	14,00	5000	78000	600	450	400	30	500	28	12	1560	7	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	7050	4	12	5580	0	0	0	3	24	6								
15,00	0,550	7000	200	1400	8000	2000	15,00	5000	84000	600	450	400	30	500	28	12	1560	7	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	7120	4	12	5360	0	0	0	3	23	6								
15,00	0,550	7000	200	800	8000	2000	16,00	5000	90000	600	450	400	30	500	17	16	1560	10	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	7120	4	12	5460	0	0	0	3	24	6								
15,00	0,550	7000	200	2200	8000	2000	17,00	5000	96000	600	450	400	30	500	18	16	1560	10	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	7120	4	12	5460	0	0	0	3	24	6								
15,00	0,550	7000	200	600	8000	2000	18,00	5000	102000	600	450	400	30	500	18	16	1560	10	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	7120	4	12	5460	0	0	0	3	24	6								
15,00	0,550	7000	200	800	8000	2000	19,00	5000	108000	600	450	400	30	500	18	16	1560	10	12	2500	9	12	2500	9	12	2500	9	12	1900	25	16	7120	4	12	5460	0	0	0	3	24	6								

TIP0 2R																																								
T		GEOMETRIA																ATERIALE		Zap1 Asinf			Zap1 Ysinf			Zap2 Asinf			Zap2 Ysinf			VR Asuf			VR piel			Acortante		
N/mm2	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-	HA	B-						
15.00	0.800	5000	200	200	8000	1500	250	1200	1200	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1050	5	12	1060	10	12	4940	2	12	4530	0	0	2	24	6			
15.00	0.800	5000	200	600	8000	1600	350	2300	1800	250	400	300	30	500	6	12	860	4	12	1460	12	16	1450	15	12	1660	10	12	5100	2	12	3960	0	0	2	21	6			
15.00	0.800	5000	200	8000	8000	1600	450	2700	2600	300	400	300	30	500	6	12	860	4	12	1460	20	16	1540	19	16	2460	7	12	5440	2	12	3780	0	0	2	18	6			
15.00	0.800	5000	200	1400	1300	1300	550	3200	3100	400	400	300	30	500	6	12	1160	6	12	1160	23	16	1780	15	20	2960	6	16	5580	2	12	3530	0	0	2	15	6			
15.00	0.800	5000	200	1800	8000	1600	650	3600	3700	500	400	250	30	500	9	12	860	6	12	1510	28	16	1930	28	16	3520	10	12	5510	2	16	3330	0	0	2	18	8			
15.00	0.800	5000	600	200	1300	3700	500	1800	1200	450	400	450	30	500	15	12	1160	10	16	3520	5	12	860	4	12	1090	5	25	5530	2	12	4710	0	0	2	22	6			
15.00	0.800	5000	600	600	1300	3700	500	2500	1600	350	800	350	30	500	15	12	1160	10	16	3520	14	12	1490	9	12	1460	15	16	5030	4	12	3910	0	0	3	17	6			
15.00	0.800	5000	600	1000	1300	3700	500	2800	2500	400	700	400	30	500	15	12	1160	10	16	3520	13	16	1800	12	16	2360	23	12	5070	3	12	3780	0	0	3	16	6			
15.00	0.800	5000	600	1400	1700	3000	550	3500	2800	450	600	450	30	500	14	12	1560	8	16	2770	21	16	1910	29	12	2650	16	16	5220	3	12	3460	0	0	2	12	6			
15.00	0.800	5000	600	1800	1300	3800	650	3900	3300	500	400	500	30	500	20	12	1160	8	16	3470	18	20	2240	24	16	3320	7	20	5570	5	12	3280	0	0	2	14	6			
15.00	0.800	5000	600	2200	1300	3800	650	3900	3300	500	400	500	30	500	20	12	1160	8	16	3470	18	20	2240	24	16	3320	7	20	5570	5	12	3280	0	0	2	14	6			
15.00	0.800	5000	1000	200	1800	5000	750	2100	1800	450	800	450	30	500	30	12	1660	10	20	4650	9	12	1680	8	12	1660	28	16	4970	4	12	4160	0	0	3	16	6			
15.00	0.800	5000	1000	600	2400	4000	750	2800	2200	450	1300	450	30	500	14	16	2260	14	16	3570	18	12	1700	16	12	2050	35	16	5020	5	12	3810	0	0	4	11	6			
15.00	0.800	5000	1000	1400																																				
15.00	0.800	5000	1000	1800																																				
15.00	0.800	5000	1400	200																																				
15.00	0.800	5000	1400	600																																				
15.00	0.800	5000	1400	1000																																				
15.00	0.800	5000	1400	1400																																				
15.00	0.800	5000	1400	1800																																				
15.00	0.800	5000	1800	200																																				
15.00	0.800	5000	1800	600																																				
15.00	0.800	5000	1800	1000																																				
15.00	0.800	5000	1800	1400																																				
15.00	0.800	5000	2200	200																																				
15.00	0.800	5000	2200	600																																				
15.00	0.800	5000	2200	1000																																				
15.00	0.800	5000	2200	1400																																				
15.00	0.800	5000	2200	1800																																				
15.00	0.800	5000	2200	2400																																				
15.00	0.800	5000	2400	600																																				
15.00	0.800	5000	2400	1000																																				
15.00	0.800	5000	2400	1400																																				
15.00	0.800	5000	2400	1800																																				
15.00	0.800	5000	2400	2400																																				
15.00	0.800	5000	2400	3000																																				
15.00	0.800	5000	2400	3600																																				
15.00	0.800	5000	2400	4200																																				
15.00	0.800	5000	2400	4800																																				

TIPO-ZR		GEOMETRIA											ATERIALE			Zap1 Axinf			Zap2 Axinf			VR Axup			VR Axinf			VR píel			Acortante									
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	B-	HA	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	
15,00	0,800	6000	200	200	8000	1500	250	1200	1200	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1050	5	12	1060	10	12	5940	2	12	5530	0	0	0	2	31	6		
15,00	0,800	6000	200	600	8000	1500	350	2300	1800	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1050	5	12	1060	10	12	5940	2	12	5530	0	0	0	2	27	6		
15,00	0,800	6000	200	800	8000	1600	450	2700	2600	300	400	300	30	500	6	12	860	4	12	1460	19	16	1580	19	16	2460	4	16	6640	2	12	4780	0	0	0	2	23	6		
15,00	0,800	6000	200	1400	8000	1600	550	3500	2900	450	400	300	30	500	8	12	860	5	12	1460	22	16	1900	18	16	2760	4	16	6880	2	12	4380	0	0	0	2	21	6		
15,00	0,800	6000	200	800	1300	1300	650	3600	3600	450	400	300	30	500	7	12	1180	7	12	1600	30	16	1880	20	20	3460	4	20	6990	2	12	4330	0	0	0	2	19	8		
15,00	0,800	6000	200	2200	1200	3900	500	1800	1200	450	400	450	30	500	16	12	1060	7	20	3760	5	12	960	5	12	1090	7	20	6530	2	12	5660	0	0	0	2	27	6		
15,00	0,800	6000	600	600	1200	3900	500	2600	1600	400	500	400	30	500	16	12	1060	7	20	3760	13	12	1580	10	12	1460	5	25	6220	3	12	4880	0	0	0	2	23	6		
15,00	0,800	6000	600	1000	1200	3900	500	2900	2400	350	700	350	30	500	16	12	1060	7	20	3760	17	16	1670	24	12	2260	25	12	6040	3	12	4770	0	0	0	3	22	6		
15,00	0,800	6000	600	1400	1200	4000	550	3600	2800	450	400	450	30	500	18	12	1060	6	20	3850	15	20	2000	30	12	2650	11	16	6380	2	12	4410	0	0	0	2	21	6		
15,00	0,800	6000	600	800	1800	4400	650	3600	3600	450	500	450	30	500	23	12	960	9	16	4070	29	16	1900	31	16	3460	16	12	6280	3	12	4410	0	0	0	2	21	6		
15,00	0,800	6000	1000	200	8000	4800	750	1400	1600	500	800	500	30	500	29	12	1660	15	16	4370	7	12	1260	6	12	1460	11	25	5990	4	12	5530	0	0	0	3	24	6		
15,00	0,800	6000	1000	600	1700	5000	700	2000	1900	450	800	450	30	500	17	16	1560	11	20	4700	9	12	1680	9	12	1750	18	20	6080	4	12	4880	0	0	0	3	22	6		
15,00	0,800	6000	1000	1000	1800	4800	750	2900	2300	450	800	450	30	500	17	16	1660	10	20	4450	20	12	1710	17	12	2150	12	25	6150	4	12	4760	0	0	0	3	19	6		
15,00	0,800	6000	1000	1400	2000	4400	750	3400	2800	500	900	500	30	500	15	16	1860	9	20	4050	18	16	1980	25	12	2600	12	25	6240	4	12	4530	0	0	0	3	17	6		
15,00	0,800	6000	1000	800	2500	3700	750	3900	3200	550	900	550	30	500	13	16	2360	13	16	3270	16	20	2290	34	12	2950	13	25	6300	4	12	4330	0	0	0	3	13	6		
15,00	0,800	6000	1000	2200																																				
15,00	0,800	6000	1000	400																																				
15,00	0,800	6000	1000	600																																				
15,00	0,800	6000	1000	800																																				
15,00	0,800	6000	1000	1000																																				
15,00	0,800	6000	1000	1400																																				
15,00	0,800	6000	1000	200																																				
15,00	0,800	6000	1000	600																																				
15,00	0,800	6000	1000	800																																				
15,00	0,800	6000	1000	1000																																				
15,00	0,800	6000	1000	1400																																				
15,00	0,800	6000	1000	2000																																				
15,00	0,800	6000	1000	2200																																				



Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

T	TIPO 2R		GEOMETRIA										ATERIALE			Zap1 A xinf			Zap2 A xinf			VR A s up			VR A hnf			VR p e l			Acortante																
	N mm2	K	L	N1	N2	A1	R1	H1	A1.2	R2	H2	R3	H3	HA	B-	B-	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n	O	L	n
15.00	0.200	5000	200	200	1500	3300	550	1000	1200	500	400	500	30	500	15	12	1360	8	16	3.070	5	12	1800	8	20	5.530	2	12	4.680	0	0	0	2	2.1	6												
15.00	0.200	5000	200	400	1400	3500	550	2700	1500	400	600	400	30	500	17	12	1260	9	16	3.270	8	16	1720	10	12	1360	10	20	5.090	3	12	3.830	0	0	0	3	16	6									
15.00	0.200	5000	600	600	1700	3000	550	3100	2200	450	600	450	30	500	14	12	1560	14	12	2.750	13	16	1880	17	12	2.050	10	20	5.190	3	12	3.660	0	0	0	2	14	6									
15.00	0.200	5000	600	1400	1400	3500	550	3300	3000	500	400	500	30	500	16	12	1260	9	16	3.270	18	16	1980	16	16	2.820	11	16	5.310	2	12	3.580	0	0	0	2	15	6									
15.00	0.200	5000	600	1800	900	2800	650	3600	3600	550	400	550	30	500	15	12	1760	12	12	2.450	26	16	1900	15	20	3.450	9	20	5.420	2	12	3.460	0	0	2	2.2	6										
15.00	0.200	5000	600	2200	200	200	4400	750	1700	2100	500	30	500	27	12	1960	14	16	3.970	9	12	1560	7	12	1900	47	12	4.940	5	12	4.380	0	0	4	16	6											
15.00	0.200	5000	800	600	2300	4800	750	1900	1800	500	1000	500	30	500	25	12	2.160	14	16	3.670	8	12	1750	10	12	1.640	20	20	5.010	4	12	4.280	0	0	4	4.1	6										
15.00	0.200	5000	800	1000	200	4400	750	2900	2200	450	100	450	30	500	15	16	1960	14	16	3.970	19	12	1710	16	12	2.050	13	25	5.150	5	12	3.760	0	0	4	12	6										

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

T	N/mm <sup>2</sup>	K	L (mm)	GEOMETRIA												ATERIALE			Zap1 A3inf			Zap2 A3inf			VR Assup			VR Ainf			VR pie1			Acordante						
				N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	HA (mm)	B-	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n	Ø	L (mm)	n
15,00	0,200	6000	200	200	8000	1500	250	1200	1200	250	400	250	30	500	6	12	860	4	1360	5	12	1050	5	12	1060	10	12	5940	2	12	5530	0	0	0	0	2	31	6		
15,00	0,200	6000	200	600	8000	1500	350	2200	1900	300	400	250	30	500	6	12	860	4	1360	15	12	1390	13	12	1760	4	16	6330	2	12	5030	0	0	0	0	2	25	6		
15,00	0,200	6000	200	1000	8000	1600	450	2700	2700	400	400	250	30	500	6	12	860	4	1460	23	12	1600	24	12	2560	24	12	6230	2	12	4760	0	0	0	0	2	27	6		
15,00	0,200	6000	200	1400	8000	1600	550	3200	3200	500	400	300	30	500	8	12	860	5	1460	17	16	2010	18	16	3020	4	16	6780	2	12	4530	0	0	0	0	2	22	6		
15,00	0,200	6000	200	1800	1300	1300	650	3700	3600	550	400	300	30	500	5	16	1860	7	1860	24	16	2090	16	20	3450	11	12	6470	2	12	4280	0	0	0	0	2	19	6		
15,00	0,200	6000	600	2200	1400	3500	550	1800	1200	500	400	500	30	500	16	12	1260	8	3270	6	12	960	5	12	1890	5	25	6530	2	12	5680	0	0	0	0	2	27	6		
15,00	0,200	6000	600	600	1400	3500	550	2900	1400	400	600	400	30	500	16	12	1260	8	3270	8	16	1810	11	12	1260	10	20	6090	3	12	4730	0	0	0	0	3	21	6		
15,00	0,200	6000	600	1000	1400	3500	550	2800	2500	450	500	450	30	500	17	12	1260	8	3270	12	16	1860	18	12	2350	13	16	6350	3	12	4810	0	0	0	0	2	22	6		
15,00	0,200	6000	600	1400	1500	3300	550	3100	3200	500	500	500	30	500	15	12	1360	8	3070	16	16	2010	18	16	3020	5	25	6570	3	12	4680	0	0	0	0	2	21	6		
15,00	0,200	6000	600	1800	2100	2500	650	3400	3800	600	400	600	30	500	13	12	1960	11	2150	34	12	2010	22	16	3520	6	25	6610	2	12	4580	0	0	0	0	2	17	6		
15,00	0,200	6000	800	2000	2000	4400	750	3600	1400	600	600	600	30	500	27	12	1860	14	3970	7	12	1460	8	12	1390	10	25	6000	3	12	5480	0	0	0	0	2	22	6		
15,00	0,200	6000	800	600	2000	4400	750	2700	1400	600	600	600	30	500	15	16	1860	14	3970	9	12	2000	13	12	1390	10	25	6080	3	12	4930	0	0	0	0	2	19	6		
15,00	0,200	6000	800	1000	2000	4400	750	3200	2800	500	900	500	30	500	27	12	1860	14	3970	12	16	1930	15	12	1900	29	16	6040	4	12	4630	0	0	0	0	3	17	6		
15,00	0,200	6000	800	1400	2200	4800	750	3400	2800	500	800	500	30	500	25	12	2060	14	3670	19	16	1930	14	16	2620	32	16	6070	4	12	4530	0	0	0	0	3	16	6		
15,00	0,200	6000	800	1800	2200	4800	750	3600	3500	550	900	550	30	500	25	12	2060	14	3670	14	20	2330	14	20	3330	28	16	6440	4	12	4460	0	0	0	0	3	16	6		
15,00	0,200	6000	1400	200																																				
15,00	0,200	6000	1400	600																																				
15,00	0,200	6000	1400	1000																																				
15,00	0,200	6000	1400	1400																																				
15,00	0,200	6000	1400	1800																																				
15,00	0,200	6000	1400	2200																																				
15,00	0,200	6000	1800	600																																				
15,00	0,200	6000	1800	1000																																				
15,00	0,200	6000	1800	1400																																				
15,00	0,200	6000	1800	1800																																				
15,00	0,200	6000	1800	2200																																				
15,00	0,200	6000	2200	600																																				
15,00	0,200	6000	2200	1000																																				
15,00	0,200	6000	2200	1400																																				
15,00	0,200	6000	2200	1800																																				
15,00	0,200	6000	2200	2200																																				

Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

T	TIP O 2 R		GEOMETRIA								ATERIALE			Zap1 Axinf	Zap2 Axinf	Zap2 Ayinf	VR Asp	VR Alinf	VR plinf	Acorante																				
	N/mm <sup>2</sup>	K	L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)								HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)
15.00	0.200	7000	200	200	8000	1500	250	1200	1200	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1060	5	12	1060	5	12	1060	5	12	1060	5	12	6530	0	0	2	37	6
15.00	0.200	7000	200	600	8000	1500	350	2200	800	300	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1390	8	16	1760	10	12	7090	2	12	6530	0	0	0	2	34	6		
15.00	0.200	7000	200	8000	8000	1600	450	2800	2600	400	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1460	14	16	1770	15	16	2460	10	12	7220	2	12	5730	0	0	0	2	33	6		
15.00	0.200	7000	200	8000	8000	1600	550	3200	3200	500	400	250	30	500	8	12	860	5	12	1460	17	16	2030	8	16	3020	6	16	7460	2	12	5530	0	0	0	2	31	6		
15.00	0.200	7000	200	8000	8000	2000	650	3700	3600	600	400	250	30	500	11	12	860	6	12	1960	22	16	2380	22	16	3320	6	16	7620	2	12	5530	0	0	0	2	30	6		
15.00	0.200	7000	600	200	1400	3400	550	1800	1200	500	400	500	30	500	15	12	1260	8	16	3170	5	12	960	5	12	1890	5	25	7530	2	12	6680	0	0	0	2	32	6		
15.00	0.200	7000	600	600	1400	3400	550	2300	1800	400	600	400	30	500	15	12	1260	8	16	3170	7	16	1680	10	12	1660	10	20	7060	3	12	6030	0	0	3	28	6			
15.00	0.200	7000	600	8000	8000	1400	3400	550	2900	2400	400	600	400	30	500	15	12	1260	8	16	3170	14	16	1790	20	12	2260	10	20	7180	3	12	5730	0	0	3	27	6		
15.00	0.200	7000	600	8000	8000	1400	3400	550	3300	300	500	400	500	30	500	15	12	1260	8	16	3170	18	16	1980	17	16	2920	8	20	7350	2	12	5580	0	0	2	26	6		
15.00	0.200	7000	600	8000	8000	1200	4000	650	3800	3500	600	400	450	30	500	21	12	1060	5	20	3750	22	16	2200	21	16	3220	11	16	7330	2	12	5530	0	0	2	26	6		
15.00	0.200	7000	8000	2200	9000	4500	750	600	1400	600	600	600	30	500	16	16	1760	7	25	4300	7	12	1460	6	16	1380	10	25	6990	3	12	6480	0	0	0	2	29	6		
15.00	0.200	7000	8000	600	9000	4500	750	2300	1700	500	900	500	30	500	27	12	1760	14	16	4070	10	12	1750	10	12	1560	29	16	6970	4	12	6080	0	0	3	26	6			
15.00	0.200	7000	8000	8000	9000	4500	750	3400	2000	500	900	500	30	500	27	12	1760	9	20	4150	13	16	1960	15	12	1800	29	16	7030	4	12	5530	0	0	3	23	6			
15.00	0.200	7000	8000	8000	9000	4500	750	3500	2800	550	800	550	30	500	16	16	1760	14	16	4070	17	16	2070	25	12	2550	25	16	7100	4	12	5530	0	0	3	23	6			
15.00	0.200	7000	8000	8000	9000	4500	750	3900	3300	600	600	600	30	500	16	16	1760	9	20	4150	22	16	2200	19	16	3020	15	20	7230	3	12	5530	0	0	2	22	6			
15.00	0.200	7000	1400	200	9000	4500	750	600	1400	600	600	30	500	16	16	1760	7	25	4300	7	12	1460	6	16	1380	10	25	6990	3	12	6480	0	0	0	2	29	6			
15.00	0.200	7000	1400	600	9000	4500	750	2300	1700	500	900	500	30	500	27	12	1760	14	16	4070	10	12	1750	10	12	1560	29	16	6970	4	12	6080	0	0	3	26	6			
15.00	0.200	7000	1400	8000	9000	4500	750	3400	2000	500	900	500	30	500	27	12	1760	9	20	4150	13	16	1960	15	12	1800	29	16	7030	4	12	5530	0	0	3	23	6			
15.00	0.200	7000	1400	8000	9000	4500	750	3500	2800	550	800	550	30	500	16	16	1760	14	16	4070	17	16	2070	25	12	2550	25	16	7100	4	12	5530	0	0	3	23	6			
15.00	0.200	7000	1400	8000	9000	4500	750	3900	3300	600	600	600	30	500	16	16	1760	9	20	4150	22	16	2200	19	16	3020	15	20	7230	3	12	5530	0	0	2	22	6			
15.00	0.200	7000	1400	200	9000	4500	750	600	1400	600	600	30	500	16	16	1760	7	25	4300	7	12	1460	6	16	1380	10	25	6990	3	12	6480	0	0	0	2	29	6			
15.00	0.200	7000	1400	600	9000	4500	750	2300	1700	500	900	500	30	500	27	12	1760	14	16	4070	10	12	1750	10	12	1560	29	16	6970	4	12	6080	0	0	3	26	6			
15.00	0.200	7000	1400	8000	9000	4500	750	3400	2000	500	900	500	30	500	27	12	1760	9	20	4150	13	16	1960	15	12	1800	29	16	7030	4	12	5530	0	0	3	23	6			
15.00	0.200	7000	1400	8000	9000	4500	750	3500	2800	550	800	550	30	500	16	16	1760	14	16	4070	17	16	2070	25	12	2550	25	16	7100	4	12	5530	0	0	3	23	6			
15.00	0.200	7000	1400	8000	9000	4500	750	3900	3300	600	600	600	30	500	16	16	1760	9	20	4150	22	16	2200	19	16	3020	15	20	7230	3	12	5530	0	0	2	22	6			



Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	GEOMETRIA							B-	Zap1 Axinf				Zap2 Axinf				VR Asup				VR Ainf				VR picl				Acorriante					
								A2	B2	H2	B3	H3	HA	IB-		Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L		n	Ø	L	n	Ø
15.00	0.300	5000	200	200	1000	1500	250	1200	1200	1200	250	400	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1050	5	12	1060	10	12	4940	2	12	4530	0	0	0	0	2	25	6
15.00	0.300	5000	200	600	1000	1600	350	2100	2000	300	400	400	300	30	500	6	12	860	4	12	1460	4	12	1390	14	12	1860	7	12	5200	2	12	4080	0	0	0	0	2	19	6	
15.00	0.300	5000	200	800	1000	1600	450	2700	2700	450	400	400	300	30	500	6	12	860	5	12	1460	20	12	1690	21	12	2550	7	12	5340	2	12	3780	0	0	0	0	2	18	6	
15.00	0.300	5000	200	1400	1300	1300	550	3200	3200	500	400	400	300	30	500	6	12	1060	6	12	1160	17	12	2000	18	12	3020	6	12	5520	2	12	3530	0	0	0	0	2	15	6	
15.00	0.300	5000	200	1800	1300	1300	650	3800	3600	650	400	400	300	30	500	7	12	1160	7	12	1160	21	12	2270	20	12	3270	11	12	5430	2	12	3230	0	0	0	0	2	13	6	
15.00	0.300	5000	200	2200	1500	3300	550	1300	1300	450	500	500	450	30	500	15	12	1360	8	12	3070	5	12	1860	5	12	1160	9	20	4970	3	12	4560	0	0	0	2	20	6		
15.00	0.300	5000	600	600	1500	3300	550	2500	1600	400	700	400	30	500	15	12	1360	8	12	3070	12	12	1580	9	12	1460	16	12	5030	3	12	3930	0	0	0	3	16	6			
15.00	0.300	5000	600	1000	1500	3300	550	2900	2400	450	500	450	30	500	15	12	1360	8	12	3070	21	12	1700	10	12	2260	14	12	5140	3	12	3760	0	0	0	2	15	6			
15.00	0.300	5000	600	1400	1700	3000	550	3200	3100	550	400	400	300	30	500	14	12	1560	14	12	2750	27	12	1890	15	12	2870	8	20	5330	2	12	3660	0	0	0	2	14	6		
15.00	0.300	5000	600	1800	1400	3600	650	3700	3600	650	400	400	300	30	500	19	12	1260	8	12	3270	20	12	2290	13	20	3350	10	12	5400	2	12	3440	0	0	0	2	14	6		
15.00	0.300	5000	1000	200																																					
15.00	0.300	5000	1000	600																																					
15.00	0.300	5000	1000	1400																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	1800																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	400																																					
15.00	0.300	5000	1000	800																																					
15.00	0.300	5000	1000	1400																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	1800																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	400																																					
15.00	0.300	5000	1000	800																																					
15.00	0.300	5000	1000	1400																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	1800																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	400																																					
15.00	0.300	5000	1000	800																																					
15.00	0.300	5000	1000	1400																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	1800																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	400																																					
15.00	0.300	5000	1000	800																																					
15.00	0.300	5000	1000	1400																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					
15.00	0.300	5000	1000	1800																																					
15.00	0.300	5000	1000	2200																																					



TIP-0-2-R			GEOMETRIA										ATERIALE										Zap1 A y inf		Zap2 A y inf		Zap2 A y inf		VR A sup		VR A inf		VR pie1		Acofante												
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	HB	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n
N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>3</sup>	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
15.00	0.300	7000	200	200	8000	1500	250	1200	1200	250	400	250	30	500	6	12	860	4	12	1360	5	12	1060	5	12	1060	10	12	6940	2	12	6530	0	0	0	0	0	0	2	38	6						
15.00	0.300	7000	200	600	8000	1500	350	2000	300	400	400	250	30	500	7	12	860	4	12	1360	14	12	1390	8	16	1860	10	12	7080	2	12	6660	0	0	0	0	0	0	2	35	6						
15.00	0.300	7000	200	8000	1800	1800	450	2700	450	400	400	300	30	500	6	12	960	5	12	1260	20	12	1690	21	12	2550	9	12	7240	2	12	5780	0	0	0	0	0	0	2	28	6						
15.00	0.300	7000	200	1400	1300	1500	550	3200	500	400	400	300	30	500	6	12	1160	6	12	1460	17	16	2040	12	20	3060	12	12	7280	2	12	5530	0	0	0	0	0	0	2	26	6						
15.00	0.300	7000	200	1800	1800	1600	650	3700	3700	700	400	250	30	500	9	12	860	6	12	1560	20	16	2390	20	16	3320	10	12	7400	2	12	5260	0	0	0	0	0	0	2	30	6						
15.00	0.300	7000	600	2200	1500	3200	550	1800	1200	500	400	500	30	500	15	12	1360	8	16	2970	5	12	960	5	12	1190	9	20	7530	2	12	6680	0	0	0	0	0	0	2	32	6						
15.00	0.300	7000	600	600	1500	3200	550	2300	1800	450	500	450	30	500	15	12	1360	8	16	2970	11	12	1670	9	12	1650	15	16	7030	3	12	6060	0	0	0	0	0	0	2	28	6						
15.00	0.300	7000	600	8000	1500	3200	550	2800	2500	450	500	450	30	500	15	12	1360	8	16	2970	20	12	1710	11	16	2360	10	20	7860	3	12	5880	0	0	0	0	0	0	2	27	6						
15.00	0.300	7000	600	1400	1500	3200	550	3300	3100	550	400	550	30	500	15	12	1360	13	12	2950	28	12	1900	27	12	2850	27	12	7330	2	12	5600	0	0	0	0	0	0	2	26	6						
15.00	0.300	7000	600	1800	1300	3700	650	3700	3600	650	400	550	30	500	20	12	1160	5	20	3450	20	16	2290	20	16	3270	6	20	7590	2	12	5480	0	0	0	0	0	0	2	26	6						
15.00	0.300	7000	600	2200	2200	4000	750	800	1500	600	700	600	30	500	24	12	2060	13	16	3570	8	12	1660	9	12	1390	18	20	6970	4	12	6380	0	0	0	0	0	0	3	26	6						
15.00	0.300	7000	600	600	2200	4000	750	2800	1800	550	900	550	30	500	24	12	2060	13	16	3570	8	12	1900	10	12	1660	29	16	6990	4	12	6200	0	0	0	0	0	0	3	25	6						
15.00	0.300	7000	600	8000	2200	4000	750	2800	2400	550	900	550	30	500	14	16	2060	13	16	3570	17	12	1910	16	12	2150	29	16	7020	4	12	5860	0	0	0	0	0	0	3	23	6						
15.00	0.300	7000	600	1400	2200	4000	750	3500	2800	600	700	600	30	500	24	12	2060	13	16	3570	15	16	2380	14	16	2520	18	20	7120	4	12	5530	0	0	0	0	0	0	3	22	6						
15.00	0.300	7000	600	1800	2200	4000	750	3700	3500	650	700	600	30	500	14	16	2060	9	20	3650	13	20	2480	19	16	3170	11	25	7320	4	12	5430	0	0	0	0	0	0	3	21	6						
15.00	0.300	7000	600	2200	2200	4000	750	800	1500	600	700	600	30	500	24	12	2060	13	16	3570	8	12	1660	9	12	1390	18	20	6970	4	12	6380	0	0	0	0	0	0	3	26	6						
15.00	0.300	7000	600	600	2200	4000	750	2800	1800	550	900	550	30	500	24	12	2060	13	16	3570	8	12	1900	10	12	1660	29	16	6990	4	12	6200	0	0	0	0	0	0	3	25	6						
15.00	0.300	7000	600	8000	2200	4000	750	2800	2400	550	900	550	30	500	14	16	2060	13	16	3570	17	12	1910	16	12	2150	29	16	7020	4	12	5860	0	0	0	0	0	0	3	23	6						
15.00	0.300	7000	600	1400	2200	4000	750	3500	2800	600	700	600	30	500	24	12	2060	13	16	3570	15	16	2380	14	16	2520	18	20	7120	4	12	5530	0	0	0	0	0	0	3	22	6						
15.00	0.300	7000	600	1800	2200	4000	750	3700	3500	650	700	600	30	500	14	16	2060	9	20	3650	13	20	2480	19	16	3170	11	25	7320	4	12	5430	0	0	0	0	0	0	3	21	6						



Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

T	TIPO 2R			GEOMETRIA										ATERIALE				Zap1 A3inf				Zap2 A3inf				Zap1 A3inf				Zap2 A3inf				VR A3up				VR A3inf				VR piel				Acortante			
	N/mm2	L (mm)	N1 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	A2 (mm)	B2 (mm)	H2 (mm)	B3 (mm)	H3 (mm)	HA	B-	L (mm)	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n					
20,00	0,050	6000	200	8000	1200	250	8000	1200	250	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	5	12	1060	10	12	5920	2	12	5,610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	31	6							
20,00	0,050	6000	200	600	8000	1200	350	2000	1600	250	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	10	12	1460	13	12	6,900	2	12	5,110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	29	6							
20,00	0,050	6000	200	1400	8000	1200	450	2500	2000	350	400	250	30	500	6	12	860	5	12	1180	14	12	1690	21	12	6,210	2	12	4,860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27	6						
20,00	0,050	6000	200	1800	8000	1200	550	3000	2500	450	400	250	30	500	6	12	860	5	12	1060	19	12	1870	27	12	6,790	2	12	4,630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	6						
20,00	0,050	6000	200	1800	8000	1200	650	3300	2900	500	400	250	30	500	8	12	860	6	12	1060	25	12	2,350	4	16	7,350	2	12	4,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	25	6						
20,00	0,050	6000	200	2200	8000	1200	750	3600	3300	550	400	250	30	500	8	12	860	6	12	1060	19	12	2,300	17	16	7,350	2	12	4,330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	21	6						
20,00	0,050	6000	600	8000	3400	550	8000	1200	400	400	400	400	30	500	8	12	860	5	12	3,250	5	12	860	4	12	1,060	6	20	6,430	2	12	5,680	0	0	0	0	0	0	0	0	2	29	6						
20,00	0,050	6000	600	1200	2900	450	2200	1400	400	500	400	30	500	11	12	1060	8	16	2,760	6	16	1,760	8	12	1,260	5	25	6,180	3	12	5,080	0	0	0	0	0	0	0	0	2	24	6							
20,00	0,050	6000	600	1400	3400	450	2600	2000	400	500	400	30	500	12	12	1060	8	16	2,760	13	16	1,760	13	16	6,180	3	16	6,480	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	23	6							
20,00	0,050	6000	600	1800	3500	550	2700	2700	400	400	450	30	500	15	12	860	5	20	3,250	18	16	1,80	13	20	2,560	6	20	6,360	2	12	4,830	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	24	6						
20,00	0,050	6000	600	2200	3500	550	3500	3400	550	400	500	600	30	500	21	12	860	6	16	3,080	28	16	2,080	28	16	6,440	2	12	4,560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	22	6							
20,00	0,050	6000	800	1500	4000	650	1700	1700	500	700	500	600	30	500	21	12	1560	9	20	3,750	7	12	960	6	12	1,560	7	25	5,730	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27	6							
20,00	0,050	6000	800	1500	4000	650	3000	1700	500	700	500	30	500	21	12	1560	9	20	3,750	11	16	1,990	12	12	1,560	21	16	6,060	3	12	5,380	0	0	0	0	0	0	0	0	3	24	6							
20,00	0,050	6000	800	1800	4000	650	3000	2400	500	700	500	30	500	21	12	1560	6	25	3,860	16	19	1,920	22	12	2,200	21	16	6,100	3	12	4,730	0	0	0	0	0	0	0	3	21	6								
20,00	0,050	6000	800	1800	3800	650	3400	3000	500	700	500	30	500	23	12	1460	13	16	3,470	25	16	1,870	21	16	2,820	15	20	6,220	3	12	4,680	0	0	0	0	0	0	0	3	20	6								
20,00	0,050	6000	800	2200	4600	750	3400	3400	550	600	550	30	500	28	12	1160	6	25	4,400	27	16	2,070	27	16	3,170	16	16	6,240	3	12	4,560	0	0	0	0	0	0	2	21	6									
20,00	0,050	6000	1400	800	4900	800	1500	800	550	800	550	30	500	32	12	1360	8	25	4,650	8	12	1,360	7	12	1,660	132	16	5,950	5	12	5,510	0	0	0	0	0	0	3	24	6									
20,00	0,050	6000	1400	800	4900	800	2700	800	600	600	600	30	500	32	12	1660	8	25	4,650	8	16	2,200	13	12	1,660	132	25	6,120	4	12	4,930	0	0	0	0	0	0	3	21	6									
20,00	0,050	6000	1400	800	4900	800	2900	2400	550	800	550	30	500	32	12	1660	13	16	2,080	13	16	2,080	12	16	2,170	32	16	6,060	3	12	4,810	0	0	0	0	0	0	3	20	6									
20,00	0,050	6000	1400	800	4900	800	3200	2900	550	800	550	30	500	32	12	1660	8	25	4,650	19	16	2,800	20	2,0	2,730	32	16	6,080	3	12	4,660	0	0	0	0	0	0	3	19	6									
20,00	0,050	6000	1800	800	4700	800	3200	3500	550	1100	550	30	500	30	12	1760	12	20	4,500	24	16	2,080	27	16	3,270	34	16	6,110	3	12	4,660	0	0	0	0	0	0	3	18	6									



















Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

TIPO 2R			GEOMETRIA															ATERIALE			Zap1 AyInf			Zap2 AyInf			VR Asup			VR AInf			VR pEl			Acortante																			
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	H2	B2	H2	B3	H3	B-	HA	HB	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L																	
N/mm²	N/mm²	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
20.00	0.300	6000	200	200	8000	1200	250	800	1200	250	400	250	30	500	5	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	4	12	1060	10	12	5920	2	12	5920	2	12	5600	0	0	0	2	31	6												
20.00	0.300	6000	200	200	8000	1200	350	800	1200	350	400	250	30	500	5	860	4	12	1100	13	16	1660	13	16	1660	10	12	6900	2	12	6900	2	12	6900	2	12	5200	0	0	0	2	29	6												
20.00	0.300	6000	200	200	8000	1200	450	2300	2300	350	400	250	30	500	5	860	4	12	1100	13	16	1660	13	16	1660	10	12	6900	2	12	6900	2	12	6900	2	12	5200	0	0	0	2	28	6												
20.00	0.300	6000	200	200	8000	1200	550	2900	2600	500	400	300	30	500	6	860	6	12	1060	16	16	1970	25	12	2400	4	16	6700	2	12	6700	2	12	6700	2	12	4880	0	0	0	2	23	6												
20.00	0.300	6000	200	2200	8000	1200	650	3300	3300	550	400	350	30	500	8	1260	8	12	1060	17	20	2400	16	20	3800	3	20	7420	2	12	7420	2	12	4580	0	0	0	2	20	6															
20.00	0.300	6000	200	200	8000	1200	750	3600	3300	600	400	450	30	500	12	1060	7	16	2720	5	12	860	4	12	1090	7	20	6530	2	12	6530	2	12	5700	0	0	0	2	28	6															
20.00	0.300	6000	600	600	8000	1200	2900	500	2400	1300	450	400	450	30	500	12	1060	7	16	2720	10	12	1860	15	16	1860	15	16	6060	2	12	6060	2	12	5900	0	0	0	2	24	6														
20.00	0.300	6000	600	600	8000	1200	2900	500	2600	2000	450	400	450	30	500	12	1060	7	16	2720	11	16	1870	10	16	1870	10	16	6230	3	12	6230	3	12	4800	0	0	0	2	23	6														
20.00	0.300	6000	600	600	8000	1300	2700	550	2800	2600	450	500	450	30	500	15	1860	6	16	2480	17	16	1870	10	20	2480	12	16	6230	3	12	6230	3	12	4800	0	0	0	2	22	6														
20.00	0.300	6000	600	600	8000	1300	2800	650	3200	3000	550	400	550	30	500	15	1860	6	16	2480	10	20	2090	12	20	2850	6	20	6570	2	12	6570	2	12	4660	0	0	0	2	22	6														
20.00	0.300	6000	600	600	8000	1400	3500	750	3600	3300	650	400	400	30	500	21	860	6	16	3080	24	16	2280	14	20	3060	6	20	6580	2	12	6580	2	12	4880	0	0	0	2	21	6														
20.00	0.300	6000	1000	1000	600	1400	4400	850	800	1400	500	600	500	30	500	17	1260	11	16	3870	6	12	860	4	12	1260	8	25	6560	3	12	6560	3	12	5700	0	0	0	2	27	6														
20.00	0.300	6000	1000	1000	600	1600	3900	700	800	1500	500	700	500	30	500	22	1460	8	20	3600	8	12	1760	8	12	1360	15	20	6000	3	12	6000	3	12	5280	0	0	0	3	23	6														
20.00	0.300	6000	1000	1000	600	1600	3900	700	2800	800	500	600	550	30	500	22	1460	12	16	3520	12	12	1900	13	16	1660	20	16	6060	3	12	6060	3	12	5280	0	0	0	3	21	6														
20.00	0.300	6000	1000	1000	600	1600	3900	700	2800	800	500	600	550	30	500	22	1460	12	16	3520	22	12	1900	13	16	2370	13	20	6160	3	12	6160	3	12	4860	0	0	0	3	19	6														
20.00	0.300	6000	1000	1000	600	1700	3700	700	3800	3000	500	600	500	30	500	13	1560	11	16	3270	22	16	1960	21	16	2820	24	16	640	4	12	6400	4	12	4860	0	0	0	3	19	6														
20.00	0.300	6000	1000	1000	600	1900	3700	750	3500	3300	600	600	500	30	500	23	1560	11	16	3270	24	16	2200	15	20	3000	19	16	6260	4	12	6260	4	12	4530	0	0	0	3	19	6														
20.00	0.300	6000	1400	1400	600	2000	4600	900	800	2000	500	600	500	30	500	37	1760	7	25	4460	8	12	1360	6	12	1800	39	16	5900	5	12	5900	5	12	5280	0	0	0	4	23	6														
20.00	0.300	6000	1400	1400	600	2000	4600	900	800	1700	600	600	500	30	500	33	1860	16	16	4030	10	12	1460	6	16	1560	21	20	5980	5	12	5980	5	12	4960	0	0	0	3	19	6														
20.00	0.300	6000	1400	1400	600	2000	4600	900	2600	800	500	600	550	30	500	19	1860	16	16	4030	14	12	1900	12	12	1660	24	20	6020	5	12	6020	5	12	4960	0	0	0	3	19	6														
20.00	0.300	6000	1400	1400	600	2800	4400	900	3000	2300	550	600	550	30	500	32	1960	16	16	3830	13	16	2000	20	12	2050	37	16	6030	5	12	6030	5	12	4960	0	0	0	4	18	6														
20.00	0.300	6000	1400	1400	600	2800	4400	900	3400	2700	600	600	600	30	500	38	1960	16	16	3830	18	16	2240	27	12	2400	44	25	6250	5	12	6250	5	12	4880	0	0	0	3	17	6														
20.00	0.300	6000	1400	1400	600	2800	4400	900	3400	3300	600	600	600	30	500	39	1960	16	16	3830	23	16	2480	23	16	3020	22	20	6170	5	12	6170	5	12	4880	0	0	0	3	17	6														
20.00	0.300	6000	1800	1800	200																																																		
20.00	0.300	6000	1800	1800	200																																																		
20.00	0.300	6000	1800	1800	200																																																		
20.00	0.300	6000	1800	1800	200																																																		
20.00	0.300	6000	1800	1800	200																																																		
20.00	0.300	6000	2200	2200	800																																																		
20.00	0.300	6000	2200	2200	800																																																		
20.00	0.300	6000	2200	2200	800																																																		

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIP O 2R				GEOMETRIA																ATERIALE			Zap1 A y inf			Zap2 A y inf			VR Xsup			VR A y inf			VR pie1			Acortante					
T	K	L	N	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	B-	H	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	r	n	Ø			
20,00	0,300	7000	200	200	8000	1200	1200	250	8000	1200	250	400	450	30	500	5	12	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	5	12	6,60	0	0	2	37	6		
20,00	0,300	7000	200	600	8000	1200	350	880	1800	800	250	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	5	12	6,20	0	0	2	35	6		
20,00	0,300	7000	200	800	8000	1200	450	2300	2300	350	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1100	13	16	1660	13	16	1660	13	16	1660	13	16	1660	13	16	7,90	2	12	5,960	0	0	2	33	6
20,00	0,300	7000	200	1400	8000	1200	550	2900	2600	500	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	16	16	1970	25	12	2,400	10	12	7,300	2	12	5,660	0	0	0	0	0	2	32	6			
20,00	0,300	7000	200	1800	8000	1200	650	3200	3300	600	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	18	16	2,400	18	16	2,820	6	16	7,500	2	12	5,530	0	0	0	0	0	2	31	6			
20,00	0,300	7000	200	2200	1200	1200	750	3600	3300	600	400	300	30	500	11	12	1060	8	12	1060	28	16	2,140	24	16	3,020	10	12	7,600	2	12	5,330	0	0	0	0	0	2	25	6			
20,00	0,300	7000	600	600	1800	3300	550	8000	1200	450	400	450	30	500	14	12	960	7	16	2,870	5	12	860	4	16	1080	6	20	7,500	2	12	6,70	0	0	0	2	34	6					
20,00	0,300	7000	600	600	1800	3400	500	2400	1300	450	400	450	30	500	13	12	1060	7	16	2,720	10	12	1,700	9	12	1,600	7	20	7,180	2	12	6,00	0	0	0	2	29	6					
20,00	0,300	7000	600	600	1800	3400	550	2600	2000	400	400	400	30	500	13	12	860	7	16	3,120	13	16	1,750	9	16	1,860	6	20	7,880	0	0	0	2	30	6								
20,00	0,300	7000	600	600	1800	2900	550	2800	2700	450	400	450	30	500	16	12	1060	11	12	2,650	17	16	1,870	17	16	2,650	7	20	7,370	2	12	5,80	0	0	0	2	28	6					
20,00	0,300	7000	600	600	1800	3200	650	3200	3000	550	400	450	30	500	20	12	960	6	16	2,770	24	16	2,090	19	16	2,770	11	16	7,300	2	12	5,60	0	0	0	2	27	6					
20,00	0,300	7000	800	200	1800	3800	700	1500	1500	550	600	550	30	500	22	12	1460	8	20	3,500	7	12	1,360	7	12	1,360	7	20	7,580	2	12	5,40	0	0	0	2	27	6					
20,00	0,300	7000	800	600	1600	3800	700	2400	1400	550	600	550	30	500	22	12	1460	8	20	3,500	7	12	1,360	7	12	1,360	7	20	7,580	2	12	5,40	0	0	0	2	27	6					
20,00	0,300	7000	800	800	1600	3800	700	3000	1700	550	600	550	30	500	22	12	1460	8	20	3,500	7	12	1,360	7	12	1,360	7	20	7,580	2	12	5,40	0	0	0	2	27	6					
20,00	0,300	7000	800	1400	1600	3800	700	3000	2400	500	800	500	30	500	22	12	1460	12	16	3,420	8	12	1,880	10	12	1,290	9	25	7,050	3	12	6,20	0	0	0	2	29	6					
20,00	0,300	7000	800	1800	1600	3800	700	3500	2700	600	500	500	30	500	22	12	1460	12	16	3,420	8	12	1,880	10	12	1,290	9	25	7,050	3	12	6,20	0	0	0	2	29	6					
20,00	0,300	7000	800	2200	1500	4000	750	3500	3400	600	500	600	30	500	24	12	1560	12	16	3,570	25	12	2,200	22	12	2,200	23	16	7,090	4	12	5,750	0	0	0	2	26	6					
20,00	0,300	7000	800	2600	1500	4000	850	3500	3400	600	500	600	30	500	24	12	1560	12	16	3,570	25	12	2,200	24	16	2,400	16	25	7,450	3	12	5,530	0	0	0	2	26	6					
20,00	0,300	7000	800	3000	2000	4500	850	3500	3400	600	900	600	30	500	24	12	1560	12	16	3,570	25	12	2,200	24	16	2,400	16	25	7,450	3	12	5,530	0	0	0	2	26	6					
20,00	0,300	7000	800	3400	2000	4500	850	2700	800	600	600	30	500	18	16	1860	17	16	3,970	9	12	1,460	8	12	1,500	14	25	6,990	5	12	6,480	0	0	0	2	28	6						
20,00	0,300	7000	800	3800	2000	4500	850	2800	2500	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	16	3,970	8	16	2,200	13	12	1,660	14	25	7,090	5	12	5,930	0	0	0	2	25	6					
20,00	0,300	7000	800	4200	2000	4500	850	3700	2500	650	900	600	30	500	31	12	1860	11	20	4,050	21	12	2,000	12	16	2,220	14	25	7,180	3	12	5,880	0	0	0	2	25	6					
20,00	0,300	7000	800	4600	2000	4500	850	3700	2500	650	900	600	30	500	31	12	1860	11	20	4,050	21	12	2,000	12	16	2,220	14	25	7,180	3	12	5,880	0	0	0	2	25	6					
20,00	0,300	7000	800	5000	2000	4500	850	3500	3300	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	25	4,260	24	16	2,900	23	16	3,020	22	20	7,170	3	12	5,530	0	0	0	2	23	6					
20,00	0,300	7000	800	5400	2000	4500	850	3500	3300	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	25	4,260	24	16	2,900	23	16	3,020	22	20	7,170	3	12	5,530	0	0	0	2	23	6					
20,00	0,300	7000	800	5800	2000	4500	850	3500	3300	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	25	4,260	24	16	2,900	23	16	3,020	22	20	7,170	3	12	5,530	0	0	0	2	23	6					
20,00	0,300	7000	800	6200	2000	4500	850	3500	3300	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	25	4,260	24	16	2,900	23	16	3,020	22	20	7,170	3	12	5,530	0	0	0	2	23	6					
20,00	0,300	7000	800	6600	2000	4500	850	3500	3300	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	25	4,260	24	16	2,900	23	16	3,020	22	20	7,170	3	12	5,530	0	0	0	2	23	6					
20,00	0,300	7000	800	7000	2000	4500	850	3500	3300	600	900	600	30	500	18	16	1860	17	25	4,260	24	16	2,900	23	16	3,020	22	20	7,170	3	12	5,530	0	0	0	2	23	6					





Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIP O 2R			GEOMETRIA										ATERIALE		Zap.A sinf			Zap2. Axinf			VR Asup			VR Ainf			VR pici			Acorante									
T	K	N/mm2	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	BA	B-	L	Ø	L	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø	L	Ø				
25.00	0.050	6000	200	200	800	1200	250	400	250	400	250	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	4	12	1060	2	12	5920	2	12	5630	0	0	0	0	2	31	6		
25.00	0.050	6000	200	600	800	1200	300	400	300	400	300	400	250	30	500	5	12	860	4	12	1060	7	16	1590	8	12	6080	2	12	5630	0	0	0	0	2	28	6		
25.00	0.050	6000	200	800	800	1200	450	2200	800	350	400	300	400	30	500	5	12	860	4	12	1100	12	16	1680	18	12	6500	2	12	5030	0	0	0	0	2	25	6		
25.00	0.050	6000	200	800	800	1200	550	2700	2200	450	400	250	300	30	500	7	12	860	6	12	1060	16	16	2060	13	16	6290	2	12	4730	0	0	0	0	2	27	6		
25.00	0.050	6000	200	800	800	1200	650	2800	2700	500	400	300	400	30	500	7	12	860	6	12	1060	19	16	2090	19	16	6290	2	12	4730	0	0	0	0	2	23	6		
25.00	0.050	6000	200	2200	800	1200	750	3000	3000	550	400	300	400	30	500	5	16	860	6	12	1060	24	16	2090	24	16	780	2	12	4580	0	0	0	0	2	22	6		
25.00	0.050	6000	600	600	800	2700	450	800	1500	400	400	400	400	30	500	11	12	860	8	16	2560	5	12	860	4	12	1060	6	20	6580	0	0	0	0	2	29	6		
25.00	0.050	6000	600	600	800	2700	450	800	1500	400	400	400	400	30	500	14	12	860	8	16	2560	11	16	1760	14	12	1660	6	20	6250	0	0	0	0	2	26	6		
25.00	0.050	6000	600	800	800	2700	500	2800	2800	500	400	400	450	30	500	13	12	860	9	16	2820	15	16	1980	21	12	1900	8	16	6380	0	0	0	0	2	25	6		
25.00	0.050	6000	600	800	800	2700	500	2800	2700	500	400	450	30	500	13	12	860	9	16	2820	19	16	1990	19	16	2520	6	20	6440	0	0	0	0	2	23	6			
25.00	0.050	6000	800	200	800	3600	650	3000	3000	550	400	600	500	30	500	19	12	860	5	16	2490	24	16	2090	24	16	2770	8	16	6500	2	12	4660	0	0	2	28	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	3400	600	2800	1900	600	500	600	500	30	500	17	12	1260	12	16	3200	7	12	1560	7	12	1260	8	25	6040	3	12	5380	0	0	2	25	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	3400	600	2700	2800	500	600	600	500	30	500	17	12	1260	12	16	3200	13	12	1880	13	20	6060	3	12	5380	0	0	0	0	2	24	6		
25.00	0.050	6000	800	800	400	3400	600	2700	2800	500	600	600	500	30	500	17	12	1260	8	20	3200	14	16	1980	21	12	1900	13	20	6060	3	12	4880	0	0	2	22	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	3400	600	3000	2500	550	600	550	30	500	17	12	1260	8	20	3200	18	16	2100	26	12	2250	17	16	6230	3	12	4760	0	0	2	22	6		
25.00	0.050	6000	800	800	400	3400	600	3200	2900	600	400	600	500	30	500	21	12	1260	7	20	3530	22	16	2200	20	16	2650	10	20	6350	2	12	4680	0	0	2	22	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	400	850	4500	800	600	550	800	550	30	500	31	12	1360	7	25	4240	6	16	1360	7	12	1460	17	20	5920	4	12	5530	0	0	3	25	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	400	850	4500	800	600	550	800	550	30	500	31	12	1360	7	25	4240	13	12	1900	11	12	1460	19	20	6020	4	12	5060	0	0	3	22	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	400	700	4000	750	2800	2000	600	700	600	30	500	14	16	1560	7	25	3850	8	20	2330	10	16	3860	12	25	6830	4	12	4880	0	0	3	21	6
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	2800	2600	550	800	550	30	500	24	12	1560	7	25	3850	16	16	2100	15	16	2390	13	16	6080	5	12	4860	0	0	3	21	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900	600	700	600	30	500	14	16	1560	11	20	3650	21	16	2180	13	20	2780	12	25	6330	4	12	4730	0	0	3	20	6	
25.00	0.050	6000	800	800	400	700	4000	750	3800	2900</																													

Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

TIPO 2 R		GEOMETRIA											ATERIALE			Zap1 Ayinf		Zap2 Ayinf		VR Asup		VR Ahf		VR picl		Acofante														
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	A2	B2	H2	B3	H3	HA	B	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	250	8000	1000	1000	250	400	250	30	5000	5	12	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	10	12	6920	2	12	6680	0	0	0	0	2	37	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	300	8000	1400	300	400	250	30	5000	5	12	860	4	12	1060	5	12	860	4	12	1060	10	12	6920	2	12	6680	0	0	0	0	2	35	6	
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	450	2700	2200	450	400	250	30	5000	6	12	860	5	12	1100	12	16	1680	10	16	1760	10	16	7420	2	12	7180	2	12	6000	0	0	2	34	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	550	2700	2200	450	400	250	30	5000	6	12	860	6	12	1060	16	16	1900	23	16	2020	23	16	7420	2	12	7300	2	12	5700	0	0	2	33	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	650	2800	2700	500	400	250	30	5000	7	12	860	7	12	1060	24	16	2090	24	16	2270	24	16	7540	2	12	7500	2	12	5560	0	0	2	32	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	750	3100	3000	550	400	250	30	5000	8	12	860	8	12	1060	32	16	2260	32	16	2440	32	16	7820	2	12	7860	2	12	5380	0	0	2	31	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	850	3400	3400	600	400	250	30	5000	10	12	860	10	12	1060	40	16	2500	40	16	2660	40	16	8100	2	12	8140	2	12	5180	0	0	2	29	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	950	3700	3800	650	400	250	30	5000	12	12	860	12	12	1060	48	16	2710	48	16	2870	48	16	8380	2	12	8420	2	12	5020	0	0	2	28	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1050	4000	4000	700	400	250	30	5000	15	12	860	15	12	1060	60	16	2920	60	16	3080	60	16	8620	2	12	8660	2	12	4860	0	0	2	26	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1150	4300	4300	750	400	250	30	5000	17	12	860	17	12	1060	72	16	3130	72	16	3290	72	16	8860	2	12	8900	2	12	4700	0	0	2	25	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1250	4600	4600	800	400	250	30	5000	20	12	860	20	12	1060	90	16	3340	90	16	3500	90	16	9100	2	12	9140	2	12	4540	0	0	2	24	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1350	4900	4900	850	400	250	30	5000	25	12	860	25	12	1060	110	16	3550	110	16	3710	110	16	9340	2	12	9380	2	12	4380	0	0	2	23	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1450	5200	5200	900	400	250	30	5000	30	12	860	30	12	1060	130	16	3760	130	16	3920	130	16	9540	2	12	9580	2	12	4220	0	0	2	22	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1550	5500	5500	950	400	250	30	5000	35	12	860	35	12	1060	150	16	3970	150	16	4130	150	16	9740	2	12	9780	2	12	4060	0	0	2	21	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1650	5800	5800	1000	400	250	30	5000	40	12	860	40	12	1060	170	16	4180	170	16	4340	170	16	9940	2	12	9980	2	12	3900	0	0	2	20	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1750	6100	6100	1050	400	250	30	5000	50	12	860	50	12	1060	210	16	4390	210	16	4550	210	16	10140	2	12	10180	2	12	3740	0	0	2	19	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1850	6400	6400	1100	400	250	30	5000	60	12	860	60	12	1060	250	16	4600	250	16	4760	250	16	10340	2	12	10380	2	12	3580	0	0	2	18	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	1950	6700	6700	1150	400	250	30	5000	80	12	860	80	12	1060	310	16	4810	310	16	5070	310	16	10540	2	12	10580	2	12	3420	0	0	2	17	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2050	7000	7000	1200	400	250	30	5000	100	12	860	100	12	1060	370	16	5020	370	16	5380	370	16	10740	2	12	10780	2	12	3260	0	0	2	16	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2150	7300	7300	1250	400	250	30	5000	120	12	860	120	12	1060	430	16	5230	430	16	5690	430	16	10940	2	12	10980	2	12	3100	0	0	2	15	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2250	7600	7600	1300	400	250	30	5000	150	12	860	150	12	1060	510	16	5440	510	16	6000	510	16	11140	2	12	11180	2	12	2940	0	0	2	14	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2350	7900	7900	1350	400	250	30	5000	200	12	860	200	12	1060	610	16	5650	610	16	6310	610	16	11340	2	12	11380	2	12	2780	0	0	2	13	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2450	8200	8200	1400	400	250	30	5000	250	12	860	250	12	1060	730	16	5860	730	16	6620	730	16	11540	2	12	11580	2	12	2620	0	0	2	12	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2550	8500	8500	1450	400	250	30	5000	300	12	860	300	12	1060	870	16	6070	870	16	6930	870	16	11740	2	12	11780	2	12	2460	0	0	2	11	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2650	8800	8800	1500	400	250	30	5000	400	12	860	400	12	1060	1030	16	6280	1030	16	7240	1030	16	11940	2	12	11980	2	12	2300	0	0	2	10	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2750	9100	9100	1550	400	250	30	5000	500	12	860	500	12	1060	1210	16	6490	1210	16	7550	1210	16	12140	2	12	12180	2	12	2140	0	0	2	9	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2850	9400	9400	1600	400	250	30	5000	600	12	860	600	12	1060	1410	16	6700	1410	16	7860	1410	16	12340	2	12	12380	2	12	1980	0	0	2	8	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	2950	9700	9700	1650	400	250	30	5000	800	12	860	800	12	1060	1630	16	6910	1630	16	8170	1630	16	12540	2	12	12580	2	12	1820	0	0	2	7	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3050	10000	10000	1700	400	250	30	5000	1000	12	860	1000	12	1060	1870	16	7120	1870	16	8480	1870	16	12740	2	12	12780	2	12	1660	0	0	2	6	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3150	10300	10300	1750	400	250	30	5000	1200	12	860	1200	12	1060	2130	16	7330	2130	16	8790	2130	16	12940	2	12	12980	2	12	1500	0	0	2	5	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3250	10600	10600	1800	400	250	30	5000	1500	12	860	1500	12	1060	2410	16	7540	2410	16	9100	2410	16	13140	2	12	13180	2	12	1340	0	0	2	4	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3350	10900	10900	1850	400	250	30	5000	2000	12	860	2000	12	1060	2710	16	7750	2710	16	9410	2710	16	13340	2	12	13380	2	12	1180	0	0	2	3	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3450	11200	11200	1900	400	250	30	5000	2500	12	860	2500	12	1060	3030	16	7960	3030	16	9720	3030	16	13540	2	12	13580	2	12	1020	0	0	2	2	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3550	11500	11500	1950	400	250	30	5000	3000	12	860	3000	12	1060	3370	16	8170	3370	16	10030	3370	16	13740	2	12	13780	2	12	860	0	0	2	1	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3650	11800	11800	2000	400	250	30	5000	4000	12	860	4000	12	1060	3730	16	8380	3730	16	10340	3730	16	13940	2	12	13980	2	12	700	0	0	2	0	6
25.00	0.050	7000	200	200	8000	1200	3750	12100	12100	2050	400	250	30	5000	5000	12	860	5000	12	1060	4110	16	8590	4110	16	10650	4110	16	14140	2	12	14180	2	12	540	0	0	2	0	6
25.00	0.050	7000	20																																					



















Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO 5R			GEOMETRIA			ATERIALE			ZaplAxinf			ZaplAyinf			Ax sup			Apiel			Acortante			
		L (mm)	N1 (kN)	N2 (kN)	A1 (mm)	B1 (mm)	HI (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)
15,00	0,050	5000	200	200	5400	700	600	30	500	4	12	5,260	26	12	600	3	2,5	5,340	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	200	600	6450	1200	550	30	500	10	12	6,310	29	12	1100	9	16	6,390	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	200	1000	6950	1800	550	30	500	15	16	6,810	52	12	1650	15	12	6,890	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	200	1400	7350	2300	600	30	500	16	20	7,210	49	16	1700	13	12	7,290	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	200	1800	7600	2700	700	30	500	20	20	7,460	38	20	2,000	10	12	7,540	6	20	7,460	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	200	2200																						
15,00	0,050	5000	600	200	5400	2800	600	30	500	14	12	5,260	30	16	1,800	25	12	5,340	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	600	600	5600	1700	600	30	500	9	12	5,460	35	12	1,600	14	20	5,540	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	600	1000	6000	2200	600	30	500	11	12	5,860	49	12	1,750	15	20	5,940	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	600	1400	6550	2700	600	30	500	22	12	6,410	53	16	1,700	10	2,5	6,490	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	600	1800	7000	2800	700	30	500	12	20	6,860	57	16	1,900	17	16	6,940	16	12	6,860	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	600	2200	7550	2900	800	30	500	18	20	7,410	60	16	2,150	25	12	7,490	20	12	7,410	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1000	200	5800	4000	750	30	500	24	12	5,660	37	20	2,100	30	12	5,740	24	12	5,660	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1000	600	5400	3000	700	30	500	17	12	5,260	42	16	1,950	24	16	5,340	6	20	5,260	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1000	1000	5550	2700	650	30	500	14	12	5,410	44	16	1,800	21	20	5,490	14	12	5,410	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1000	1400	6250	2900	700	30	500	17	12	6,110	47	16	1,950	19	20	6,190	16	12	6,110	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1000	1800	6700	3200	750	30	500	14	16	6,560	56	16	2,000	25	16	6,640	20	12	6,560	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1000	2200	7250	3400	800	30	500	22	16	7,110	45	20	2,200	22	16	7,190	8	20	7,110	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1400	200																						
15,00	0,050	5000	1400	600																						
15,00	0,050	5000	1400	1000																						
15,00	0,050	5000	1400	1400	5950	3700	900	30	500	27	12	5,810	34	20	2,450	29	16	5,890	10	20	5,810	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1800	200	6700	3800	900	30	500	28	12	6,560	40	20	2,450	29	16	6,640	10	20	6,560	0	0	0	0	0
15,00	0,050	5000	1800	2200																						
15,00	0,050	5000	1800	600																						
15,00	0,050	5000	1800	1000																						
15,00	0,050	5000	1800	1400																						
15,00	0,050	5000	1800	1800																						
15,00	0,050	5000	1800	2200																						
15,00	0,050	5000	2200	200																						
15,00	0,050	5000	2200	600																						
15,00	0,050	5000	2200	1000																						
15,00	0,050	5000	2200	1400																						
15,00	0,050	5000	2200	1800																						
15,00	0,050	5000	2200	2200																						



Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R										GEOMETRIA			ATERIALE			Zap1Axinf			Zap1Ayinf			Ax sup			A pie1			Acortante		
T	K	L	N1	N2	A1	B1	HI	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	
15,00	0,050	7000	200	200	7400	500	1050	30	500	3	16	7,260	62	12	400	4	20	7,340	6	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	200	600	9300	800	950	30	500	6	16	9,160	71	12	700	7	16	9,240	4	16	9,160	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	200	1000	9950	1200	900	30	500	9	20	9,810	72	12	1,800	7	16	9,890	10	12	9,810	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	200	1400	9950	1800	850	30	500	14	20	9,810	68	12	1,700	14	12	9,890	14	12	9,810	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	200	1800	10000	2300	850	30	500	19	20	9,860	33	20	2,200	15	12	9,940	16	12	9,860	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	200	2200	10100	2800	850	30	500	16	25	9,960	71	16	2,300	15	12	10,040	20	12	9,960	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	600	200	7400	2100	850	30	500	8	16	7,260	51	12	1,200	8	25	7,490	10	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	600	600	7550	1300	900	30	500	10	12	7,410	55	12	1,200	8	25	7,490	10	12	7,410	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	600	1000	8450	1500	950	30	500	12	12	8,310	36	16	1,400	8	25	8,390	12	12	8,310	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	600	1400	8850	2100	850	30	500	11	16	8,710	60	12	2,000	15	20	8,790	16	12	8,710	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	600	1800	9150	2500	850	30	500	17	16	9,010	51	16	2,400	15	20	9,090	10	16	9,010	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	600	2200	9350	3000	850	30	500	23	16	9,210	68	16	2,300	22	16	9,290	12	16	9,210	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	1000	200	7450	3000	900	30	500	24	12	7,310	31	16	2,800	10	25	7,390	6	25	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,050	7000	1000	600	7400	2300	850	30	500	9	16	7,260	63	12	2,200	19	20	7,340	16	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1000	1000	7400	2200	900	30	500	16	12	7,260	56	12	2,100	14	25	7,340	16	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1000	1400	8300	2300	950	30	500	10	16	8,160	63	12	2,200	13	25	8,240	10	16	8,160	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1000	1800	8600	2600	950	30	500	20	12	8,460	43	16	2,500	21	20	8,540	22	12	8,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1000	2200	8600	3400	850	30	500	25	12	8,460	72	16	2,250	26	20	8,540	24	12	8,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1400	200	7400	4500	950	30	500	35	12	7,260	48	20	2,550	39	12	7,340	20	16	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1400	600	7450	3500	850	30	500	14	16	7,310	25	20	2,650	23	20	7,390	14	16	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1400	1000	7400	3000	850	30	500	21	12	7,260	57	16	2,300	18	25	7,340	12	16	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1400	1400	7600	3000	900	30	500	22	12	7,460	57	16	2,450	19	25	7,540	22	12	7,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1400	1800	8450	3000	950	30	500	23	12	8,310	59	16	2,600	17	25	8,390	24	12	8,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1400	2200	8400	3400	950	30	500	26	12	8,260	65	16	2,550	19	25	8,340	28	12	8,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1800	200																										
15,00	0,050	7000	1800	600																										
15,00	0,050	7000	1800	1000																										
15,00	0,050	7000	1800	1400	7400	3600	950	30	500	28	12	7,260	48	20	2,500	21	25	7,340	10	20	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1800	1800	8150	3500	950	30	500	27	12	8,010	51	20	2,550	21	25	8,090	28	12	8,010	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	1800	2200	8350	3800	950	30	500	29	12	8,210	58	20	2,500	22	25	8,290	30	12	8,210	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,050	7000	2200	200																										
15,00	0,050	7000	2200	600																										
15,00	0,050	7000	2200	1000																										
15,00	0,050	7000	2200	1400																										
15,00	0,050	7000	2200	1800																										
15,00	0,050	7000	2200	2200																										

TIPO 5R				GEOMETRIA				ATERIALE		Zap1A xinf			Zap1A yinf			Ax s up			A pie1			A cortante		
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	Ramas	n	Ø
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			(mm)
15.00	0.100	5000	200	200	5500	600	800	30	500	4	12	5.360	20	16	500	5	16	5.440	4	12	5.360	0	0	0
15.00	0.100	5000	200	600	7100	900	750	30	500	4	20	6.960	24	16	800	6	16	7.040	6	12	6.960	0	0	0
15.00	0.100	5000	200	1000	7400	1500	700	30	500	6	2.5	7.260	42	12	1400	10	12	7.340	2	2.5	7.260	0	0	0
15.00	0.100	5000	200	1400	7600	2000	700	30	500	16	20	7.460	63	12	1900	10	12	7.540	4	20	7.460	0	0	0
15.00	0.100	5000	200	1800	7650	2600	700	30	500	21	20	7.510	57	16	1900	10	12	7.590	16	12	7.510	0	0	0
15.00	0.100	5000	200	2200																				
15.00	0.100	5000	600	200	5400	2300	750	30	500	14	12	5.260	35	12	2.200	8	20	5.340	14	12	5.260	0	0	0
15.00	0.100	5000	600	600	5700	1600	700	30	500	9	12	5.560	32	12	1.600	11	20	5.640	10	12	5.560	0	0	0
15.00	0.100	5000	600	1000	6450	1900	700	30	500	12	12	6.310	38	12	1.800	11	20	6.390	6	16	6.310	0	0	0
15.00	0.100	5000	600	1400	6750	2300	700	30	500	8	20	6.610	36	16	2.050	17	16	6.690	8	16	6.610	0	0	0
15.00	0.100	5000	600	1800	7000	2800	700	30	500	12	20	6.860	57	16	1.900	17	16	6.940	16	12	6.860	0	0	0
15.00	0.100	5000	600	2200	7550	2900	800	30	500	18	20	7.410	60	16	2.150	14	16	7.490	20	12	7.410	0	0	0
15.00	0.100	5000	1000	200	5500	3900	750	30	500	24	12	5.360	34	20	2.100	30	12	5.440	24	12	5.360	0	0	0
15.00	0.100	5000	1000	600	5400	3000	700	30	500	17	12	5.260	42	16	1.950	24	16	5.340	6	20	5.260	0	0	0
15.00	0.100	5000	1000	1000	5450	2800	700	30	500	16	12	5.310	39	16	1.950	19	20	5.390	16	12	5.310	0	0	0
15.00	0.100	5000	1000	1400	6300	2900	700	30	500	17	12	6.160	47	16	1.950	18	20	6.240	16	12	6.160	0	0	0
15.00	0.100	5000	1000	1800	6700	3200	750	30	500	14	16	6.560	56	16	2.000	16	20	6.640	20	12	6.560	0	0	0
15.00	0.100	5000	1000	2200	7250	3400	800	30	500	22	16	7.110	45	20	2.200	22	16	7.190	8	20	7.110	0	0	0
15.00	0.100	5000	1400	200																				
15.00	0.100	5000	1400	600																				
15.00	0.100	5000	1400	1000																				
15.00	0.100	5000	1400	1400	5950	3700	900	30	500	27	12	5.810	34	20	2.450	29	16	5.890	10	20	5.810	0	0	0
15.00	0.100	5000	1400	1800	6650	3800	900	30	500	28	12	6.510	39	20	2.450	29	16	6.590	28	12	6.510	0	0	0
15.00	0.100	5000	1400	2200																				
15.00	0.100	5000	1800	200																				
15.00	0.100	5000	1800	600																				
15.00	0.100	5000	1800	1000																				
15.00	0.100	5000	1800	1400																				
15.00	0.100	5000	1800	1800																				
15.00	0.100	5000	1800	2200																				
15.00	0.100	5000	2200	200																				
15.00	0.100	5000	2200	600																				
15.00	0.100	5000	2200	1000																				
15.00	0.100	5000	2200	1400																				
15.00	0.100	5000	2200	1800																				
15.00	0.100	5000	2200	2200																				

TIPO 5R												ATERIALE		Zapl Axinf		Zapl Ayinf		Ax sup		Apl el		Acortante	
T	K	L	N1	N2	GEOMETRIA		ATERIALE		Zapl Axinf		Zapl Ayinf		Ax sup		Apl el		Acortante						
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	Ramas	n	Ø			
15,00	0,100	6000	200	200	6500	500	1050	30	500	3	16	6.360	31	16	400	3	20	6.440	6	12	6.360	0	0
15,00	0,100	6000	200	600	8400	800	950	30	500	6	16	8.260	36	16	700	6	16	8.340	4	16	8.260	0	0
15,00	0,100	6000	200	1000	9000	1200	900	30	500	6	25	8.860	65	12	1000	9	12	8.940	10	12	8.860	0	0
15,00	0,100	6000	200	1400	9150	1700	900	30	500	10	25	9.010	66	12	1600	9	12	9.090	14	12	9.010	0	0
15,00	0,100	6000	200	1800	8900	2400	850	30	500	18	20	8.760	48	16	2.300	11	12	8.840	6	20	8.760	0	0
15,00	0,100	6000	200	2200																			
15,00	0,100	6000	600	200	6400	2000	900	30	500	15	12	6.260	46	12	2.000	8	20	6.340	16	12	6.260	0	0
15,00	0,100	6000	600	600	6400	1500	900	30	500	11	12	6.260	46	12	1400	11	20	6.340	4	20	6.260	0	0
15,00	0,100	6000	600	1000	7400	1700	900	30	500	7	16	7.260	53	12	1600	11	20	7.340	14	12	7.260	0	0
15,00	0,100	6000	600	1400	8300	1900	900	30	500	14	16	8.160	60	12	1800	15	16	8.240	14	12	8.160	0	0
15,00	0,100	6000	600	1800	8350	2400	850	30	500	18	16	8.210	29	20	2.300	17	16	8.290	4	25	8.210	0	0
15,00	0,100	6000	600	2200	8600	2800	850	30	500	17	20	8.460	60	16	2.300	17	16	8.540	20	12	8.460	0	0
15,00	0,100	6000	800	200	6400	3400	900	30	500	25	12	6.260	42	16	2.500	18	16	6.340	14	16	6.260	0	0
15,00	0,100	6000	800	600	6400	2600	900	30	500	19	12	6.260	21	20	2.500	15	20	6.340	20	12	6.260	0	0
15,00	0,100	6000	1000	1000	6550	2400	900	30	500	10	16	6.410	54	12	2.300	18	20	6.490	10	16	6.410	0	0
15,00	0,100	6000	1000	1400	7850	2400	900	30	500	10	16	7.710	65	12	2.300	16	20	7.790	18	12	7.710	0	0
15,00	0,100	6000	800	1800	7800	2800	850	30	500	13	16	7.660	48	16	2.400	18	20	7.740	20	12	7.660	0	0
15,00	0,100	6000	800	2200	7900	3200	850	30	500	18	16	7.760	62	16	2.300	19	20	7.840	22	12	7.760	0	0
15,00	0,100	6000	400	200																			
15,00	0,100	6000	400	600	6400	4100	900	30	500	17	16	6.260	27	25	2.600	33	16	6.340	30	12	6.260	0	0
15,00	0,100	6000	400	1000	6400	3400	900	30	500	14	16	6.260	52	16	2.400	22	20	6.340	14	16	6.260	0	0
15,00	0,100	6000	400	1400	6700	3300	900	30	500	24	12	6.560	52	16	2.400	24	20	6.640	24	12	6.560	0	0
15,00	0,100	6000	400	1800	7800	3200	850	30	500	22	12	7.660	65	16	2.250	15	25	7.740	8	20	7.660	0	0
15,00	0,100	6000	400	2200	7800	3600	850	30	500	15	16	7.660	49	20	2.300	25	20	7.740	14	16	7.660	0	0
15,00	0,100	6000	800	200																			
15,00	0,100	6000	800	600																			
15,00	0,100	6000	800	1000																			
15,00	0,100	6000	800	1400																			
15,00	0,100	6000	800	1800																			
15,00	0,100	6000	200	200																			
15,00	0,100	6000	200	600																			
15,00	0,100	6000	200	1000																			
15,00	0,100	6000	200	1400																			
15,00	0,100	6000	200	1800																			
15,00	0,100	6000	200	2200																			

T		TIPO 5R					GEOMETRIA				ATERIALE				Zap1 Axinf				Zap1 Ayinf				Axsup				Apiel				Acortante							
(N/mm2)	(N/mm3)	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L				
15,00	0,100	0,100	7000	200	200	7400	500	1500	30	500	3	16	7,260	28	20	400	4	20	7,340	6	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15,00	0,100	0,100	7000	200	600	9800	700	1250	30	500	6	16	9,660	55	16	600	5	16	9,740	8	12	9,660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15,00	0,100	0,100	7000	200	1000	10650	1000	1150	30	500	6	25	10,510	55	16	900	8	12	10,590	10	12	10,510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15,00	0,100	0,100	7000	200	1400	10600	1500	1100	30	500	9	25	10,460	53	16	1400	9	12	10,540	14	12	10,460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15,00	0,100	0,100	7000	200	1800	10750	1900	1100	30	500	12	25	10,610	53	16	1800	8	12	10,690	4	25	10,610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15,00	0,100	0,100	7000	600	200	7400	1700	1100	30	500	15	12	7,260	37	16	1600	8	20	7,340	16	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
15,00	0,100	0,100	7000	600	600	7450	1400	1100	30	500	7	16	7,310	37	16	1300	10	20	7,390	14	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15,00	0,100	0,100	7000	600	1000	8750	1500	1100	30	500	8	16	8,610	77	12	1400	10	20	8,690	14	12	8,610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15,00	0,100	0,100	7000	600	1400	9650	1700	1100	30	500	13	16	9,510	48	16	1600	15	16	9,590	6	20	9,510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
15,00	0,100	0,100	7000	600	1800	9900	2000	1100	30	500	12	20	9,760	87	12	1900	10	20	9,840	20	12	9,760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	600	2200	10200	2400	1050	30	500	17	20	10,060	48	16	2300	16	16	10,140	12	16	10,060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	1000	200	7400	3000	1100	30	500	15	16	7,260	65	12	2,900	17	16	7,340	28	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	1000	600	7400	2400	1100	30	500	12	16	7,260	37	16	2,400	17	20	7,340	22	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	1000	1000	7450	2200	1100	30	500	11	16	7,310	37	16	2,400	17	20	7,390	20	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	1000	1400	7850	2500	1100	30	500	22	12	7,710	39	16	2,400	19	20	7,790	24	12	7,710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	1000	1800	8800	2600	1100	30	500	23	12	8,660	44	16	2,500	17	20	8,740	24	12	8,660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	1000	2200	9250	2800	1050	30	500	18	16	9,110	51	16	2,700	17	20	9,190	26	12	9,110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	1400	200	7450	4400	1100	30	500	15	20	7,310	62	16	2,850	35	12	7,390	40	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	1400	600	7550	3600	1100	30	500	18	16	7,410	54	16	2,900	20	20	7,490	34	12	7,410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	1400	1000	7450	3000	1100	30	500	15	16	7,310	66	12	2,900	13	25	7,390	10	20	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	1400	1400	7650	3000	1100	30	500	15	16	7,510	46	16	2,900	23	20	7,590	10	20	7,510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	1400	1800	8950	2900	1050	30	500	14	16	8,810	35	20	2,800	23	20	8,890	14	16	8,810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	1400	2200	9100	3200	1050	30	500	27	12	8,960	61	16	2,850	23	20	9,040	16	16	8,960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	800	200																																	
15,00	0,100	0,100	7000	800	600																																	
15,00	0,100	0,100	7000	800	1000																																	
15,00	0,100	0,100	7000	800	1400	7450	3700	1100	30	500	19	16	7,310	41	20	3,000	27	20	7,390	34	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,100	0,100	7000	800	1800	7550	3900	1100	30	500	35	12	7,410	43	20	3,000	30	20	7,490	36	12	7,410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	800	2200	8800	3700	1050	30	500	31	12	8,660	50	20	2,850	29	20	8,740	18	16	8,660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,100	0,100	7000	2200	200																																	
15,00	0,100	0,100	7000	2200	600																																	
15,00	0,100	0,100	7000	2200	1000																																	
15,00	0,100	0,100	7000	2200	1400																																	
15,00	0,100	0,100	7000	2200	1800																																	
15,00	0,100	0,100	7000	2200	2200																																	



Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R										GEOMETRIA			ATERIALE			Zapl'Axinf			Zapl'Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante							
T	K	L	N1	N2	A1	B1	HI	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	
15,00	0,200	5000	200	200	5400	600	1000	30	500	5	12	5.260	43	12	500	3	20	5.340	6	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,200	5000	200	600	7300	900	900	30	500	4	20	7.160	53	12	800	8	12	7.240	4	16	7.160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,200	5000	200	1000	7750	1300	900	30	500	9	20	7.610	56	12	1.200	7	12	7.690	10	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,200	5000	200	1400	7650	2000	850	30	500	8	25	7.510	52	12	1.900	8	12	7.590	8	16	7.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,200	5000	200	1800	7700	2600	850	30	500	17	20	7.560	45	16	2.400	10	12	7.640	10	16	7.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,200	5000	200	2200																															
15,00	0,200	5000	600	200	5400	2200	850	30	500	15	12	5.260	37	12	2.100	12	16	5.340	16	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
15,00	0,200	5000	600	600	5400	1800	850	30	500	7	16	5.260	37	12	1.700	15	16	5.340	14	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	600	1000	6250	2000	850	30	500	14	12	6.110	43	12	1.900	15	16	6.190	14	12	6.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	600	1400	6800	2300	850	30	500	12	16	6.660	50	12	2.200	15	16	6.740	16	12	6.660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	600	1800	7200	2600	850	30	500	18	16	7.060	42	16	2.400	15	16	7.140	10	16	7.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	600	2200	7550	2900	850	30	500	17	20	7.410	54	16	2.300	24	12	7.490	12	16	7.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1000	200	5400	4000	850	30	500	28	12	5.260	42	16	2.300	28	12	5.340	10	20	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1000	600	5400	3100	850	30	500	21	12	5.260	34	16	2.400	21	16	5.340	12	16	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1000	1000	5550	2800	850	30	500	19	12	5.410	32	16	2.400	15	20	5.490	20	12	5.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1000	1400	6050	3100	850	30	500	21	12	5.910	38	16	2.400	24	16	5.990	12	16	5.910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1000	1800	6400	3400	850	30	500	23	12	6.260	46	16	2.300	25	16	6.340	24	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1000	2200	6950	3600	850	30	500	20	16	6.810	41	20	2.300	24	16	6.890	14	16	6.810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1400	200																															
15,00	0,200	5000	1400	600																															
15,00	0,200	5000	1400	1000																															
15,00	0,200	5000	1400	1400	5950	3700	900	30	500	27	12	5.810	34	20	2.450	29	16	5.890	10	20	5.810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1800	200	6650	3800	900	30	500	28	12	6.510	39	20	2.450	29	16	6.590	28	12	6.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,00	0,200	5000	1800	600																															
15,00	0,200	5000	1800	1000																															
15,00	0,200	5000	1800	1400																															
15,00	0,200	5000	1800	1800																															
15,00	0,200	5000	2200	200																															
15,00	0,200	5000	2200	600																															
15,00	0,200	5000	2200	1000																															
15,00	0,200	5000	2200	1400																															
15,00	0,200	5000	2200	1800																															
15,00	0,200	5000	2200	2200																															

TIPO 5R				GEOMETRIA				ATERIALE		Zapl Axinf				Zapl Ayinf				Ax sup				Apiel		Acortante		
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ramas	n	Ø	
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)			(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			(mm)		
15,00	0,200	6000	200	200	6400	600	1300	30	500	4	16	6.260	24	20	500	3	20	6.340	8	12	6.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	200	600	8500	800	1200	30	500	6	16	8.360	46	16	700	5	16	8.440	8	12	8.360	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	200	8000	9100	1200	1150	30	500	5	25	8.960	47	16	1000	8	12	9.040	12	12	8.960	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	200	1400	9200	1700	1100	30	500	12	20	9.060	46	16	1600	7	12	9.140	16	12	9.060	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	200	1800	9150	2300	1100	30	500	15	20	9.030	46	16	2.200	9	12	9.090	12	16	9.010	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	200	2200																						
15,00	0,200	6000	600	200	6400	900	1100	30	500	17	12	6.260	57	12	1800	11	16	6.340	4	25	6.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	600	600	6600	1500	1150	30	500	8	16	6.460	34	16	1400	9	20	6.540	8	16	6.460	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	600	8000	7300	1800	1100	30	500	16	12	7.160	64	12	1700	10	20	7.240	6	20	7.160	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	600	1400	8200	2000	1100	30	500	12	16	8.060	41	16	1900	15	16	8.140	20	12	8.060	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	600	1800	8550	2300	1100	30	500	18	16	8.410	43	16	2.200	14	16	8.490	12	16	8.410	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	600	2200	9150	2500	1100	30	500	16	20	9.010	46	16	2.400	13	16	9.090	24	12	9.010	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1000	200	6550	3400	1100	30	500	17	16	6.410	34	16	3.150	27	12	6.490	32	12	6.410	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1000	600	6400	2700	1100	30	500	24	12	6.260	21	20	2.600	21	16	6.340	14	16	6.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1000	1000	6550	2500	1100	30	500	13	16	6.410	33	16	2.400	15	20	6.490	24	12	6.410	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1000	1400	7000	2800	1100	30	500	25	12	6.860	62	12	2.700	16	20	6.940	26	12	6.860	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1000	1800	7400	3100	1100	30	500	16	16	7.260	37	16	3.000	26	16	7.340	28	12	7.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1000	2200	7950	3300	1100	30	500	29	12	7.810	48	16	3.050	25	16	7.890	30	12	7.810	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1400	200																						
15,00	0,200	6000	1400	600	6400	4200	1100	30	500	37	12	6.260	57	12	3.000	28	16	6.340	14	20	6.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1400	8000	6400	3500	1100	30	500	31	12	6.260	44	16	2.950	30	16	6.340	32	12	6.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1400	1400	6550	3500	1100	30	500	18	16	6.410	45	16	2.950	21	20	6.490	32	12	6.410	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1400	1800	6900	3800	1100	30	500	19	16	6.760	51	16	2.900	22	20	6.840	20	16	6.760	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1400	2200	8400	3500	1100	30	500	18	16	8.260	74	12	3.000	19	20	8.340	32	12	8.260	0	0	0	0	
15,00	0,200	6000	1800	200																						
15,00	0,200	6000	1800	600																						
15,00	0,200	6000	1800	8000																						
15,00	0,200	6000	1800	1400																						
15,00	0,200	6000	1800	1800																						
15,00	0,200	6000	2200	200																						
15,00	0,200	6000	2200	600																						
15,00	0,200	6000	2200	1000																						
15,00	0,200	6000	2200	1400																						
15,00	0,200	6000	2200	1800																						
15,00	0,200	6000	2200	2200																						

T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>3</sup> )	TIPO SR			GEOMETRIA					ATERIALE			Zap1 A xinf			Zap1 Ayinf			Ax s sup			Apiel			Acortante				
		L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	HI (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)
15.00	0.200	7000	200	200	7400	500	1650	3.0	500	4	16	7.260	35	20	400	3	20	7.340	8	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	200	600	9550	800	1500	3.0	500	6	16	9.410	42	20	700	5	16	9.490	6	16	9.410	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	200	1000	10200	1200	1400	3.0	500	5	25	10.060	41	20	1100	8	12	10.140	8	16	10.060	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	200	1400	10750	1500	1400	3.0	500	12	20	10.610	68	16	1400	7	12	10.690	10	16	10.610	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	200	1800	10700	2000	1350	3.0	500	15	20	10.560	65	16	1900	8	12	10.640	24	12	10.560	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	200	2200	7600	1700	1400	3.0	500	11	16	7.460	48	16	1600	11	16	7.540	20	12	7.460	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	600	600	7500	1400	1400	3.0	500	9	16	7.360	48	16	1300	9	20	7.440	6	20	7.360	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	600	1000	8250	1700	1400	3.0	500	7	20	8.110	34	20	1600	10	20	8.190	12	16	8.110	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	600	1400	9600	1800	1350	3.0	500	12	16	9.460	59	16	1700	9	20	9.540	22	12	9.460	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	600	1800	9850	2100	1350	3.0	500	17	16	9.710	60	16	2.000	9	20	9.790	24	12	9.710	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	600	2200	10550	2300	1350	3.0	500	16	20	10.410	41	20	2.200	8	20	10.490	26	12	10.410	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1000	200	7400	3100	1350	3.0	500	12	20	7.260	45	16	3.000	26	12	7.340	20	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1000	600	7400	2500	1350	3.0	500	10	20	7.260	29	20	2.400	21	16	7.340	16	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1000	1000	7500	2300	1350	3.0	500	14	16	7.360	46	16	2.200	15	20	7.440	26	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1000	1400	7950	2600	1350	3.0	500	16	16	7.810	31	20	2.500	11	25	7.890	30	12	7.810	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1000	1800	8650	2800	1350	3.0	500	17	16	8.510	53	16	2.700	17	20	8.590	32	12	8.510	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1000	2200	9200	3000	1350	3.0	500	19	16	9.060	56	16	2.900	25	16	9.140	34	12	9.060	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1400	200	7400	3800	1350	3.0	500	23	16	7.260	45	16	3.700	27	16	7.340	44	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1400	600	7400	3200	1350	3.0	500	20	16	7.260	45	16	3.100	19	20	7.340	36	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1400	1000	7550	3200	1350	3.0	500	20	16	7.410	46	16	3.100	21	20	7.490	36	12	7.410	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1400	1800	7650	3600	1350	3.0	500	22	16	7.510	30	20	3.500	24	20	7.590	42	12	7.510	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1400	2200	8850	3500	1350	3.0	500	14	20	8.710	54	16	3.400	21	20	8.790	40	12	8.710	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1800	200																									
15.00	0.200	7000	1800	600																									
15.00	0.200	7000	1800	1000																									
15.00	0.200	7000	1800	1400	7750	4000	1350	3.0	500	25	16	7.610	57	16	3.550	26	20	7.690	46	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0	
15.00	0.200	7000	1800	2000																									
15.00	0.200	7000	2200	200																									
15.00	0.200	7000	2200	600																									
15.00	0.200	7000	2200	1000																									
15.00	0.200	7000	2200	1400																									
15.00	0.200	7000	2200	1800																									
15.00	0.200	7000	2200	2200																									

T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	TIPO 5R			GEOMETRIA			ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			ApieI			Acortante		
			N1 (KN)	N2 (KN)	N1 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	HI (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n
15,00	0,300	5000	200	200	5500	600	1150	30	500	4	16	5.360	29	16	500	3	20	5.440	6	12	5.360	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	200	600	7200	900	1050	30	500	6	16	7.060	34	16	800	8	12	7.140	8	12	7.060	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	200	1000	7650	1400	1000	30	500	12	16	7.510	61	12	1.300	7	12	7.590	12	12	7.510	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	200	1400	7750	2000	1000	30	500	11	20	7.610	62	12	1.900	8	12	7.690	6	20	7.610	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	200	1800	7650	2700	950	30	500	23	16	7.510	40	16	2.600	10	12	7.590	12	16	7.510	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	200	2200																						
15,00	0,300	5000	600	200	5400	2200	1000	30	500	10	16	5.260	43	12	2.200	19	12	5.340	18	12	5.260	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	600	600	5650	1700	1000	30	500	14	12	5.510	45	12	1.600	13	16	5.590	14	12	5.510	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	600	1000	6100	2100	1000	30	500	17	12	5.960	49	12	2.000	15	16	6.040	4	25	5.960	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	600	1400	6750	2400	1000	30	500	11	16	6.610	54	12	2.300	9	20	6.690	20	12	6.610	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	600	1800	7150	2700	950	30	500	11	20	7.010	38	16	2.600	24	12	7.090	12	16	7.010	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	600	2200	7650	2900	950	30	500	10	25	7.510	50	16	2.600	21	12	7.590	24	12	7.510	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1000	200	5400	4000	1000	30	500	18	16	5.260	36	16	2.700	25	12	5.340	12	20	5.260	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1000	600	5400	3100	1000	30	500	14	16	5.260	29	16	2.850	20	16	5.340	26	12	5.260	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1000	1000	5950	2700	1000	30	500	22	12	5.810	27	16	2.600	13	20	5.890	22	12	5.810	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1000	1400	6800	2800	950	30	500	22	12	6.660	35	16	2.700	13	20	6.740	22	12	6.660	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1000	1800	6950	3200	950	30	500	25	12	6.810	42	16	2.650	21	16	6.890	14	16	6.810	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1000	2200	7050	3600	950	30	500	19	16	6.910	54	16	2.550	22	16	6.990	10	20	6.910	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1400	200																						
15,00	0,300	5000	1400	600																						
15,00	0,300	5000	1400	1000																						
15,00	0,300	5000	1400	1400	5750	3900	1000	30	500	32	12	5.610	47	16	2.650	30	16	5.690	18	16	5.610	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1800	200	6600	3900	1000	30	500	18	16	6.460	55	12	2.750	33	16	6.540	18	16	6.460	0	0	0	0	0
15,00	0,300	5000	1800	2200																						
15,00	0,300	5000	1800	600																						
15,00	0,300	5000	1800	1000																						
15,00	0,300	5000	1800	1400																						
15,00	0,300	5000	1800	1800																						
15,00	0,300	5000	1800	2200																						
15,00	0,300	5000	2200	200																						
15,00	0,300	5000	2200	600																						
15,00	0,300	5000	2200	1000																						
15,00	0,300	5000	2200	1400																						
15,00	0,300	5000	2200	1800																						
15,00	0,300	5000	2200	2200																						

TIPO 5R					GEOMETRIA			ATERIALE		Zap1Axinf			Zap1Ayinf			Ax sup			Apie1			Acortante			
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ramas	n	Ø
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)			(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			(mm)	
15,00	0,300	6000	200	200	6400	600	1450	30	500	4	16	6.260	42	16	500	3	20	6.340	8	12	6.260	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	200	600	8250	900	1350	30	500	6	16	8.100	50	16	800	8	12	8.190	6	16	8.100	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	200	1000	9150	1200	1300	30	500	5	25	9.010	54	16	1000	7	12	9.090	14	12	9.010	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	200	1400	9100	1800	1250	30	500	11	20	8.960	51	16	1700	7	12	9.040	20	12	8.960	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	200	1800	9200	2300	1250	30	500	15	20	9.060	33	20	2.200	9	12	9.140	24	12	9.060	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	200	2200																					
15,00	0,300	6000	600	200	6650	1900	1250	30	500	11	16	6.510	24	20	1800	10	16	6.590	20	12	6.510	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	600	600	6400	1600	1300	30	500	6	20	6.260	24	20	1500	14	16	6.340	10	16	6.260	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	600	1000	7150	1900	1250	30	500	11	16	7.010	41	16	1800	15	16	7.090	20	12	7.010	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	600	1400	8050	2100	1250	30	500	12	16	7.910	29	20	2.000	14	16	7.990	22	12	7.910	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	600	1800	8500	2400	1250	30	500	17	16	8.360	48	16	2.300	13	16	8.440	14	16	8.360	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	600	2200	8850	2700	1250	30	500	23	16	8.710	50	16	2.700	12	16	8.790	16	16	8.710	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1000	200	6400	3500	1250	30	500	20	16	6.260	36	16	3.400	24	12	6.340	38	12	6.260	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1000	600	6400	2800	1250	30	500	16	16	6.260	23	20	2.700	20	16	6.340	30	12	6.260	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1000	1000	6750	2500	1250	30	500	9	20	6.610	38	16	2.400	14	20	6.690	26	12	6.610	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1000	1400	6750	3000	1250	30	500	11	20	6.610	38	16	2.900	25	16	6.690	18	16	6.610	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1000	1800	7400	3200	1250	30	500	18	16	7.260	42	16	3.100	25	16	7.340	12	20	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1000	2200	8450	3200	1250	30	500	18	16	8.310	48	16	3.100	21	16	8.390	12	20	8.310	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1400	200																					
15,00	0,300	6000	1400	600	6400	3600	1250	30	500	13	20	6.260	39	16	3.400	28	16	6.340	38	12	6.260	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1400	1000	6550	3600	1250	30	500	13	20	6.410	40	16	3.400	31	16	6.490	14	20	6.410	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1400	1400	7100	3800	1250	30	500	22	16	6.960	45	16	3.400	20	20	7.040	40	12	6.960	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1400	1800	7600	4000	1250	30	500	15	20	7.460	51	16	3.350	20	20	7.540	42	12	7.460	0	0	0	0
15,00	0,300	6000	1800	200																					
15,00	0,300	6000	1800	600																					
15,00	0,300	6000	1800	1000																					
15,00	0,300	6000	1800	1400																					
15,00	0,300	6000	1800	1800																					
15,00	0,300	6000	2200	200																					
15,00	0,300	6000	2200	600																					
15,00	0,300	6000	2200	1000																					
15,00	0,300	6000	2200	1400																					
15,00	0,300	6000	2200	1800																					
15,00	0,300	6000	2200	2200																					

TIP O 5R				GEOMETRIA				ATERIALE		Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			ApieI			Acortante			
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ramas	n	Ø
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)				(mm)
15,00	0,300	7000	200	200	7400	600	1800	30	500	5	16	7.260	60	16	500	3	20	7.340	10	12	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	200	600	9650	800	1700	30	500	4	20	9.510	47	20	700	5	16	9.590	12	12	9.510	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	200	1000	10300	1200	1600	30	500	7	20	10.160	74	16	1.000	7	12	10.240	18	12	10.160	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	200	1400	10650	1600	1550	30	500	11	20	10.510	74	16	1.500	6	12	10.590	12	16	10.510	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	200	1800	10650	2100	1550	30	500	9	25	10.510	74	16	2.000	8	12	10.590	16	16	10.510	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	200	2200																					
15,00	0,300	7000	600	200	7400	800	1600	30	500	13	16	7.260	53	16	1.700	10	16	7.340	14	16	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	600	600	7800	1400	1600	30	500	11	16	7.660	56	16	1.300	8	20	7.740	20	12	7.660	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	600	1000	8200	1800	1550	30	500	8	20	8.060	57	16	1.700	15	16	8.140	24	12	8.060	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	600	1400	9150	2000	1550	30	500	14	16	9.010	41	20	1.900	14	16	9.090	26	12	9.010	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	600	1800	9850	2200	1550	30	500	10	20	9.710	44	20	2.100	13	16	9.790	30	12	9.710	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	600	2200	10500	2400	1550	30	500	15	20	10.360	47	20	2.300	11	16	10.440	32	12	10.360	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	200	7400	3200	1550	30	500	23	16	7.260	33	20	3.100	23	12	7.340	42	12	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	600	7400	2500	1550	30	500	18	16	7.260	33	20	2.400	19	16	7.340	12	20	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	1000	7500	2400	1550	30	500	17	16	7.360	53	16	2.300	14	20	7.440	18	16	7.360	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	1400	8000	2700	1550	30	500	19	16	7.860	56	16	2.600	16	20	7.940	36	12	7.860	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	1800	8700	2900	1550	30	500	13	20	8.560	61	16	2.800	15	20	8.640	14	20	8.560	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	2200	9600	3000	1550	30	500	21	16	9.460	67	16	2.900	21	16	9.540	22	16	9.460	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	400	200																					
15,00	0,300	7000	400	600	7400	3900	1550	30	500	28	16	7.260	33	20	3.800	25	16	7.340	52	12	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	400	1000	7400	3300	1550	30	500	23	16	7.260	52	16	3.300	28	16	7.340	10	25	7.260	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	400	1400	7450	3400	1550	30	500	24	16	7.310	52	16	3.300	20	20	7.390	46	12	7.310	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	400	1800	7600	3800	1550	30	500	17	20	7.460	53	16	3.700	22	20	7.540	50	12	7.460	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	400	2200	8750	3700	1550	30	500	26	16	8.610	39	20	3.600	20	20	8.690	28	16	8.610	0	0	0	0
15,00	0,300	7000	800	200																					
15,00	0,300	7000	800	600																					
15,00	0,300	7000	800	1000																					
15,00	0,300	7000	800	1400																					
15,00	0,300	7000	800	1800																					
15,00	0,300	7000	800	2200																					
15,00	0,300	7000	2000	200																					
15,00	0,300	7000	2200	600																					
15,00	0,300	7000	2200	1000																					
15,00	0,300	7000	2200	1400																					
15,00	0,300	7000	2200	1800																					
15,00	0,300	7000	2200	2200																					

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIP O 5 R				GEOMETRIA			ATERIALE		ZaplAxinf			ZaplAyinf			Ax sup			Apiel			Acortante							
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)
20,00	0,050	5000	200	200	5400	700	600	30	500	4	12	5.260	26	12	600	3	25	5.340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	200	600	6250	1200	550	30	500	8	12	6.110	28	12	1.100	10	16	6.190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	200	1000	6250	1800	550	30	500	14	12	6.110	47	12	1.650	13	16	6.190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	200	1400	6550	2300	600	30	500	14	16	6.410	43	16	1.700	12	16	6.490	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	200	1800	6750	2800	700	30	500	19	16	6.610	55	16	1.900	19	12	6.690	16	12	6.610	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	200	2200	6800	3500	850	30	500	22	16	6.660	39	20	2.300	17	12	6.740	14	16	6.660	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	600	200	5400	2800	600	30	500	14	12	5.260	30	16	1.800	25	12	5.340	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	600	600	5600	1700	600	30	500	9	12	5.460	35	12	1.600	14	20	5.540	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	600	1000	5850	1700	750	30	500	11	12	5.710	35	12	1.700	8	25	5.790	6	16	5.710	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	600	1400	6500	1900	800	30	500	17	12	6.360	42	12	1.800	16	16	6.440	8	16	6.360	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	600	1800	6800	2300	800	30	500	15	16	6.660	38	16	2.200	16	16	6.740	16	12	6.660	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	600	2200	7000	2700	800	30	500	21	16	6.860	51	16	2.200	16	16	6.940	18	12	6.860	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1000	200	5800	4000	750	30	500	24	12	5.660	37	20	2.100	30	12	5.740	24	12	5.660	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1000	600	5400	2300	650	30	500	12	12	5.260	34	16	1.850	17	20	5.340	12	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1000	1000	5650	2000	800	30	500	13	12	5.510	25	16	1.900	16	20	5.590	14	12	5.510	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1000	1400	5750	2400	800	30	500	16	12	5.610	33	16	2.300	18	20	5.690	16	12	5.610	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1000	1800	6300	2500	850	30	500	17	12	6.160	35	16	2.400	16	20	6.240	10	16	6.160	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1000	2200	6600	2800	850	30	500	15	16	6.460	46	16	2.300	24	16	6.540	20	12	6.460	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1400	200																								
20,00	0,050	5000	1400	600	5400	3900	900	30	500	33	12	5.260	33	20	2.450	13	25	5.340	8	25	5.260	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	5000	1400	1000	5400	2900	750	30	500	10	16	5.260	33	20	2.100	22	20	5.340	4	25	5.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1400	1400	5400	2900	800	30	500	19	12	5.260	45	16	2.150	24	20	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1400	1800	6200	2900	850	30	500	20	12	6.060	46	16	2.300	21	20	6.140	20	12	6.060	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1400	2200	6300	3200	850	30	500	22	12	6.160	52	16	2.250	22	20	6.240	22	12	6.160	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1800	200																								
20,00	0,050	5000	1800	600																								
20,00	0,050	5000	1800	1000																								
20,00	0,050	5000	1800	1400	5400	3600	950	30	500	28	12	5.260	35	20	2.550	22	20	5.340	10	20	5.260	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	5000	1800	1800	5800	3500	900	30	500	26	12	5.660	47	16	2.400	25	20	5.740	26	12	5.660	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	1800	2200	6500	3500	900	30	500	26	12	6.360	45	20	2.400	23	20	6.440	26	12	6.360	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	5000	2200	200																								
20,00	0,050	5000	2200	600																								
20,00	0,050	5000	2200	1000																								
20,00	0,050	5000	2200	1400																								
20,00	0,050	5000	2200	1800																								
20,00	0,050	5000	2200	2200																								

TIPO 5R														ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			ApieI			Aco rtante		
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø		
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)		
20,00	0,050	6000	200	200	6450	400	900	30	500	3	12	6.310	26	16	3.00	3	25	6.390	4	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	200	600	7050	1000	750	30	500	6	12	6.990	24	16	900	7	20	6.990	7	12	6.990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	200	1000	7350	1600	700	30	500	7	16	7.210	41	12	1600	13	16	7.290	10	12	7.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	200	1400	7850	1900	700	30	500	15	16	7.710	35	16	1800	12	16	7.790	6	16	7.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	200	1800	7900	2500	700	30	500	20	16	7.760	55	16	1950	13	16	7.840	14	12	7.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	200	2200	8150	2800	750	30	500	18	20	8.010	46	20	2.050	21	12	8.090	18	12	8.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	600	200	6400	2300	750	30	500	14	12	6.260	42	12	2.200	14	16	6.340	14	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	600	600	6450	1200	900	30	500	5	16	6.310	26	16	1100	7	25	6.390	10	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	600	1000	7000	1400	950	30	500	6	16	6.860	53	12	1300	12	20	6.940	12	12	6.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	600	1400	7250	2000	850	30	500	14	12	7.110	28	16	1900	14	20	7.190	14	12	7.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	600	1800	7800	2200	900	30	500	14	16	7.660	63	12	2.100	12	20	7.740	16	12	7.660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	600	2200	7950	2700	850	30	500	19	16	7.810	54	16	2.350	20	16	7.890	20	12	7.810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	1000	200	8050	2700	750	30	500	12	16	7.910	61	16	2.050	11	25	7.990	4	25	7.910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	1000	600	6400	1900	850	30	500	13	12	6.260	44	12	1900	16	20	6.340	14	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1000	1000	6750	1700	1000	30	500	14	12	6.610	54	12	1.600	10	25	6.690	14	12	6.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1000	1400	6900	2000	1000	30	500	16	12	6.760	55	12	1.900	17	20	6.840	6	20	6.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1000	1800	7200	2400	950	30	500	19	12	7.060	60	12	2.300	19	20	7.140	20	12	7.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1000	2200	8350	2200	800	30	500	11	25	8.210	35	20	2.100	18	20	8.290	6	20	8.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1400	200	6500	4800	950	30	500	37	12	6.360	46	20	2.500	34	12	6.440	38	12	6.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1400	600	6450	3000	800	30	500	20	12	6.310	55	16	2.150	21	20	6.390	20	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1400	1000	6400	2500	900	30	500	18	12	6.260	40	16	2.400	14	25	6.340	20	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1400	1400	6700	2400	1000	30	500	11	16	6.560	23	20	2.300	14	25	6.640	20	12	6.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1400	1800	7300	2600	800	30	500	21	12	7.160	65	12	2.200	20	25	7.240	6	25	7.160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1400	2200	7150	2900	1000	30	500	24	12	7.010	47	16	2.750	24	20	7.090	14	16	7.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1800	200																											
20,00	0,050	6000	1800	600	7250	4100	1000	30	500	33	12	7.110	50	20	2.600	32	16	7.190	20	16	7.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	1800	1000	6400	3500	900	30	500	26	12	6.260	45	20	2.400	26	20	6.340	26	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1800	1400	6400	3100	950	30	500	24	12	6.260	54	16	2.500	18	25	6.340	24	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1800	1800	6650	3100	1000	30	500	14	16	6.510	54	16	2.600	18	25	6.590	26	12	6.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	1800	2200	6750	3400	1000	30	500	16	16	6.610	38	20	2.700	19	25	6.690	10	20	6.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	6000	2200	200																											
20,00	0,050	6000	2200	600																											
20,00	0,050	6000	2200	1000																											
20,00	0,050	6000	2200	1400																											
20,00	0,050	6000	2200	1800	6400	3600	1000	30	500	32	12	6.260	31	20	2.800	21	25	6.340	34	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	6000	2200	2200	6850	3700	1000	30	500	30	12	6.710	51	20	2.600	21	25	6.790	32	12	6.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

T	TIPO 5R			GEOMETRIA				ATERIALE			ZapI Axinf			ZapI Ayinf			Ax sup			Apiel			Acorriante								
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	
20,00	0,050	7000	200	200	7400	400	100	30	500	3	16	7.260	65	12	300	3	25	7.340	4	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	200	600	8400	800	950	30	500	7	12	8.260	36	16	700	6	20	8.340	4	16	8.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	200	1000	9000	1200	900	30	500	9	16	8.860	65	12	1100	6	20	8.940	10	12	8.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	200	1400	8900	1800	850	30	500	8	20	8.760	61	12	1700	8	20	8.840	14	12	8.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	200	1800	9250	2100	850	30	500	13	20	9.100	44	16	2.000	8	20	9.190	6	20	9.100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	200	2200	9400	2500	850	30	500	11	25	9.260	61	16	2.350	22	12	9.340	10	16	9.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	600	200	7800	1500	1000	30	500	8	16	7.660	64	12	1400	13	16	7.740	18	12	7.660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,050	7000	600	600	7400	1100	1050	30	500	10	12	7.260	24	20	1000	7	25	7.340	10	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	600	1000	8200	1200	1150	30	500	7	16	8.060	28	20	1100	7	25	8.140	12	12	8.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	600	1400	8350	1800	1000	30	500	15	12	8.210	67	12	1700	14	20	8.290	16	12	8.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	600	1800	8850	2200	950	30	500	13	16	8.710	67	12	2.100	14	20	8.790	10	16	8.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	600	2200	8550	2900	850	30	500	26	12	8.410	61	16	2.300	20	20	8.490	12	16	8.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1000	200	7750	2500	850	30	500	19	12	7.610	28	20	2.400	21	16	7.690	32	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1000	600	7400	1700	1000	30	500	14	12	7.260	59	12	1600	10	25	7.340	14	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1000	1000	7700	1900	1150	30	500	15	12	7.310	37	16	1600	11	25	7.390	6	20	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1000	1400	8350	2200	1100	30	500	11	16	8.210	74	12	2.100	12	25	8.290	20	12	8.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1000	1800	8650	2500	1100	30	500	22	12	8.510	43	16	2.400	12	25	8.590	24	12	8.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1400	200	9200	3300	850	30	500	23	12	9.060	52	20	2.350	14	20	9.140	24	12	9.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1400	600	7400	2700	950	30	500	19	16	7.260	50	16	2.600	22	20	7.340	6	25	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1400	1000	7400	2300	1050	30	500	11	16	7.260	63	12	2.300	14	25	7.340	20	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1400	1400	7700	2200	1150	30	500	12	16	7.560	26	20	2.100	14	25	7.640	12	16	7.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1400	1800	7750	2500	1150	30	500	13	16	7.610	40	16	2.500	16	25	7.690	24	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1400	2200	8100	2700	1150	30	500	14	16	7.960	43	16	2.600	16	25	8.040	26	12	7.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1800	200	7500	5100	1100	30	500	17	20	7.360	56	20	2.800	38	12	7.440	46	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1800	600	7450	3500	900	30	500	26	12	7.310	52	20	2.400	26	20	7.390	6	25	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1800	1000	7400	3100	950	30	500	24	12	7.260	62	16	2.500	19	25	7.340	24	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1800	1400	7400	2700	1150	30	500	14	16	7.260	46	16	2.600	17	25	7.340	26	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1800	1800	7400	2900	1150	30	500	15	16	7.260	50	16	2.800	19	25	7.340	10	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	1800	2200	7800	3100	1150	30	500	16	16	7.660	56	16	3.000	20	25	7.740	30	12	7.660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	2200	200																											
20,00	0,050	7000	2200	600																											
20,00	0,050	7000	2200	1000	7450	4000	1050	30	500	19	16	7.310	57	20	2.700	29	20	7.390	38	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	2200	1400	7400	3700	1000	30	500	30	12	7.260	59	16	2.650	22	25	7.340	32	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,050	7000	2200	1800	7400	3200	1200	30	500	18	16	7.260	60	16	3.100	20	25	7.340	32	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

TIPO 5R				GEOMETRIA			ATERIALE		Zap1A xinf			Zap1A yinf			Ax sup			Apie l			Acortante			
T	K	L	N1	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	Ramas	n	Ø	
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	
20,00	0,050	7000	2200	8050	3300	1050	30	500	28	12	7910	69	12	2900	24	25	7990	30	12	7910	0	0	0	
20,00	0,100	5000	200	5600	400	850	30	500	3	12	5460	38	12	300	3	20	5440	4	12	5460	0	0	0	
20,00	0,100	5000	200	6500	900	750	30	500	8	12	6360	39	12	800	4	20	6440	6	12	6360	0	0	0	
20,00	0,100	5000	200	6850	1400	700	30	500	11	16	6710	39	12	1300	8	16	6790	8	12	6710	0	0	0	
20,00	0,100	5000	200	400	7000	900	30	500	11	20	6860	55	12	1800	14	12	6940	6	16	6860	0	0	0	
20,00	0,100	5000	200	1800	7200	2300	700	30	500	17	20	7060	46	16	2000	13	12	7140	14	12	7060	0	0	0
20,00	0,100	5000	200	7450	2600	800	30	500	13	25	7310	53	16	2200	10	12	7390	6	20	7310	0	0	0	
20,00	0,100	5000	600	200	5400	2300	750	30	500	14	12	5260	35	12	2200	8	20	5340	14	12	5260	0	0	0
20,00	0,100	5000	600	600	5650	2000	800	30	500	8	12	5510	36	12	1800	10	20	5590	8	12	5510	0	0	0
20,00	0,100	5000	600	1000	5900	1700	750	30	500	11	12	5760	20	16	1700	12	20	5840	6	16	5760	0	0	0
20,00	0,100	5000	600	1400	6500	1900	800	30	500	17	12	6360	24	16	1800	16	16	6440	8	16	6360	0	0	0
20,00	0,100	5000	600	1800	6800	2300	800	30	500	15	16	6660	24	20	2200	10	20	6740	16	12	6660	0	0	0
20,00	0,100	5000	600	2200	7000	2700	800	30	500	21	16	6860	51	16	2200	16	16	6940	10	16	6860	0	0	0
20,00	0,100	5000	1000	200	5400	3500	850	30	500	24	12	5260	38	16	2300	27	12	5340	24	12	5260	0	0	0
20,00	0,100	5000	1000	600	5400	2200	700	30	500	13	12	5260	30	16	2050	16	20	5340	14	12	5260	0	0	0
20,00	0,100	5000	1000	1000	5650	2000	800	30	500	13	12	5510	25	16	1900	16	20	5590	14	12	5510	0	0	0
20,00	0,100	5000	1000	1400	5700	2400	800	30	500	16	12	5560	21	20	2300	19	20	5640	16	12	5560	0	0	0
20,00	0,100	5000	1000	1800	6300	2500	850	30	500	17	12	6160	35	16	2400	16	20	6240	4	25	6160	0	0	0
20,00	0,100	5000	1000	2200	6600	2800	850	30	500	15	16	6460	46	16	2350	24	16	6540	20	12	6460	0	0	0
20,00	0,100	5000	1400	200	5400	4500	950	30	500	35	12	5260	35	20	2550	16	16	5340	20	16	5260	0	0	0
20,00	0,100	5000	1400	600	5700	3400	850	30	500	24	12	5560	33	20	2300	25	16	5640	24	12	5560	0	0	10
20,00	0,100	5000	1400	1000	5400	2900	750	30	500	10	16	5260	33	20	2100	22	20	5340	4	25	5260	0	0	0
20,00	0,100	5000	1400	1400	5400	2900	800	30	500	19	12	5260	45	16	2150	24	20	5340	20	12	5260	0	0	0
20,00	0,100	5000	1400	1800	5650	3200	800	30	500	21	12	5510	36	20	2200	25	20	5590	12	16	5510	0	0	0
20,00	0,100	5000	1400	2200	6300	3200	850	30	500	22	12	6160	52	16	2250	14	25	6240	22	12	6160	0	0	0
20,00	0,100	5000	1800	200																				
20,00	0,100	5000	1800	600																				
20,00	0,100	5000	1800	1000																				
20,00	0,100	5000	1800	1400	3600	950	30	500	28	12	5260	35	20	2550	22	20	5340	10	20	5260	0	0	0	
20,00	0,100	5000	1800	1800	5800	3500	900	30	500	26	12	5660	41	20	2400	25	20	5740	26	12	5660	0	0	0
20,00	0,100	5000	1800	2200	6500	3500	900	30	500	26	12	6360	45	20	2400	23	20	6440	6	25	6360	0	0	0
20,00	0,100	5000	2200	200																				
20,00	0,100	5000	2200	600																				
20,00	0,100	5000	2200	1000																				
20,00	0,100	5000	2200	1400																				
20,00	0,100	5000	2200	1800																				
20,00	0,100	5000	2200	2200																				

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R				GEOMETRIA				ATERIALE		Zap1Axinf			Zap1Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante					
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	Ramas	n	Ø	
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	(m m)	(KN)	(KN)	(m m)	(m m)	(m m)				(m m)	(m m)		(m m)	(m m)		(m m)	(m m)		(m m)	(m m)		(m m)			(m m)	
20,00	0,100	6000	200	200	6400	400	150	30	500	3	16	6.260	33	16	300	3	20	6.340	6	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	200	600	7600	800	950	30	500	7	12	7.460	58	12	700	7	16	7.540	4	16	7.460	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	200	1000	8150	1200	900	30	500	6	20	8.010	33	16	1000	5	20	8.090	10	12	8.010	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	200	1400	8600	1500	900	30	500	12	20	8.460	35	16	1400	12	12	8.540	4	20	8.460	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	200	1800	8700	1900	900	30	500	10	25	8.560	63	12	1800	12	12	8.640	14	12	8.560	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	200	2200	8500	2500	850	30	500	12	25	8.360	35	20	2400	15	12	8.440	4	25	8.360	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	600	200	6400	2000	900	30	500	15	12	6.260	46	12	2000	8	12	6.340	16	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	600	600	6450	1200	900	30	500	5	16	6.310	26	16	1100	7	25	6.390	10	12	6.310	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	600	1000	7000	1400	950	30	500	6	16	6.860	53	12	1300	12	20	6.940	4	20	6.860	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	600	1400	7550	1800	900	30	500	15	12	7.410	31	16	1700	12	20	7.490	8	16	7.410	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	600	1800	7800	2200	900	30	500	14	16	7.660	63	12	2100	12	20	7.740	16	12	7.660	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	600	2200	7900	2700	850	30	500	12	20	7.760	54	16	2350	20	16	7.840	20	12	7.760	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1000	200	6400	3200	950	30	500	14	16	6.260	37	16	2700	17	16	6.340	14	16	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1000	600	6400	1900	900	30	500	14	12	6.260	46	12	1800	15	20	6.340	14	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1000	1000	6750	1700	1000	30	500	14	12	6.610	54	12	1600	10	25	6.690	14	12	6.610	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1000	1400	6900	2000	1000	30	500	9	16	6.760	55	12	1900	17	20	6.840	6	20	6.760	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1000	1800	7200	2400	950	30	500	19	12	7.060	60	12	2300	19	20	7.140	20	12	7.060	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1000	2200	7550	2700	950	30	500	22	12	7.410	46	16	2600	18	20	7.490	12	16	7.410	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1400	200	6850	3700	950	30	500	24	16	6.710	58	12	2650	13	20	6.790	8	25	6.710	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1400	600	6400	3000	900	30	500	13	16	6.260	47	16	2400	12	25	6.340	22	12	6.260	0	0	0	0	6	
20,00	0,100	6000	1400	1000	6400	2500	900	30	500	18	12	6.260	26	20	2400	14	25	6.340	20	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1400	1400	6700	2400	1000	30	500	11	16	6.560	23	20	2300	14	25	6.640	20	12	6.560	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1400	1800	6800	2700	1000	30	500	22	12	6.660	41	16	2600	15	25	6.740	22	12	6.660	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1400	2200	7150	2900	1000	30	500	24	12	7.010	47	16	2750	24	20	7.090	24	12	7.010	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1800	200																							
20,00	0,100	6000	1800	600	6550	4000	1000	30	500	18	16	6.410	44	20	2650	32	16	6.490	34	12	6.410	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1800	1000	6400	3500	900	30	500	26	12	6.260	45	20	2400	26	20	6.340	26	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1800	1400	6400	3100	950	30	500	24	12	6.260	54	16	2500	18	25	6.340	24	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1800	1800	6650	3100	1000	30	500	25	12	6.510	54	16	2650	18	25	6.590	26	12	6.510	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	1800	2200	6750	3400	1000	30	500	28	12	6.610	38	20	2750	19	25	6.690	28	12	6.610	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	2200	200																							
20,00	0,100	6000	2200	600																							
20,00	0,100	6000	2200	1000																							
20,00	0,100	6000	2200	1400																							
20,00	0,100	6000	2200	1800	6400	3700	1050	30	500	31	12	6.260	44	20	2750	31	20	6.340	32	12	6.260	0	0	0	0	0	
20,00	0,100	6000	2200	2200	6850	3700	1000	30	500	30	12	6.710	51	20	2600	21	25	6.790	18	16	6.710	0	0	0	0	0	

T	K	TIPO SR			GEOMETRIA				ATERIALE		Zap1 Axinf			Zap1 Ayinf			Ax s up			Apie1			Acortante					
		(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	Ramas	n	Ø (mm)
20,00	0,100	7000	200	200	7400	400	1400	30	500	3	16	7.260	30	20	300	3	20	7.340	6	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	200	600	9300	600	1250	30	500	3	20	9.160	34	20	500	4	20	9.240	8	12	9.160	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	200	1000	9950	900	1150	30	500	7	20	9.810	52	16	800	4	20	9.890	10	12	9.810	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	200	1400	10000	1300	1100	30	500	11	20	9.860	88	12	1200	11	12	9.940	12	12	9.860	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	200	1800	9850	1800	1100	30	500	13	20	9.710	49	16	1700	13	12	9.790	6	20	9.710	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	200	2200	10050	2100	1100	30	500	12	25	9.910	88	12	2.000	12	12	9.990	20	12	9.910	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	600	200	7400	1700	1100	30	500	15	12	7.260	37	16	1600	8	20	7.340	16	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	600	600	7400	1000	1150	30	500	6	16	7.260	39	16	900	7	25	7.340	10	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	600	1000	8200	1200	1150	30	500	11	12	8.060	43	16	1.100	7	25	8.140	12	12	8.060	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	600	1400	8650	1600	1100	30	500	8	16	8.510	76	12	1.500	12	20	8.590	16	12	8.510	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	600	1800	9100	1900	1100	30	500	14	16	8.960	80	12	1.800	12	20	9.040	4	25	8.960	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	600	2200	9400	2200	1100	30	500	8	25	9.260	83	12	2.100	19	16	9.340	20	12	9.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1000	200	7400	2900	1100	30	500	26	12	7.260	37	16	1.600	17	16	7.340	28	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1000	600	7400	1700	1100	30	500	15	12	7.260	37	16	1.600	14	20	7.340	16	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1000	1000	7450	1700	1100	30	500	15	12	7.310	37	16	1.600	11	25	7.390	16	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1000	1400	7700	1900	1150	30	500	10	16	7.560	26	20	1.800	12	25	7.640	18	12	7.560	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1000	1800	8250	2200	1100	30	500	11	16	8.110	41	16	2.100	13	25	8.190	20	12	8.110	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1000	2200	8650	2500	1100	30	500	22	12	8.510	43	16	2.400	12	25	8.590	24	12	8.510	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1400	200	10200	2700	1050	30	500	14	16	10.060	89	12	2.600	21	16	10.140	6	25	10.060	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1400	600	7400	2600	1100	30	500	13	16	7.260	38	16	2.500	18	20	7.340	24	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1400	1000	7700	2200	1100	30	500	11	16	7.260	65	12	2.100	14	25	7.340	20	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1400	1400	7700	2200	1150	30	500	12	16	7.560	40	16	2.100	14	25	7.640	12	16	7.560	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1400	1800	7750	2500	1150	30	500	13	16	7.610	40	16	2.500	16	25	7.690	24	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1400	2200	8100	2700	1150	30	500	14	16	7.960	43	16	2.600	16	25	8.040	26	12	7.960	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1800	200	10650	3400	1050	30	500	16	16	10.510	90	16	2.700	21	16	10.590	30	12	10.510	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1800	600	7400	3600	1100	30	500	18	16	7.260	40	20	2.950	22	20	7.340	8	25	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1800	1000	7400	3100	1100	30	500	16	16	7.260	55	16	2.950	24	20	7.340	28	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1800	1400	7400	2700	1150	30	500	14	16	7.260	46	16	2.600	17	25	7.340	26	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1800	1800	7400	2900	1150	30	500	15	16	7.260	50	16	2.800	19	25	7.340	28	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	1800	2200	7800	3100	1150	30	500	16	16	7.660	56	16	3.000	20	25	7.740	30	12	7.660	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	2200	200																								
20,00	0,100	7000	2200	600																								
20,00	0,100	7000	2200	1000	7450	4100	1100	30	500	21	16	7.310	53	20	2.850	18	25	7.390	14	20	7.310	0	0	0	0	0	0	6
20,00	0,100	7000	2200	1400	7400	3600	1100	30	500	18	16	7.260	45	20	2.900	20	25	7.340	12	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	2200	1800	7400	3200	1200	30	500	18	16	7.260	60	16	3.100	20	25	7.340	32	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,100	7000	2200	2200	7800	3600	1100	30	500	18	16	7.660	69	12	3.000	23	25	7.740	8	25	7.660	0	0	0	0	0	0	0



TIPO 5 R				GEOMETRIA				ATERIALE		Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax s up			Apie l			Acortante					
T	K	L	N1	N2	A1	B1	HI	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ramas	n	Ø		
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)				(mm)		
20,00	0,200	6000	200	200	6400	400	1400	30	500	3	16	6.260	26	20	300	3	20	6.340	6	12	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	200	600	8050	700	1250	30	500	3	20	7.910	29	20	600	5	16	7.990	8	12	7.910	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	200	1000	8700	1000	150	30	500	7	20	8.560	45	16	900	5	16	8.640	10	12	8.560	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	200	1400	8650	1500	100	30	500	6	25	8.510	43	16	1400	10	12	8.590	14	12	8.510	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	200	1800	9100	1700	100	30	500	10	25	8.960	45	16	1600	7	12	9.040	6	20	8.960	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	200	2200	8950	2200	100	30	500	11	25	8.810	45	16	2.100	8	12	8.890	20	12	8.810	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	600	200	6400	1700	100	30	500	15	12	6.260	32	16	1.600	11	16	6.340	16	12	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	600	600	6400	1800	150	30	500	6	16	6.260	33	16	1.000	9	20	6.340	6	16	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	600	1000	7200	1300	150	30	500	7	16	7.060	24	20	1.200	9	20	7.140	14	12	7.060	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	600	1400	7800	1600	100	30	500	9	16	7.660	39	16	1.500	6	25	7.740	16	12	7.660	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	600	1800	8350	1800	100	30	500	10	20	8.210	74	12	1.700	14	16	8.290	6	20	8.210	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	600	2200	8600	2.100	100	30	500	13	20	8.460	43	16	2.000	14	16	8.540	20	12	8.460	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	1000	200	6400	2900	100	30	500	15	16	6.260	57	12	2.800	26	12	6.340	10	20	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	1000	600	6400	2000	100	30	500	10	16	6.260	32	16	1.900	12	20	6.340	20	12	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	1000	1000	6450	1800	100	30	500	9	16	6.310	32	16	1.700	15	20	6.390	6	20	6.310	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	1000	1400	7350	1900	100	30	500	17	12	7.210	37	16	1.800	14	20	7.290	4	25	7.210	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	1800	1800	7400	2200	100	30	500	11	16	7.260	37	16	2.100	15	20	7.340	20	12	7.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	1000	2200	8100	2300	100	30	500	16	16	7.960	40	16	2.200	14	20	8.040	12	16	7.960	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	400	200	6400	4000	100	30	500	20	16	6.260	50	16	2.900	30	12	6.340	38	12	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	400	600	6550	3200	100	30	500	14	20	6.410	42	16	3.000	27	20	6.490	50	12	6.410	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	400	1000	6400	2500	100	30	500	22	12	6.260	32	16	2.400	18	20	6.340	24	12	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	400	1400	6500	2500	100	30	500	22	12	6.360	57	12	2.400	20	20	6.440	24	12	6.360	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	400	1800	7150	2600	100	30	500	13	16	7.010	63	12	2.500	20	20	7.090	24	12	7.010	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	400	2200	7750	2700	100	30	500	24	12	7.610	68	12	2.600	19	20	7.690	6	25	7.610	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	800	200																							
20,00	0,200	6000	800	600	6400	4100	100	30	500	14	20	6.260	38	20	2.900	31	16	6.340	38	12	6.260	0	0	0	10		
20,00	0,200	6000	800	1000	6400	3600	100	30	500	18	16	6.260	54	16	2.850	22	20	6.340	12	20	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	800	1400	6400	3100	100	30	500	16	16	6.260	48	16	2.900	23	20	6.340	28	12	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	800	1800	6550	3200	100	30	500	16	16	6.410	50	16	2.900	26	20	6.490	30	12	6.410	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	800	2200	7500	3100	100	30	500	28	12	7.360	56	16	2.950	15	25	7.440	28	12	7.360	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	2200	200																							
20,00	0,200	6000	2200	600																							
20,00	0,200	6000	2200	1000																							
20,00	0,200	6000	2200	1400																							
20,00	0,200	6000	2200	1800	6400	3700	100	30	500	33	12	6.260	40	20	2.900	29	20	6.340	8	25	6.260	0	0	0	0		
20,00	0,200	6000	2200	2200	6550	3900	100	30	500	20	16	6.410	44	20	2.850	31	20	6.490	20	16	6.410	0	0	0	0	0	



TIPO 5R										ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante								
T	K	L	N1	N2	GEOMETRIA			HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n		
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	A1	B1	HI	(mm)			(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			
20,00	0,300	5000	200	200	5400	500	1200	30	500	3	16	5.260	19	20	400	4	16	5.340	6	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
20,00	0,300	5000	200	600	7100	700	1100	30	500	5	16	6.960	35	16	600	4	16	7.040	4	16	6.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	200	1000	7650	1000	1050	30	500	7	20	7.510	64	12	900	7	12	7.590	10	12	7.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	200	1400	7650	1500	1000	30	500	11	20	7.510	61	12	1400	7	12	7.590	14	12	7.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	200	1800	7750	1900	1000	30	500	15	20	7.610	62	12	1800	7	12	7.690	16	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	200	2200	7700	2400	950	30	500	19	20	7.560	42	16	2.300	9	12	7.640	20	12	7.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	600	200	5400	1900	1000	30	500	6	16	5.260	43	12	1800	10	16	5.340	16	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	600	600	5400	1300	1000	30	500	6	16	5.260	43	12	1200	8	20	5.340	6	16	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
20,00	0,300	5000	600	1000	6100	1500	1000	30	500	12	12	5.960	49	12	1400	13	16	6.040	14	12	5.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	600	1400	6750	1700	1000	30	500	10	16	6.610	54	12	1600	13	16	6.690	14	12	6.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	600	1800	7250	1900	1000	30	500	10	20	7.110	58	12	1800	12	16	7.190	16	12	7.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	600	2200	7400	2300	950	30	500	14	20	7.260	39	16	2.200	8	20	7.340	10	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1000	200	5400	3100	1000	30	500	14	16	5.260	29	16	2.850	24	12	5.340	26	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1000	600	5400	2300	1000	30	500	19	12	5.260	43	12	2.200	18	16	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1000	1000	5450	2100	1000	30	500	17	12	5.310	44	12	2.000	13	20	5.390	4	25	5.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1000	1400	5750	2400	1000	30	500	11	16	5.610	46	12	2.300	14	20	5.690	20	12	5.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1000	1800	6450	2500	1000	30	500	20	12	6.310	29	16	2.400	21	16	6.390	12	16	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1000	2200	7000	2600	950	30	500	11	20	6.860	41	16	2.500	20	16	6.940	12	16	6.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1400	200	5400	4400	1000	30	500	36	12	5.260	31	20	2.700	27	12	5.340	36	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1400	600	5400	3500	1000	30	500	31	12	5.260	41	16	2.650	12	25	5.340	22	16	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1400	1000	5400	2900	1000	30	500	13	16	5.260	35	16	2.750	25	16	5.340	24	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,300	5000	1400	1400	400	5950	2700	1000	30	500	22	12	5.810	36	16	2.600	17	20	5.890	22	12	5.810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,300	5000	1400	1800	6750	2800	950	30	500	12	16	6.610	45	16	2.600	17	20	6.690	8	20	6.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1400	2200	6850	3000	950	30	500	15	16	6.710	48	16	2.550	26	16	6.790	14	16	6.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1800	200																													
20,00	0,300	5000	1800	600																													
20,00	0,300	5000	1800	1000																													
20,00	0,300	5000	1800	1400	5400	3600	1000	30	500	29	12	5.260	32	20	2.700	21	20	5.340	30	12	5.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1800	1800	5450	3800	1000	30	500	31	12	5.310	34	20	2.700	23	20	5.390	32	12	5.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20,00	0,300	5000	1800	2200	6350	3600	1000	30	500	29	12	6.210	30	20	2.850	21	20	6.290	30	12	6.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,00	0,300	5000	2200	200																													
20,00	0,300	5000	2200	600																													
20,00	0,300	5000	2200	1000																													
20,00	0,300	5000	2200	1400																													
20,00	0,300	5000	2200	1800																													
20,00	0,300	5000	2200	2200																													



Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R												ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apiel			Aco rriante		
T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	GEOMETRIA			HA	B-	Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apiel			n cerco	Ø (mm)						
					A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)			n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)			n	Ø (mm)	L (mm)	Ramas		
20,00	0,300	6000	200	200	6400	400	1600	30	500	3	16	6.260	46	16	300	3	20	6.340	8	12	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	200	600	8450	600	1450	30	500	3	20	8.310	55	16	500	4	16	8.390	8	12	8.310	0	0	0					
20,00	0,300	6000	200	1000	9100	900	1350	30	500	5	25	8.960	55	16	800	4	16	9.040	6	16	8.960	0	0	0					
20,00	0,300	6000	200	1400	9150	1300	1300	30	500	10	20	9.010	54	16	1200	6	12	9.090	8	16	9.010	0	0	0					
20,00	0,300	6000	200	1800	9150	1700	1250	30	500	13	20	9.010	33	20	1600	7	12	9.090	10	16	9.010	0	0	0					
20,00	0,300	6000	200	2200	9150	2100	1250	30	500	17	20	9.010	33	20	2.000	8	12	9.090	2.2	12	9.010	0	0	0					
20,00	0,300	6000	600	600	6400	1500	1300	30	500	9	16	6.260	24	20	1400	10	16	6.340	6	20	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	600	1000	7350	1300	1300	30	500	5	20	7.210	43	16	1200	9	20	7.290	8	16	7.210	0	0	0					
20,00	0,300	6000	600	1400	8000	1500	1300	30	500	9	16	7.860	47	16	1400	13	16	7.940	6	20	7.860	0	0	0					
20,00	0,300	6000	600	1800	8550	1700	1250	30	500	10	20	8.410	48	16	1600	8	20	8.490	10	16	8.410	0	0	0					
20,00	0,300	6000	600	2200	8900	1900	1250	30	500	14	20	8.760	32	20	1800	12	16	8.840	20	12	8.760	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1000	200	6400	2600	1250	30	500	15	16	6.260	23	20	2.500	23	12	6.340	10	20	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1000	600	6400	2000	1250	30	500	12	16	6.260	23	20	1900	12	20	6.340	12	16	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1000	1000	6550	1900	1250	30	500	11	16	6.410	37	16	1800	13	20	6.490	20	12	6.410	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1000	1400	6800	2100	1250	30	500	12	16	6.660	39	16	2.000	15	20	6.740	2.2	12	6.660	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1000	1800	7550	2200	1250	30	500	8	20	7.410	43	16	2.100	14	20	7.490	24	12	7.410	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1000	2200	7950	2400	1250	30	500	14	16	7.810	45	16	2.300	14	20	7.890	14	16	7.810	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1400	200	6400	3800	1250	30	500	14	20	6.260	41	16	3.350	15	16	6.340	40	12	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1400	600	6400	3600	1250	30	500	13	20	6.260	39	16	3.400	25	16	6.340	38	12	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1400	1000	6400	2600	1250	30	500	15	16	6.260	23	20	2.500	17	20	6.340	10	20	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1400	1400	6400	2600	1250	30	500	15	16	6.260	36	16	2.500	18	20	6.340	10	20	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1400	1800	6550	2900	1250	30	500	17	16	6.410	24	20	2.800	20	20	6.490	18	16	6.410	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1400	2200	7650	2800	1250	30	500	16	16	7.510	43	16	2.700	18	20	7.590	30	12	7.510	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1800	200																									
20,00	0,300	6000	1800	600	6400	4200	1400	30	500	27	16	6.260	47	16	3.650	27	16	6.340	28	16	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1800	1000	6400	3700	1250	30	500	21	16	6.260	49	16	3.250	32	16	6.340	40	12	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1800	1400	6400	3100	1250	30	500	18	16	6.260	41	16	3.000	21	20	6.340	12	20	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1800	1800	6700	3200	1250	30	500	18	16	6.560	44	16	3.100	22	20	6.640	20	16	6.560	0	0	0					
20,00	0,300	6000	1800	2200	7650	3100	1250	30	500	18	16	7.510	49	16	3.000	21	20	7.590	12	20	7.510	0	0	0					
20,00	0,300	6000	2200	200																									
20,00	0,300	6000	2200	600																									
20,00	0,300	6000	2200	1000																									
20,00	0,300	6000	2200	1400																									
20,00	0,300	6000	2200	1800	6400	3800	1250	30	500	14	20	6.260	37	20	3.350	26	20	6.340	10	25	6.260	0	0	0					
20,00	0,300	6000	2200	2200	6700	3900	1250	30	500	22	16	6.560	40	20	3.300	27	20	6.640	24	16	6.560	0	0	0					

TIP 5R			GEOMETRIA				ATERIALE			Zap1A3inf			Zap1A3inf			Axs sup			Apie1			Acortante			
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	
20,00	0,300	7000	200	200	7400	500	1900	30	500	3	20	7.260	26	25	400	4	16	7.340	10	12	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	200	600	9500	600	1800	30	500	5	16	9.360	49	20	900	4	16	9.440	10	12	9.360	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	200	1000	9800	1000	1650	30	500	6	20	9.660	73	16	900	8	12	9.740	14	12	9.660	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	200	1400	10450	1200	1600	30	500	10	20	10.310	75	16	1.100	7	12	10.390	10	16	10.310	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	200	1800	10650	1500	1600	30	500	8	25	10.510	49	20	1400	6	12	10.590	22	12	10.510	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	200	2200	10550	1900	1550	30	500	16	20	10.410	74	16	1800	7	12	10.490	14	16	10.410	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	600	200	7400	1300	1600	30	500	6	20	7.260	53	16	1200	6	20	7.340	10	16	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	600	600	7600	1000	1650	30	500	5	20	7.460	36	20	900	8	20	7.540	14	12	7.460	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	600	1000	8150	1300	1600	30	500	6	20	8.010	59	16	1200	9	20	8.090	10	16	8.010	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	600	1400	9700	1300	1600	30	500	10	16	9.560	70	16	1200	8	20	9.640	10	16	9.560	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	600	1800	10050	1500	1600	30	500	10	20	9.910	47	20	1400	12	16	9.990	22	12	9.910	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	600	2200	10350	1700	1550	30	500	14	20	10.210	46	20	1600	11	16	10.290	8	20	10.210	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1000	200	7400	2300	1550	30	500	16	16	7.260	52	16	2.200	8	20	7.340	30	12	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1000	600	7400	1800	1600	30	500	13	16	7.260	34	20	1700	12	20	7.340	14	16	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1000	1000	7400	1700	1600	30	500	8	20	7.260	34	20	1600	13	20	7.340	24	12	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1000	1400	7850	1900	1550	30	500	14	16	7.710	55	16	1800	15	20	7.790	6	25	7.710	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1000	1800	8700	2000	1550	30	500	14	16	8.560	39	20	1900	14	20	8.640	26	12	8.560	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1000	2200	9450	2100	1550	30	500	15	16	9.310	42	20	2.000	13	20	9.390	10	20	9.310	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1400	200	7450	3300	1550	30	500	23	16	7.310	52	16	3.300	26	12	7.390	10	25	7.310	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1400	600	7400	3000	1550	30	500	21	16	7.260	33	20	2.900	24	16	7.340	22	16	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1400	1000	7400	2300	1550	30	500	16	16	7.260	33	20	2.200	17	20	7.340	30	12	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1400	1400	7550	2300	1550	30	500	16	16	7.410	34	20	2.200	18	20	7.490	30	12	7.410	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1400	1800	7650	2600	1550	30	500	12	20	7.510	54	16	2.500	20	20	7.590	34	12	7.510	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1400	2200	8600	2600	1550	30	500	12	20	8.460	60	16	2.500	19	20	8.540	34	12	8.460	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1800	200	7450	4400	1550	30	500	31	16	7.310	52	16	4.000	28	12	7.390	58	12	7.310	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1800	600	7400	3900	1550	30	500	28	16	7.260	33	20	3.800	28	16	7.340	12	25	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1800	1000	7400	3300	1550	30	500	23	16	7.260	33	20	3.300	20	20	7.340	10	25	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1800	1400	7400	2800	1550	30	500	20	16	7.260	33	20	2.700	21	20	7.340	38	12	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1800	1800	7450	3000	1550	30	500	21	16	7.310	52	16	2.900	24	20	7.390	22	16	7.310	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	1800	2200	7550	3300	1550	30	500	23	16	7.410	53	16	3.300	26	20	7.490	44	12	7.410	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	2200	200																					
20,00	0,300	7000	2200	600																					
20,00	0,300	7000	2200	1000																					
20,00	0,300	7000	2200	1400	7450	3800	1550	30	500	27	16	7.310	52	16	3.700	25	20	7.390	50	12	7.310	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	2200	1800	7400	3400	1550	30	500	24	16	7.260	52	16	3.300	26	20	7.340	16	20	7.260	0	0	0	0
20,00	0,300	7000	2200	1800	7400	3600	1550	30	500	25	16	7.460	53	16	3.500	28	20	7.540	48	12	7.460	0	0	0	0

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R										GEOMETRIA			ATERIALE		Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			ApieI		Acorriante	
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	Ramas	n	
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		cercos	(mm)
25.00	0.050	5000	200	200	5400	700	600	30	500	4	12	5.260	26	12	600	3	25	5.340	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	200	600	5750	1000	600	30	500	5	12	5.610	28	12	900	8	20	5.690	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	200	1000	6300	1400	550	30	500	8	16	6.160	37	12	1300	9	20	6.240	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	200	1400	6550	1800	550	30	500	10	20	6.410	38	16	1600	8	20	6.490	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	200	1800	6750	2200	600	30	500	15	20	6.610	55	16	1700	19	12	6.690	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	200	2200	6900	2600	700	30	500	17	20	6.760	41	20	1950	18	12	6.840	16	12	6.760	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	600	600	5400	1800	600	30	500	14	12	5.260	30	16	1800	25	12	5.340	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	600	1000	5650	1800	750	30	500	8	12	5.510	19	16	1200	11	20	5.590	8	12	5.510	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	600	1000	6050	1200	950	30	500	10	12	5.910	46	12	1100	9	20	5.990	6	16	5.910	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	600	1400	6500	1600	900	30	500	9	16	6.360	47	12	1500	14	16	6.440	12	12	6.360	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	600	1800	6850	2100	850	30	500	15	16	6.710	32	16	2000	15	16	6.790	16	12	6.710	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	600	2200	7350	2100	1000	30	500	13	20	7.210	33	16	2000	12	16	7.290	4	25	7.210	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1000	200	5800	4000	750	30	500	24	12	5.660	37	20	2100	17	16	5.740	24	12	5.660	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1000	600	5400	2000	750	30	500	12	12	5.260	46	12	1900	15	20	5.340	12	12	5.260	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1000	1000	5550	1600	950	30	500	13	12	5.410	42	12	1500	9	25	5.490	14	12	5.410	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1000	1400	5750	1900	950	30	500	15	12	5.610	44	12	1800	15	20	5.690	16	12	5.610	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1000	1800	6150	2100	950	30	500	16	12	6.010	47	12	2100	15	20	6.090	6	20	6.010	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1000	2200	6450	2400	950	30	500	21	12	6.310	35	16	2300	15	20	6.390	20	12	6.310	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1400	200																							
25.00	0.050	5000	1400	600	5400	3900	900	30	500	29	12	5.260	34	20	2450	26	16	5.340	16	20	5.260	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1400	1000	5450	2300	850	30	500	16	12	5.310	34	16	2200	19	20	5.390	16	12	5.310	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1400	1400	5400	2300	950	30	500	10	16	5.260	19	20	2200	13	25	5.340	10	16	5.260	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1400	1800	5700	2500	950	30	500	19	12	5.610	35	16	2400	21	20	5.640	20	12	5.610	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1400	2200	6000	2700	950	30	500	21	12	5.860	40	16	2600	21	20	5.940	12	16	5.860	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1800	600																							
25.00	0.050	5000	1800	1000																							
25.00	0.050	5000	1800	1400	5500	2800	900	30	500	21	12	5.360	45	16	2400	15	25	5.440	12	16	5.360	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1800	1800	5400	3000	950	30	500	23	12	5.260	44	16	2500	25	20	5.340	24	12	5.260	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	1800	2200	5750	3100	950	30	500	24	12	5.610	48	16	2500	26	20	5.690	24	12	5.610	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	2200	200																							
25.00	0.050	5000	2200	600																							
25.00	0.050	5000	2200	1000																							
25.00	0.050	5000	2200	1400																							
25.00	0.050	5000	2200	1800	5400	3300	950	30	500	25	12	5.260	39	20	2500	18	25	5.340	26	12	5.260	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	5000	2200	2200	5600	3500	1000	30	500	28	12	5.460	39	20	2650	28	20	5.540	30	12	5.460	0	0	0	0	0	0

T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO 5R				GEOMETRIA				ATERIALE			Zap1 Axinf			Zap1 Ayinf			Ax sup			Apie1			Acortante															
		L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	L (mm)	A1 (mm)	B1 (mm)	HI (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)							
25.00	0.050	6000	200	200	6450	400	900	30	500	3	12	6310	26	16	300	3	25	6390	4	12	6310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25.00	0.050	6000	200	600	6750	900	750	30	500	6	12	6680	23	16	800	5	25	6690	6	12	6610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25.00	0.050	6000	200	1000	7500	1200	750	30	500	5	20	7360	26	16	1800	7	20	7440	4	16	7360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.050	6000	200	4000	7850	1500	700	30	500	6	25	7770	27	16	1400	11	16	7790	2	25	7710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.050	6000	200	1800	7850	2000	700	30	500	8	25	7770	28	20	1900	12	16	7790	4	20	7770	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.050	6000	200	2200	7950	2400	700	30	500	17	20	7880	66	16	1900	13	16	7890	14	12	7810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25.00	0.050	6000	600	200	6400	1000	750	30	500	14	12	6260	42	12	2200	14	16	6340	8	16	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25.00	0.050	6000	600	600	6400	1000	1050	30	500	5	16	6260	56	12	900	6	25	6340	10	12	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25.00	0.050	6000	600	1000	7150	1200	1050	30	500	11	12	7010	34	16	1800	10	20	7090	6	16	7010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25.00	0.050	6000	600	1400	7250	1700	950	30	500	13	12	7110	55	12	1600	8	25	7190	14	12	7110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	600	1800	7950	1900	1000	30	500	14	16	7880	64	12	1800	16	16	7890	16	12	7810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	600	2200	7100	2900	750	30	500	18	12	6960	41	20	2100	15	25	7040	10	16	6960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	1000	200	6400	3500	850	30	500	24	12	6260	44	16	2350	18	16	6340	24	12	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	1000	600	6400	1500	1000	30	500	12	12	6260	51	12	1400	9	25	6340	14	12	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	1000	1000	6600	1500	1100	30	500	8	16	6460	58	12	1400	9	25	6340	14	12	6460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	1000	1400	6550	1800	1100	30	500	9	16	6460	33	16	1700	11	25	6490	6	20	6410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.050	6000	1000	1800	7150	2000	1100	30	500	10	16	7010	63	12	1900	16	20	7090	20	12	7010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1000	2200	7500	2200	1100	30	500	11	16	7360	37	16	2100	16	20	7440	12	16	7360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1400	200	6650	4700	950	30	500	36	12	6510	46	20	2500	34	12	6590	38	12	6510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1400	600	6400	3000	800	30	500	20	12	6260	36	20	2200	21	20	6340	20	12	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1400	1000	6400	2000	1050	30	500	17	12	6260	54	12	1900	12	25	6340	4	25	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1400	1400	6900	2300	800	30	500	17	12	6760	29	20	2200	18	25	6840	4	25	6760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1400	1800	7550	2300	800	30	500	20	12	7440	49	16	2200	18	25	7490	4	25	7410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	1800	2200	7000	2400	1150	30	500	13	16	6860	37	16	2300	14	25	6940	24	12	6860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.050	6000	1800	200	6900	4200	1000	30	500	19	16	6760	49	20	2600	21	20	6840	8	25	6760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.050	6000	1800	600	6400	3000	900	30	500	22	12	6260	37	20	2300	17	25	6340	22	12	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.050	6000	1800	1000	6400	2400	1150	30	500	13	16	6260	35	16	2300	15	25	6340	24	12	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.050	6000	1800	1400	6400	2600	1150	30	500	9	20	6260	39	16	2500	16	25	6340	14	16	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.050	6000	1800	1800	6600	2800	1150	30	500	15	16	6460	45	16	2700	17	25	6540	28	12	6460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.050	6000	2200	200																																				
25.00	0.050	6000	2200	600																																				
25.00	0.050	6000	2200	1000																																				
25.00	0.050	6000	2200	1400	6400	3200	1050	30	500	27	12	6260	37	20	2850	18	25	6340	10	20	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.050	6000	2200	1800	6400	2900	1150	30	500	15	16	6260	50	16	2800	18	25	6340	10	20	6260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.050	6000	2200	2200	6600	3100	1150	30	500	16	16	6460	55	16	3000	19	25	6540	30	12	6460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	



Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

TIPO 5R				GEOMETRIA			ATERIALE		Zap1Axinf			Zap1Ayinf			Ax sup			Apiel		Acortante				
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	Ramas	n	Ø
(N/mm2)	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)
25.00	0.100	5000	200	200	5400	400	850	30	500	3	12	5.260	37	12	300	2	2.5	5.340	4	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	200	600	6050	900	750	30	500	6	12	5.910	21	16	800	8	16	5.990	6	12	5.910	0	0	0
25.00	0.100	5000	200	1000	6500	1300	700	30	500	5	20	6.440	37	12	1.200	9	16	6.440	8	12	6.360	0	0	0
25.00	0.100	5000	200	1400	6850	1600	700	30	500	10	20	6.710	45	12	1.600	9	16	6.790	10	12	6.710	0	0	0
25.00	0.100	5000	200	1800	6850	2100	700	30	500	13	20	6.710	40	16	2.000	17	12	6.790	12	12	6.710	0	0	0
25.00	0.100	5000	200	2200	7050	2400	750	30	500	17	20	6.910	51	16	2.050	15	12	6.990	8	16	6.910	0	0	0
25.00	0.100	5000	600	200	5400	2300	750	30	500	14	12	5.260	35	12	2.200	8	2.0	5.340	14	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	600	600	5400	1000	950	30	500	8	12	5.260	23	16	900	6	2.5	5.340	8	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	600	1000	6050	1200	950	30	500	10	12	5.910	26	16	1100	9	2.0	5.990	10	12	5.910	0	0	0
25.00	0.100	5000	600	1400	6400	1600	900	30	500	14	12	6.260	46	12	1.500	6	2.5	6.340	12	12	6.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	600	1800	6800	1800	700	30	500	11	20	6.660	22	25	1.700	12	2.0	6.740	4	2.0	6.660	0	0	6
25.00	0.100	5000	600	2200	6600	2600	800	30	500	17	16	6.460	46	16	2.200	18	16	6.540	6	2.0	6.460	0	0	0
25.00	0.100	5000	1000	200	5600	2700	700	30	500	10	16	5.460	21	25	2.150	22	16	5.540	38	12	5.460	0	0	0
25.00	0.100	5000	1000	600	5400	1800	800	30	500	12	12	5.260	38	12	1.800	14	2.0	5.340	12	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	1000	1000	5550	1600	950	30	500	13	12	5.410	42	12	1.500	9	2.5	5.490	14	12	5.410	0	0	0
25.00	0.100	5000	1000	1400	5750	1900	950	30	500	15	12	5.610	25	16	1.800	15	2.0	5.690	16	12	5.610	0	0	0
25.00	0.100	5000	1000	1800	6150	2100	950	30	500	16	12	6.010	47	12	2.100	15	2.0	6.090	6	2.0	6.010	0	0	0
25.00	0.100	5000	1000	2200	6450	2400	950	30	500	21	12	6.310	35	16	2.300	15	2.0	6.390	2.0	12	6.310	0	0	0
25.00	0.100	5000	1400	200	5400	4100	1050	30	500	35	12	5.260	44	16	2.750	15	16	5.340	3.6	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	1400	600	5450	2700	800	30	500	10	16	5.310	42	16	2.150	17	2.0	5.390	18	12	5.310	0	0	0
25.00	0.100	5000	1400	1000	5450	2300	850	30	500	16	12	5.310	34	16	2.200	19	2.0	5.390	16	12	5.310	0	0	0
25.00	0.100	5000	1400	1400	5400	2300	950	30	500	10	16	5.260	19	20	2.200	13	2.5	5.340	10	16	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	1400	1800	5700	2500	950	30	500	19	12	5.560	35	16	2.400	21	2.0	5.640	2.0	12	5.560	0	0	0
25.00	0.100	5000	1400	2200	6050	2700	950	30	500	21	12	5.910	40	16	2.600	21	2.0	5.990	12	16	5.910	0	0	0
25.00	0.100	5000	1800	200	5400	5100	1100	30	500	17	20	5.260	41	20	2.800	29	12	5.340	4.6	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	1800	600	5450	3700	950	30	500	28	12	5.310	37	20	2.500	28	16	5.390	3.0	12	5.310	0	0	12
25.00	0.100	5000	1800	1000	5400	3300	900	30	500	24	12	5.260	35	20	2.400	21	2.0	5.440	2.4	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	1800	1400	5500	2800	900	30	500	21	12	5.360	45	16	2.400	15	2.5	5.440	12	16	5.360	0	0	0
25.00	0.100	5000	1800	1800	5400	3000	950	30	500	23	12	5.260	44	16	2.500	25	2.0	5.340	2.4	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	1800	2200	5750	3100	950	30	500	24	12	5.610	48	16	2.500	26	2.0	5.690	2.4	12	5.610	0	0	0
25.00	0.100	5000	2200	200																				
25.00	0.100	5000	2200	600																				
25.00	0.100	5000	2200	1000																				
25.00	0.100	5000	2200	1400	5400	3800	1050	30	500	32	12	5.260	38	20	2.750	23	2.0	5.340	3.4	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	2200	1800	5400	3300	950	30	500	25	12	5.260	39	20	2.500	18	2.5	5.340	2.6	12	5.260	0	0	0
25.00	0.100	5000	2200	2200	5600	3500	1000	30	500	28	12	5.460	39	20	2.650	28	2.0	5.540	3.0	12	5.460	0	0	0

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R												ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante													
T	K	L	N1	N2	GEOMETRIA			HA			B-			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante														
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	A1	B1	HI				n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø							
25,00	0,100	6000	200	200	6400	400	150	30	500	3	16	6.260	33	16	300	3	20	6.340	6	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25,00	0,100	6000	200	600	7350	700	1000	30	500	6	12	7.210	33	16	600	3	25	7.290	6	12	7.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25,00	0,100	6000	200	1000	8000	1000	950	30	500	6	20	7.860	61	12	900	7	16	7.940	8	12	7.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25,00	0,100	6000	200	1400	8000	1400	900	30	500	9	20	7.960	59	12	1300	9	16	8.040	6	16	7.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25,00	0,100	6000	200	1800	8350	1700	900	30	500	13	20	8.210	60	12	1600	8	16	8.290	14	12	8.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25,00	0,100	6000	200	2200	8350	2100	900	30	500	17	20	8.210	28	20	2.000	16	12	8.290	6	20	8.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25,00	0,100	6000	600	200	6400	2000	900	30	500	15	12	6.260	46	12	2.000	8	20	6.340	10	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25,00	0,100	6000	600	600	6400	1000	1050	30	500	5	16	6.260	54	12	900	6	25	6.340	10	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25,00	0,100	6000	600	1000	7150	1200	1050	30	500	11	12	7.010	34	16	1.100	10	20	7.090	6	16	7.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25,00	0,100	6000	600	1400	7250	1600	1000	30	500	13	12	7.110	33	16	1.500	12	20	7.190	14	12	7.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,100	6000	600	1800	7450	2000	950	30	500	18	12	7.310	32	16	1.900	13	20	7.390	16	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,100	6000	600	2200	7850	2200	1000	30	500	16	16	7.710	64	12	2.200	12	20	7.790	18	12	7.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,100	6000	1000	200	7250	1900	900	30	500	16	12	7.110	65	12	1.800	15	16	7.190	8	16	7.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,100	6000	1000	600	6400	1500	1000	30	500	12	12	6.260	51	12	1.400	9	25	6.340	14	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,100	6000	1000	1000	6600	1500	1100	30	500	8	16	6.460	58	12	1.400	9	25	6.540	14	12	6.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1000	1400	6550	1800	1100	30	500	16	12	6.410	58	12	1.700	11	25	6.490	6	20	6.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1000	1800	7100	2000	1100	30	500	10	16	6.960	35	16	1.900	17	20	7.040	20	12	6.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1000	2200	7500	2200	1100	30	500	11	16	7.360	37	16	2.100	16	20	7.440	20	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1400	200	6600	3000	900	30	500	13	16	6.460	49	16	2.400	12	20	6.540	8	20	6.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1400	600	6450	2300	900	30	500	10	16	6.310	38	16	2.200	19	20	6.390	10	16	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1400	1000	6400	2000	1050	30	500	17	12	6.260	54	12	1.900	12	25	6.340	4	25	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1400	1400	6450	2000	1150	30	500	11	16	6.310	34	16	1.900	13	25	6.390	20	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,100	6000	1400	1800	6700	2200	1150	30	500	12	16	6.560	35	16	2.100	14	25	6.640	12	16	6.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1400	2200	7000	2400	1150	30	500	13	16	6.860	37	16	2.300	14	25	6.940	24	12	6.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1800	200	8150	3500	1000	30	500	12	20	8.010	30	25	3.000	12	20	8.090	8	25	8.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1800	600	6400	3200	900	30	500	23	12	6.260	40	20	2.400	14	25	6.340	14	16	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1800	1000	6400	2800	950	30	500	12	16	6.260	50	16	2.500	16	25	6.340	22	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1800	1400	6400	2400	1150	30	500	13	16	6.260	35	16	2.300	15	25	6.340	24	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1800	1800	6400	2600	1150	30	500	14	16	6.260	39	16	2.500	16	25	6.340	14	16	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	1800	2200	7150	2500	950	30	500	20	12	7.010	23	25	2.400	20	25	7.090	12	16	7.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	2200	200	6400	4100	1050	30	500	35	12	6.260	50	20	2.700	34	16	6.340	20	16	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	2200	600	6400	3600	1000	30	500	17	16	6.260	47	20	2.600	17	25	6.340	30	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,100	6000	2200	1000	6400	3200	1050	30	500	27	12	6.260	37	20	2.850	18	25	6.340	28	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,00	0,100	6000	2200	1400	6400	2900	1150	30	500	15	16	6.260	32	20	2.800	18	25	6.340	10	20	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,00	0,100	6000	2200	1800	6400	3100	1000	30	500	20	16	6.360	30	16	2.950	23	25	6.440	10	20	6.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0







Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

TIPO 5R										ATERIALE				Zapl Axinf				Zapl Ayinf				Ax sup				Apie1				Acortante						
T	K	L	N1	N2	GEOMETRIA			B-		Zapl Axinf		Zapl Ayinf		Ax sup		Apie1		Acortante																		
(N/mm2)	(N/mm2)	(mm)	(kN)	(kN)	A1	B1	HI	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L			
25,00	0,200	6000	200	200	6400	400	1400	30	500	3	16	6.260	26	20	300	3	20	6.340	6	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	200	600	7400	700	1250	30	500	4	16	7.260	27	20	600	6	16	7.340	8	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	200	1000	8650	800	1200	30	500	6	20	8.510	47	16	700	5	16	8.590	8	12	8.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	200	1400	8600	1200	1150	30	500	9	20	8.460	29	20	1100	9	12	8.540	12	12	8.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	200	1800	8750	1500	1100	30	500	9	25	8.610	44	16	1400	9	12	8.690	16	12	8.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	200	2200	8700	1900	1100	30	500	10	25	8.560	43	16	1800	10	12	8.640	4	25	8.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	600	200	6400	1700	1100	30	500	15	12	6.260	32	16	1600	11	16	6.340	16	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	600	600	6850	800	1200	30	500	5	16	6.710	37	16	700	5	25	6.790	8	12	6.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25,00	0,200	6000	600	1000	7100	1100	1150	30	500	6	16	6.960	37	16	1000	9	20	7.040	6	16	6.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	600	1400	7750	1300	1150	30	500	8	16	7.610	40	16	1200	9	20	7.690	14	12	7.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	600	1800	7900	1700	1100	30	500	8	20	7.760	39	16	1600	10	20	7.840	16	12	7.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	600	2200	8100	2000	1100	30	500	17	16	7.960	40	16	1900	16	16	8.040	20	12	7.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1000	200	6450	2000	1200	30	500	16	16	6.310	48	16	1900	9	20	6.390	24	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1000	600	6400	1600	1150	30	500	9	16	6.260	33	16	1500	11	20	6.340	16	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1000	1000	6400	1500	1150	30	500	8	16	6.260	33	16	1400	9	25	6.340	8	16	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1000	1400	6550	1800	1100	30	500	9	16	6.410	58	12	1700	11	25	6.490	6	20	6.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1000	1800	7150	2000	1100	30	500	10	16	7.010	63	12	1900	16	20	7.090	20	12	7.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1000	2200	7500	2200	1100	30	500	11	16	7.360	37	16	2100	16	20	7.440	20	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1400	200	6850	2500	1100	30	500	11	20	6.710	40	20	2800	19	16	6.790	20	16	6.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1400	600	6450	2600	1100	30	500	13	16	6.310	22	20	2500	22	20	6.390	8	25	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1400	1000	6400	2000	1100	30	500	10	16	6.260	32	16	1900	12	25	6.340	20	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1400	1400	6450	2000	1150	30	500	11	16	6.310	34	16	1900	13	25	6.390	20	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1400	1800	6700	2200	1150	30	500	12	16	6.560	35	16	2100	14	25	6.640	12	16	6.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25,00	0,200	6000	1400	2200	7000	2400	1150	30	500	13	16	6.860	37	16	2300	14	25	6.940	24	12	6.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1800	200	7500	3700	1100	30	500	21	16	7.360	26	20	3300	18	16	7.440	14	20	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1800	600	6400	3700	1100	30	500	16	16	6.260	32	20	3000	19	20	6.340	18	16	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1800	1000	6400	2800	1100	30	500	14	16	6.260	28	20	2700	21	20	6.340	26	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1800	1400	6400	2400	1150	30	500	13	16	6.260	35	16	2300	15	25	6.340	24	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1800	1800	6400	2600	1150	30	500	14	16	6.260	25	20	2500	16	25	6.340	14	16	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	1800	2200	6600	2800	1150	30	500	15	16	6.460	29	20	2700	17	25	6.540	10	20	6.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	2200	200																																
25,00	0,200	6000	2200	600	6450	4100	1100	30	500	36	12	6.310	46	20	2850	34	16	6.390	38	12	6.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	2200	1000	6400	3800	1100	30	500	19	16	6.260	42	20	2900	24	20	6.340	36	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25,00	0,200	6000	2200	1400	6400	3500	1100	30	500	17	16	6.260	37	20	2950	26	20	6.340	30	12	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,00	0,200	6000	2200	1800	6400	2900	1150	30	500	15	16	6.260	50	16	2800	18	25	6.340	10	20	6.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,00	0,200	6000	2200	2200	6600	3100	1150	30	500	16	16	6.460	55	16	3000	19	25	6.540	30	12	6.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIP0 5R												GEOMETRIA				ATERIALE		Zapl Axinf				Zapl Ayinf				Ax s up				Apliel		Aco rriante															
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n										
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)									
25.00	0.200	7000	200	200	7400	400	1750	30	500	3	20	7.260	58	16	300	3	20	7.340	8	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
25.00	0.200	7000	600	600	9250	500	1650	30	500	4	16	9.10	44	20	400	3	20	9.990	8	12	9.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
25.00	0.200	7000	200	1000	10050	700	1550	30	500	6	20	9.910	45	20	600	3	20	9.990	10	12	9.910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
25.00	0.200	7000	200	1400	10550	900	1500	30	500	6	25	10.410	71	16	800	7	12	10.490	12	12	10.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25.00	0.200	7000	200	1800	10200	1300	1400	30	500	8	25	10.060	64	16	1200	5	16	10.140	16	12	10.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25.00	0.200	7000	200	2200	10000	1700	1350	30	500	14	20	9.860	61	16	1600	10	12	9.940	20	12	9.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25.00	0.200	7000	600	600	7400	800	1500	30	500	6	16	7.260	50	16	700	5	25	7.340	6	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
25.00	0.200	7000	600	1000	8400	900	1500	30	500	4	20	8.260	37	20	800	5	25	8.340	12	12	8.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	600	1400	8850	1200	1400	30	500	5	20	8.710	36	20	1100	9	20	8.790	8	16	8.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	600	1800	9350	1400	1400	30	500	8	20	9.210	38	20	1300	6	25	9.290	10	16	9.210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	600	2200	9700	1600	1400	30	500	12	20	9.560	61	16	1500	9	20	9.640	20	12	9.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	1000	200	7950	1700	1400	30	500	12	20	7.810	40	20	1600	6	25	7.890	8	20	7.810	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	1000	600	7400	1400	1400	30	500	9	16	7.260	30	20	1300	11	20	7.340	6	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	1000	1000	7400	1300	1400	30	500	9	16	7.260	30	20	1200	9	25	7.340	16	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
25.00	0.200	7000	1000	1400	8000	1400	1400	30	500	9	16	7.860	51	16	1300	9	25	7.940	6	20	7.860	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25.00	0.200	7000	1000	1800	8450	1600	1400	30	500	11	16	8.310	53	16	1500	9	25	8.390	20	12	8.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
25.00	0.200	7000	1000	2200	8750	1900	1350	30	500	12	16	8.610	53	16	1800	15	20	8.690	22	12	8.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.200	7000	1400	200	8050	2500	1350	30	500	16	16	7.910	49	16	2400	16	16	7.990	16	16	7.910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.200	7000	1400	600	7400	2100	1350	30	500	13	16	7.260	45	16	2000	15	20	7.340	14	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.200	7000	1400	1000	7400	1800	1400	30	500	12	16	7.260	30	20	1700	11	25	7.340	12	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.200	7000	1400	1400	7700	1700	1400	30	500	7	20	7.560	31	20	1600	12	25	7.640	20	12	7.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.200	7000	1400	1800	7600	2000	1350	30	500	13	16	7.460	46	16	1900	14	25	7.540	24	12	7.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	1400	2200	8450	2000	1400	30	500	13	16	8.310	34	20	1900	12	25	8.390	24	12	8.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	1800	200	8000	3300	1350	30	500	13	20	7.960	34	20	3200	15	20	8.040	22	16	7.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	1800	600	7600	2800	1350	30	500	17	16	7.460	46	16	2700	19	20	7.540	32	12	7.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
25.00	0.200	7000	1800	1000	7400	2500	1350	30	500	10	20	7.260	45	16	2400	20	20	7.340	16	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	1800	1400	7450	2200	1350	30	500	14	16	7.310	29	20	2100	14	25	7.390	14	16	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	1800	1800	7500	2300	1350	30	500	14	16	7.360	46	16	2200	16	25	7.440	26	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	1800	2200	7650	2500	1350	30	500	10	20	7.510	47	16	2400	17	25	7.590	16	16	7.510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.200	7000	200	200	9050	3800	1350	30	500	15	20	8.910	75	16	3450	18	16	8.990	10	25	8.910	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	200	600	7500	3600	1350	30	500	22	16	7.360	59	16	3500	21	20	7.440	42	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	2200	1000	7500	3200	1350	30	500	20	16	7.360	53	16	3100	15	25	7.440	36	12	7.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.200	7000	2200	1400	7400	2900	1350	30	500	18	16	7.260	47	16	2900	16	25	7.340	12	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.200	7000	2200	1800	7400	2600	1350	30	500	16	16	7.260	45	16	2500	18	25	7.340	12	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25.00	0.200	7000	2200	2200	7550	2800	1350	30	500	17	16	7.410	46	16	2700	19	25	7.490	32	12	7.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Optimización Heurística Multiobjetivo de cimentaciones en medianería

TIPO 5R										GEOMETRIA			ATERIALE		ZapI A x inf			ZapI A y inf			Ax sup			A piel			Acortante		
T (N/mm2)	K (N/mm3)	L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	HA (mm)	BI (mm)	H1 (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	Ramas		
25.00	0.300	5000	200	200	5400	400	1250	30	500	3	16	5260	31	16	300	3	20	5340	6	12	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	200	600	6550	700	1000	30	500	4	16	6490	58	12	600	5	16	6490	4	16	6490	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	200	1000	7350	900	1050	30	500	6	20	7210	62	12	800	7	12	7290	8	12	7210	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	200	1400	7400	1300	1000	30	500	6	25	7260	59	12	1200	8	12	7340	6	16	7260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	200	1800	7550	1600	1000	30	500	9	25	7410	34	16	1500	7	12	7490	14	12	7410	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	200	2200	7550	2000	1000	30	500	17	20	7490	34	16	1900	8	12	7490	6	20	7490	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	600	200	5400	1900	1000	30	500	16	12	5260	43	12	1800	10	16	5340	16	12	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	600	600	5400	1000	1050	30	500	5	16	5260	46	12	900	8	20	5340	10	12	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	600	1000	6050	1200	1000	30	500	10	12	5910	49	12	1100	9	20	5990	10	12	5910	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	600	1400	6700	1400	1000	30	500	9	16	6560	30	16	1300	12	16	6640	12	12	6560	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	600	1800	6950	1700	1000	30	500	14	16	6810	56	12	1600	8	20	6890	14	12	6810	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	600	2200	7050	2100	1000	30	500	18	16	6910	57	12	2000	14	16	6990	4	25	6910	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1000	200	5700	2300	1000	30	500	11	20	5560	19	20	2200	9	20	5640	6	25	5560	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1000	600	5400	1800	1000	30	500	15	12	5260	43	12	1700	11	20	5340	16	12	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1000	1000	5600	1600	1000	30	500	13	12	5460	45	12	1500	13	20	5540	14	12	5460	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1000	1400	6300	1700	1000	30	500	14	12	6160	51	12	1600	13	20	6240	14	12	6160	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1000	1800	6250	2000	1000	30	500	16	12	6110	28	16	1900	14	20	6190	6	20	6110	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1000	2200	6550	2300	1000	30	500	8	20	6410	56	12	2200	13	20	6490	20	12	6410	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1400	200	5500	3600	1000	30	500	22	16	5360	18	25	3100	30	12	5440	12	20	5360	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1400	600	5400	3100	1000	30	500	27	12	5260	21	25	2950	20	20	5340	16	16	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1400	1000	5400	2300	1000	30	500	19	12	5260	28	16	2200	16	20	5340	20	12	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1400	1400	5950	2100	1000	30	500	17	12	5810	49	12	2000	17	20	5890	4	25	5810	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1400	1800	5950	2400	1000	30	500	11	16	5810	32	16	2300	18	20	5890	20	12	5810	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1400	2200	6200	2600	1000	30	500	21	12	6060	23	20	2500	19	20	6140	12	16	6060	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1800	200	5450	5100	1100	30	500	17	20	5310	41	20	2800	27	12	5390	26	16	5310	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1800	600	5450	3800	1000	30	500	34	12	5310	34	20	2700	28	16	5390	8	25	5310	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1800	1000	5400	3300	1000	30	500	27	12	5260	46	16	2600	19	20	5340	10	20	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1800	1400	5400	2800	1000	30	500	23	12	5260	41	16	2650	21	20	5340	24	12	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1800	1800	5550	2900	1000	30	500	13	16	5410	43	16	2650	23	20	5490	24	12	5410	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	1800	2200	5750	3100	1000	30	500	14	16	5610	47	16	2600	24	20	5690	6	25	5610	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	2200	200																									
25.00	0.300	5000	2200	600																									
25.00	0.300	5000	2200	1000																									
25.00	0.300	5000	2200	1400	5400	3800	1050	30	500	32	12	5260	38	20	2750	23	20	5340	12	20	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	2200	1800	5400	3300	1000	30	500	27	12	5260	35	20	2650	27	20	5340	10	20	5260	0	0	0	0	0	0		
25.00	0.300	5000	2200	2200	5600	3500	1000	30	500	28	12	5460	39	20	2650	28	20	5540	30	12	5460	0	0	0	0	0	0		

TIPO 5 R			GOMETRIA				ATERIALE		ZapL/Axinf			Axs up			Apie1		Acortante								
T	K	L	N1	N2	A1	B1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	Ø					
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)				(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)					
25,00	0,300	6000	200	200	6400	400	1600	30	500	3	16	6,260	46	16	300	3	20	6,340	8	12	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	200	600	7800	600	1450	30	500	4	16	7,660	51	16	500	3	20	7,740	8	12	7,660	0	0	0	
25,00	0,300	6000	200	1000	9050	700	1400	30	500	6	20	8,910	57	16	600	6	12	8,990	10	12	8,910	0	0	0	
25,00	0,300	6000	200	1400	8850	1000	1300	30	500	9	20	8,710	33	20	1000	7	12	8,790	12	12	8,710	0	0	0	
25,00	0,300	6000	200	1800	8950	1400	1300	30	500	8	25	8,810	53	16	1300	7	12	8,890	16	12	8,810	0	0	0	
25,00	0,300	6000	200	2200	9050	1700	1250	30	500	10	25	8,910	51	16	1600	7	12	8,990	10	16	8,910	0	0	0	
25,00	0,300	6000	600	200	6400	1500	1300	30	500	9	16	6,260	24	20	1400	10	16	6,340	6	20	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	600	600	6400	900	1350	30	500	6	16	6,260	39	16	800	7	20	6,340	6	16	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	600	1000	7400	1000	1350	30	500	4	20	7,260	45	16	900	8	20	7,340	12	12	7,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	600	1400	7950	1200	1300	30	500	9	16	7,810	30	20	1100	5	25	7,890	14	12	7,810	0	0	0	
25,00	0,300	6000	600	1800	8400	1400	1300	30	500	9	20	8,260	49	16	1300	12	16	8,340	16	12	8,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	600	2200	8550	1700	1250	30	500	12	20	8,410	48	16	1600	8	20	8,490	10	16	8,410	0	0	0	
25,00	0,300	6000	1000	200	6400	2600	1250	30	500	15	16	6,260	23	20	2500	13	16	6,340	10	20	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	1000	600	6400	1600	1300	30	500	6	20	6,260	24	20	1500	11	20	6,340	10	16	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	1000	1000	6600	1400	1300	30	500	9	16	6,460	39	16	1300	12	20	6,540	16	12	6,460	0	0	0	
25,00	0,300	6000	1000	1400	6900	1600	1300	30	500	6	20	6,760	26	20	1500	13	20	6,840	10	16	6,760	0	0	0	
25,00	0,300	6000	1000	1800	7800	1700	1250	30	500	10	16	7,660	28	20	1600	12	20	7,740	10	16	7,660	0	0	0	
25,00	0,300	6000	1000	2200	7850	1900	1250	30	500	8	20	7,710	44	16	1800	13	20	7,790	20	12	7,710	0	0	0	
25,00	0,300	6000	400	200	6400	3600	1250	30	500	13	20	6,260	39	16	3400	15	16	6,340	38	12	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	400	600	6400	2400	1250	30	500	14	16	6,260	23	20	2300	15	20	6,340	14	16	6,260	0	0	12	
25,00	0,300	6000	400	1000	6400	2000	1250	30	500	12	16	6,260	23	20	1900	15	20	6,340	12	16	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	400	1400	6750	1900	1250	30	500	11	16	6,610	38	16	1800	11	25	6,690	20	12	6,610	0	0	0	
25,00	0,300	6000	400	1800	6650	2200	1250	30	500	8	20	6,510	24	20	2100	13	25	6,590	24	12	6,510	0	0	0	
25,00	0,300	6000	400	2200	7500	2200	1250	30	500	8	20	7,360	42	16	2100	17	20	7,440	24	12	7,360	0	0	0	
25,00	0,300	6000	800	200	7350	3700	1250	30	500	21	16	7,210	36	20	3450	28	12	7,290	22	16	7,210	0	0	0	
25,00	0,300	6000	800	600	6600	3200	1250	30	500	19	16	6,460	44	16	3100	27	16	6,540	12	20	6,460	0	0	0	
25,00	0,300	6000	800	1000	6400	2900	1250	30	500	17	16	6,260	38	16	2800	19	20	6,340	32	12	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	800	1400	6400	2500	1250	30	500	14	16	6,260	23	20	2400	20	20	6,340	26	12	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	800	1800	6600	2500	1250	30	500	14	16	6,460	37	16	2400	14	25	6,540	26	12	6,460	0	0	0	
25,00	0,300	6000	800	2200	7050	2600	1250	30	500	15	16	6,910	40	16	2500	22	20	6,990	16	16	6,910	0	0	0	
25,00	0,300	6000	2200	200																					
25,00	0,300	6000	2200	600	6550	4100	1250	30	500	15	20	6,410	41	20	3250	32	16	6,490	24	16	6,410	0	0	12	
25,00	0,300	6000	2200	1000	6400	3700	1250	30	500	14	20	6,260	37	20	3300	23	20	6,340	22	16	6,260	0	0	10	
25,00	0,300	6000	2200	1400	6400	3300	1250	30	500	12	20	6,260	51	16	3200	23	20	6,340	8	25	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	2200	1800	6400	2900	1250	30	500	17	16	6,260	45	16	2800	17	25	6,340	52	12	6,260	0	0	0	
25,00	0,300	6000	2200	2200	6750	3000	1250	30	500	17	16	6,610	49	16	2900	17	25	6,690	18	16	6,610	0	0	0	

TIP O 5R											GEOMETRIA			ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apl eI			Ac or tante			
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø
(N/mm2)	(N/mm3)	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)
25.00	0.300	7000	200	200	7400	400	2000	30	500	3	20	7.260	43	20	300	3	20	7.340	10	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	200	600	8750	600	1800	30	500	5	16	8.610	29	25	500	5	16	8.690	10	12	8.610	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	200	1000	9700	800	1700	30	500	5	20	9.560	74	16	700	5	16	9.640	12	12	9.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	200	1400	10200	1000	1650	30	500	6	25	10.060	76	16	900	7	12	10.140	14	12	10.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	200	1800	10550	1200	1600	30	500	8	25	10.410	76	16	1100	6	12	10.490	10	16	10.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	200	2200	10500	1500	1600	30	500	9	25	10.360	76	16	1400	6	12	10.440	12	16	10.360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	600	200	7400	300	1600	30	500	6	20	7.260	53	16	1200	6	20	7.340	10	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	600	600	7400	800	1700	30	500	4	20	7.260	57	16	700	7	20	7.340	12	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	600	1000	8250	1000	1650	30	500	5	20	8.110	39	20	900	8	20	8.190	14	12	8.110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	600	1400	9600	1000	1650	30	500	4	25	9.460	46	20	900	7	20	9.540	14	12	9.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	600	1800	9850	1200	1600	30	500	9	20	9.710	71	16	1100	5	25	9.790	10	16	9.710	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	600	2200	10150	1400	1600	30	500	8	25	10.010	73	16	1300	7	20	10.090	20	12	10.010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	200	7400	2100	1600	30	500	10	20	7.260	34	20	2000	12	16	7.340	16	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	600	7400	4000	1600	30	500	11	16	7.260	53	16	1300	11	20	7.340	20	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	1000	7400	5300	1600	30	500	6	20	7.260	53	16	1200	8	25	7.340	10	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	1400	8200	4400	1600	30	500	11	16	8.060	59	16	1300	8	25	8.140	20	12	8.060	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	1800	8900	1500	1600	30	500	11	16	8.760	64	16	1400	8	25	8.840	12	16	8.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	2200	9100	1700	1550	30	500	12	16	8.960	64	16	1600	13	20	9.040	8	20	8.960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	4400	200	7400	3000	1550	30	500	21	16	7.260	33	20	2900	25	12	7.340	22	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	4400	600	7400	2500	1550	30	500	12	20	7.260	59	16	2400	20	25	7.340	14	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	4400	1000	7400	4000	1800	30	500	13	16	7.260	53	16	1700	15	20	7.340	14	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	4400	1400	7450	4800	1600	30	500	13	16	7.310	54	16	1700	11	25	7.390	14	16	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	4400	1800	7600	2000	1550	30	500	14	16	7.460	53	16	1900	12	25	7.540	6	25	7.460	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	4400	2200	8350	2000	1550	30	500	14	16	8.410	38	20	1900	17	20	8.490	6	25	8.410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	200	7700	3400	1550	30	500	24	16	7.560	54	16	3300	27	12	7.640	16	20	7.560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	600	7400	2900	1550	30	500	13	20	7.260	52	16	2800	11	25	7.340	14	20	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	1000	7400	2600	1550	30	500	12	20	7.260	52	16	2500	19	20	7.340	34	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	1400	7400	2200	1550	30	500	10	20	7.260	33	20	2100	13	25	7.340	30	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	1800	7450	2300	1550	30	500	16	16	7.310	52	16	2200	14	25	7.390	30	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	8000	2200	7900	2400	1550	30	500	17	16	7.760	55	16	2300	14	25	7.840	32	12	7.760	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	2200	200	7450	4400	1550	30	500	31	16	7.310	59	16	3950	29	12	7.390	58	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	2200	600	7400	3700	1550	30	500	26	16	7.260	33	20	3600	31	16	7.340	28	16	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	2200	1000	7400	3300	1550	30	500	23	16	7.260	52	16	3250	23	20	7.340	44	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	2200	1400	7400	2900	1550	30	500	13	20	7.260	33	20	2800	24	20	7.340	38	12	7.260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	2200	1800	7450	2600	1550	30	500	12	20	7.310	52	16	2500	15	25	7.390	34	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25.00	0.300	7000	2200	2200	7450	2800	1550	30	500	20	16	7.310	52	16	2700	17	25	7.390	38	12	7.310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

T	TIP-O 5 R			GEOMETRIA			ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante					
	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>3</sup> )	K	L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	Ramas	n	cercos	Ø (mm)
30,00	0,050	5000	200	200	5400	700	600	30	500	4	12	5.260	26	12	600	3	25	5.340	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	200	600	5750	1000	600	30	500	5	12	5.690	28	12	900	8	20	5.690	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	200	1000	6200	1200	550	30	500	7	16	6.060	30	12	1.100	9	20	6.140	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	200	1400	6400	1600	550	30	500	9	20	6.260	54	12	1.500	14	16	6.340	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	200	1800	6550	2000	600	30	500	12	20	6.410	47	16	1.700	12	16	6.490	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	200	2200	6750	2300	700	30	500	15	20	6.680	53	16	1.900	19	12	6.690	14	12	6.610	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	600	200	5400	2800	600	30	500	6	16	5.410	29	16	700	7	20	5.490	4	20	5.410	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	600	600	5550	800	1000	30	500	6	16	5.410	29	16	700	7	20	5.490	4	20	5.410	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	600	1000	5900	1200	950	30	500	10	12	5.760	45	12	1.100	6	25	5.840	10	12	5.760	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	600	1400	6700	1200	1000	30	500	9	16	6.560	59	12	1.100	8	20	6.640	4	20	6.560	0	0	0	0	0	6
30,00	0,050	5000	600	1800	7050	1700	800	30	500	11	20	6.910	23	20	1.600	9	20	6.990	6	20	6.910	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	600	2200	5950	2900	800	30	500	19	12	5.810	34	20	2.200	17	20	5.890	20	12	5.810	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1000	200	5800	4000	750	30	500	24	12	5.660	37	20	2.100	30	12	5.740	14	16	5.660	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1000	600	5400	2000	750	30	500	12	12	5.260	46	12	1.900	15	20	5.340	12	12	5.260	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1000	1000	5400	1400	1050	30	500	12	12	5.260	26	16	1.300	8	25	5.340	14	12	5.260	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1000	1400	5650	1600	1050	30	500	14	12	5.510	48	12	1.500	9	25	5.590	14	12	5.510	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1000	1800	6150	1800	1050	30	500	16	12	6.010	52	12	1.700	14	20	6.090	16	12	6.010	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1000	2200	6650	1800	1150	30	500	12	16	6.510	22	20	1.700	12	20	6.590	10	16	6.510	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1400	200	5900	3800	900	30	500	33	12	5.760	28	25	2.550	27	16	5.840	8	25	5.760	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1400	600	5400	2000	950	30	500	16	12	5.260	45	12	1.900	17	20	5.340	16	12	5.260	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1400	1000	5450	1900	1000	30	500	17	12	5.310	48	12	1.800	11	25	5.390	4	25	5.310	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1400	1800	5900	2000	1000	30	500	10	16	5.760	52	12	1.900	17	20	5.840	20	12	5.760	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1400	2200	6050	2200	1000	30	500	11	16	5.910	30	16	2.100	11	25	5.990	20	12	5.910	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1800	200																							
30,00	0,050	5000	1800	600																							
30,00	0,050	5000	1800	1000	5400	2300	1050	30	500	11	16	5.260	32	16	2.300	13	25	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1800	1400	5750	2300	1000	30	500	12	16	5.610	32	16	2.200	13	25	5.690	12	16	5.610	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	1800	2200	5900	2500	1000	30	500	22	12	5.760	36	16	2.400	21	20	5.840	24	12	5.760	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	2200	200																							
30,00	0,050	5000	2200	600																							
30,00	0,050	5000	2200	1000																							
30,00	0,050	5000	2200	1400																							
30,00	0,050	5000	2200	1800	5400	2900	1050	30	500	14	16	5.260	46	16	2.750	16	25	5.340	14	16	5.260	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	5000	2200	2200	5400	3000	1000	30	500	15	16	5.260	45	16	2.850	17	25	5.340	28	12	5.260	0	0	0	0	0	0





T	K (N/mm <sup>2</sup> )	TIP O. 5R			GEOMETRIA				ATERIALE				Zap1.Axinf				Zap1.Ayinf				Ax sup				Apie1				Acortante				
		L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	Ramas	n	Ø (mm)				
30,00	0,050	7000	200	200	7400	400	1100	30	500	3	16	7,260	6,5	12	300	3	25	7,340	4	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	200	600	8000	600	1050	30	500	3	16	7,860	6,7	12	500	4	25	7,940	6	12	7,860	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	200	1000	8550	900	950	30	500	4	20	8,410	6,5	12	800	7	20	8,490	4	16	8,410	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	200	1400	9100	1100	900	30	500	9	20	8,960	3,7	16	1000	7	20	9,040	8	12	8,960	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	200	1800	8800	1600	900	30	500	14	16	8,660	6,4	12	1500	8	20	8,740	12	12	8,660	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	200	2200	8950	1900	850	30	500	13	20	8,810	7,9	12	1900	9	20	8,890	14	12	8,810	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	600	200	7400	2100	850	30	500	8	16	7,260	5,1	12	2000	15	16	7,340	16	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	600	600	7550	900	1200	30	500	5	16	7,410	2,6	20	800	6	25	7,490	6	16	7,410	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	600	1000	7950	900	1400	30	500	6	16	7,810	5,0	16	800	6	25	7,890	6	16	7,810	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	600	1400	8550	1100	1400	30	500	7	16	8,410	5,4	16	1000	6	25	8,490	14	12	8,410	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	600	1800	7650	2100	900	30	500	11	16	7,510	3,6	20	2000	17	25	7,590	20	12	7,510	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	600	2200	8250	2100	850	30	500	10	16	8,110	4,5	16	2000	15	25	8,190	16	12	8,110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1000	200	8350	2300	850	30	500	9	16	8,210	7,1	12	2200	18	16	8,290	6	20	8,210	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
30,00	0,050	7000	1000	600	7400	1100	1300	30	500	7	16	7,260	2,8	20	1000	8	25	7,340	12	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1000	1000	7450	1100	1500	30	500	8	16	7,310	5,1	16	1000	8	25	7,390	16	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1000	1400	7800	1300	1450	30	500	9	16	7,660	5,1	16	1200	9	25	7,740	6	20	7,660	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1000	1800	8300	1400	1500	30	500	10	16	8,160	5,6	16	1300	9	25	8,240	10	16	8,160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1000	2200	8650	1700	1450	30	500	12	16	8,510	3,6	20	1600	14	20	8,590	12	16	8,510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1400	200	9350	3100	1000	30	500	2,5	12	9,210	7,6	12	2,800	12	25	9,290	6	25	9,210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1400	600	7400	2300	850	30	500	16	12	7,260	3,0	20	2,200	15	25	7,340	16	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1400	1000	7400	1500	1400	30	500	10	16	7,260	3,0	20	1,400	11	25	7,340	10	16	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1400	1400	7700	1600	1550	30	500	7	20	7,260	5,2	16	1,400	11	25	7,340	20	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1400	1800	7900	1900	1100	30	500	13	16	8,960	8,0	12	1,800	15	25	9,040	18	12	8,960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1800	200	7500	5100	100	30	500	2,6	16	7,360	3,6	25	3,050	38	12	7,440	46	12	7,360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1800	600	7450	3500	900	30	500	2,6	12	7,310	5,2	20	2,400	17	25	7,390	10	20	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1800	1000	7400	2400	1150	30	500	13	16	7,260	2,6	20	2,300	15	25	7,340	24	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
30,00	0,050	7000	1800	1400	7400	1800	1500	30	500	8	20	7,260	5,0	16	1,700	13	25	7,340	24	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	1800	1800	7400	1900	1550	30	500	14	16	7,260	3,3	20	1,800	14	25	7,340	14	16	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	1800	2200	7700	2000	1550	30	500	14	16	7,560	5,4	16	1,900	15	25	7,640	26	12	7,560	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	2200	200	8550	4200	100	30	500	2,1	16	8,410	4,1	25	3,050	16	25	8,490	38	12	8,410	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	2200	600	7400	3500	1000	30	500	16	16	7,260	5,2	20	2,600	20	25	7,340	30	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	2200	1000	7400	2400	1350	30	500	15	16	7,260	4,5	16	2,300	16	25	7,340	16	20	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	2200	1400	7450	2100	1550	30	500	15	16	7,310	5,2	16	2,000	16	25	7,390	28	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,050	7000	2200	1800	7450	2100	1550	30	500	15	16	7,310	5,2	16	2,000	16	25	7,390	28	12	7,310	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,00	0,050	7000	2200	2200	7400	2300	1550	30	500	16	16	7,260	3,3	20	2,200	17	25	7,340	30	12	7,260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>2</sup> )	L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	GEOMETRIA			ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax s up			ApieI			Aco rtante		
					A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	RAMAS
30,00	0,100	5000	200	200	5400	400	850	30	500	3	12	5.260	37	12	300	2	25	5.340	4	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	200	600	5850	800	750	30	500	5	12	5.790	35	12	700	6	20	5.790	6	12	5.700	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	200	1000	6450	1100	700	30	500	5	20	6.310	36	12	1000	9	16	6.390	4	16	6.310	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	200	1400	6550	1500	700	30	500	12	16	6.410	40	12	1400	6	20	6.490	2	25	6.410	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	200	1800	6800	1800	700	30	500	8	25	6.660	35	16	1700	10	16	6.740	10	12	6.660	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	200	2200	6750	2300	700	30	500	15	20	6.610	53	16	1900	19	12	6.690	14	12	6.660	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	600	200	5400	1100	800	30	500	7	16	5.260	48	12	1000	9	20	5.340	10	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	600	600	5450	900	1000	30	500	8	12	5.310	44	12	800	5	25	5.390	8	12	5.310	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	600	1000	5900	1200	950	30	500	10	12	5.760	45	12	1100	10	20	5.840	10	12	5.760	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	600	1400	6050	1600	900	30	500	12	12	5.910	44	12	1500	11	20	5.990	12	12	5.910	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	600	1800	6350	1900	900	30	500	10	16	6.210	46	12	1800	11	20	6.290	14	12	6.210	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	600	2200	6150	2600	700	30	500	21	12	6.010	36	20	2.000	18	20	6.090	16	12	6.010	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1000	200	5400	2600	700	30	500	19	12	5.260	23	20	2.100	16	16	5.340	4	25	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1000	600	5400	1500	900	30	500	11	12	5.260	39	12	1400	12	20	5.340	4	20	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1000	1000	5400	1400	1050	30	500	12	12	5.260	46	12	1300	8	25	5.340	14	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1000	1400	5650	1600	1050	30	500	14	12	5.510	48	12	1500	9	25	5.590	14	12	5.510	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1000	1800	6100	1800	1050	30	500	9	16	5.960	51	12	1700	14	20	6.040	16	12	5.960	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1000	2200	6250	2200	1000	30	500	10	16	6.110	53	12	2.200	15	20	6.190	18	12	6.110	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1400	200	5850	3600	850	30	500	25	12	5.710	36	20	2.300	30	12	5.790	14	16	5.710	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1400	600	5400	2200	700	30	500	8	16	5.260	40	16	1950	13	25	5.340	8	16	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1400	1000	5400	1900	1000	30	500	16	12	5.260	43	12	1800	16	20	5.340	16	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1400	1400	5500	2000	1050	30	500	17	12	5.360	26	16	1900	17	20	5.440	4	25	5.360	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1400	1800	5900	2000	1100	30	500	10	16	5.760	52	12	1900	17	20	5.840	20	12	5.760	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1400	2200	6050	2200	1100	30	500	11	16	5.910	30	16	2.100	11	25	5.990	20	12	5.910	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1800	200	8200	3400	1000	30	500	16	16	8.060	71	16	8.140	10	20	8.140	10	20	8.060	0	0	8	8
30,00	0,100	5000	1800	600	5450	3100	850	30	500	12	16	5.310	37	20	2.250	19	20	5.390	22	12	5.310	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1800	1000	5400	2700	900	30	500	20	12	5.260	42	16	2.400	21	20	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1800	1400	5400	2300	1050	30	500	11	16	5.260	32	16	2.300	13	25	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1800	1800	5750	2300	1100	30	500	12	16	5.610	32	16	2.200	13	25	5.690	12	16	5.610	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	1800	2200	5900	2500	1100	30	500	13	16	5.760	36	16	2.400	21	20	5.840	24	12	5.760	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	2200	200																					
30,00	0,100	5000	2200	600	5450	4100	1050	30	500	35	12	5.310	42	20	2.700	19	20	5.390	20	16	5.310	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	2200	1000	5400	3500	1000	30	500	28	12	5.260	38	20	2.600	22	20	5.340	30	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	2200	1400	5400	3100	950	30	500	24	12	5.260	36	20	2.500	26	20	5.340	24	12	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	2200	1800	5400	2900	1050	30	500	25	12	5.260	29	20	2.800	16	25	5.340	14	16	5.260	0	0	0	0
30,00	0,100	5000	2200	2200	5600	2900	1100	30	500	26	12	5.460	29	20	2.800	16	25	5.540	16	16	5.460	0	0	0	0

TIP-O 5R		GEOMETRIA					ATERIALE		Zapl'Axinf			Zapl'Axinf			Ax sup			Apiel		Acortante			
		T (N/mm2)	K (N/mm3)	L (mm)	N1 (kN)	N2 (kN)	A1 (mm)	B1 (mm)	HI (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	Ramas	n cerco (mm)	
30.00	0.100	6000	200	200	6400	400	150	30	500	3	16	6.260	33	16	300	3	20	6.340	6	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	200	600	7350	600	1050	30	500	3	16	7.210	35	16	500	4	20	7.290	6	12	7.210	0	0
30.00	0.100	6000	200	1000	7750	900	950	30	500	7	16	7.610	59	12	800	5	20	7.690	4	16	7.610	0	0
30.00	0.100	6000	200	1400	8000	1200	900	30	500	8	20	7.860	33	16	1000	9	16	7.940	10	12	7.860	0	0
30.00	0.100	6000	200	1800	7950	1600	900	30	500	11	20	7.810	57	12	1500	10	16	7.890	12	12	7.810	0	0
30.00	0.100	6000	200	2200	8100	1900	900	30	500	14	20	7.960	66	12	1800	10	16	8.040	14	12	7.960	0	0
30.00	0.100	6000	600	200	6400	900	1250	30	500	7	16	6.260	21	25	800	6	25	6.340	10	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	600	600	6550	800	1200	30	500	5	16	6.410	23	20	700	5	25	6.490	8	12	6.410	0	0
30.00	0.100	6000	600	1000	6850	1000	1200	30	500	6	16	6.710	37	16	900	6	25	6.790	10	12	6.710	0	0
30.00	0.100	6000	600	1400	7500	1200	1200	30	500	7	16	7.360	26	20	1100	9	20	7.440	12	12	7.360	0	0
30.00	0.100	6000	600	1800	7000	2000	900	30	500	15	12	6.860	56	12	2000	17	20	6.940	6	20	6.860	0	0
30.00	0.100	6000	600	2200	7350	2200	900	30	500	12	16	7.210	39	16	2100	16	20	7.290	16	12	7.210	0	0
30.00	0.100	6000	1000	200	6400	2000	900	30	500	12	20	6.260	56	12	2000	13	25	6.340	16	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1000	600	6400	1300	1100	30	500	7	16	6.260	32	16	1200	8	25	6.340	12	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1000	1000	6400	1200	1300	30	500	7	16	6.260	24	20	1100	8	25	6.340	14	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1000	1400	6500	1600	1200	30	500	9	16	6.360	35	16	1500	10	25	6.440	16	12	6.360	0	0
30.00	0.100	6000	1000	1800	7200	1600	1250	30	500	9	16	7.060	41	16	1500	9	25	7.140	6	20	7.060	0	0
30.00	0.100	6000	1000	2200	7850	1600	1250	30	500	14	16	7.710	31	20	1500	8	25	7.790	6	20	7.710	0	12
30.00	0.100	6000	1400	200	6650	2900	900	30	500	12	16	6.510	22	25	2750	12	20	6.590	8	20	6.510	0	0
30.00	0.100	6000	1400	600	6400	1900	900	30	500	14	12	6.260	55	12	1800	12	25	6.340	14	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1400	1000	6400	1700	1200	30	500	10	16	6.260	35	16	1600	11	25	6.340	10	16	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1400	1400	6400	1700	1300	30	500	10	16	6.260	24	20	1600	11	25	6.340	10	16	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1400	1800	6750	1800	1300	30	500	11	16	6.610	40	16	1700	12	25	6.690	20	12	6.610	0	0
30.00	0.100	6000	1400	2200	6900	2100	1250	30	500	12	16	6.760	39	16	2000	13	25	6.840	22	12	6.760	0	0
30.00	0.100	6000	1800	200	7950	3400	900	30	500	14	16	7.810	55	20	2400	21	16	7.890	14	16	7.810	0	6
30.00	0.100	6000	1800	600	6400	2600	900	30	500	19	12	6.260	49	16	2400	14	25	6.340	20	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1800	1000	6400	2500	1100	30	500	12	16	6.260	36	16	2200	14	25	6.340	12	16	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1800	1400	6400	2000	1300	30	500	12	16	6.260	24	20	1900	13	25	6.340	8	20	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	1800	1800	6600	2100	1300	30	500	13	16	6.460	39	16	2000	14	25	6.540	24	12	6.460	0	0
30.00	0.100	6000	1800	2200	7600	2000	1050	30	500	17	12	7.460	39	16	1900	16	25	7.540	10	16	7.460	0	0
30.00	0.100	6000	2200	200	8400	3900	1050	30	500	33	12	8.260	62	20	2700	34	12	8.340	34	12	8.260	0	12
30.00	0.100	6000	2200	600	6400	3400	950	30	500	26	12	6.260	48	20	2500	15	25	6.340	28	12	6.260	0	10
30.00	0.100	6000	2200	1000	6400	3000	900	30	500	22	12	6.260	47	20	2400	19	25	6.340	22	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	2200	1400	6400	2700	1150	30	500	14	16	6.260	30	20	2600	16	25	6.340	26	12	6.260	0	0
30.00	0.100	6000	2200	1800	6550	2600	1000	30	500	11	20	6.410	54	16	2500	21	25	6.490	12	16	6.410	0	0
30.00	0.100	6000	2200	2200	6450	2600	1300	30	500	16	16	6.310	39	16	2500	17	25	6.390	16	16	6.310	0	0

TIPUSR		GEOMETRIA				ATERIALE		Zap1Axinf			Zap1Ayinf			Axsup			Apiel			Acortante				
		T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	Ramas	n	Ø	
30,00	0,100	7000	200	200	7400	400	1400	30	500	3	16	7,260	30	20	300	3	20	7,340	6	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	200	600	8550	500	1300	30	500	3	16	8,410	32	20	400	4	20	8,490	6	12	8,410	0	0	0
30,00	0,100	7000	200	1000	8950	800	1200	30	500	7	16	8,810	31	20	700	5	20	8,890	8	12	8,810	0	0	0
30,00	0,100	7000	200	1400	9450	1000	1150	30	500	8	20	9,310	49	16	900	5	20	9,390	10	12	9,310	0	0	0
30,00	0,100	7000	200	1800	9450	1300	1000	30	500	7	25	9,310	47	16	1200	9	16	9,390	12	12	9,310	0	0	0
30,00	0,100	7000	200	2200	9500	1600	1000	30	500	9	25	9,360	84	12	1500	6	20	9,440	16	12	9,360	0	0	0
30,00	0,100	7000	600	200	7400	1700	1000	30	500	15	12	7,260	37	16	1600	8	20	7,340	16	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	600	600	7400	700	1450	30	500	3	20	7,260	31	20	600	5	25	7,340	10	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	600	1000	7950	900	1400	30	500	6	16	7,810	50	16	800	6	25	7,890	12	12	7,810	0	0	0
30,00	0,100	7000	600	1400	8150	1300	1250	30	500	8	16	8,010	46	16	1200	8	25	8,090	14	12	8,010	0	0	0
30,00	0,100	7000	600	1800	8050	1800	1000	30	500	9	16	7,910	40	16	1700	11	25	7,990	6	20	7,910	0	0	0
30,00	0,100	7000	600	2200	8550	1900	1000	30	500	12	16	8,410	75	12	1800	15	20	8,490	4	25	8,410	0	0	0
30,00	0,100	7000	1000	600	7450	1600	1450	30	500	14	16	7,310	52	25	1500	8	25	7,340	12	12	7,260	0	0	6
30,00	0,100	7000	1000	600	7400	1000	1300	30	500	7	16	7,260	28	20	1000	8	25	7,340	12	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1000	1000	7400	1000	1500	30	500	5	20	7,260	32	20	1000	8	25	7,340	14	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1000	1400	7800	1300	1450	30	500	9	16	7,660	51	16	1200	9	25	7,740	16	12	7,660	0	0	0
30,00	0,100	7000	1000	1800	8300	1400	1500	30	500	10	16	8,160	56	16	1300	9	25	8,240	18	12	8,160	0	0	0
30,00	0,100	7000	1000	2200	8100	2000	1300	30	500	12	16	7,960	48	16	1900	12	25	8,040	22	12	7,960	0	0	0
30,00	0,100	7000	1400	200	7400	2200	1250	30	500	13	16	7,260	42	16	2100	16	16	7,340	6	25	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1400	600	7450	1800	1000	30	500	16	12	7,310	37	16	1700	12	25	7,390	10	16	7,310	0	0	10
30,00	0,100	7000	1400	1000	7400	1500	1400	30	500	10	16	7,260	47	16	1400	11	25	7,340	10	16	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1400	1400	7400	1500	1550	30	500	11	16	7,260	52	16	1400	11	25	7,340	20	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1400	1800	7700	1600	1550	30	500	12	16	7,560	54	16	1500	12	25	7,640	12	16	7,560	0	0	0
30,00	0,100	7000	1400	2200	8200	1700	1550	30	500	8	20	8,060	57	16	1600	12	25	8,140	8	20	8,060	0	0	0
30,00	0,100	7000	1800	200	7450	3200	1000	30	500	16	16	7,310	57	16	2900	13	20	7,390	30	12	7,310	0	0	0
30,00	0,100	7000	1800	600	7400	2300	1000	30	500	13	16	7,260	27	20	2200	14	25	7,340	8	20	7,260	0	0	10
30,00	0,100	7000	1800	1000	7400	2100	1250	30	500	12	16	7,260	42	16	2000	14	25	7,340	22	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1800	1400	7400	1800	1500	30	500	13	16	7,260	50	16	1700	13	25	7,340	24	12	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1800	1800	7400	1900	1550	30	500	14	16	7,260	33	20	1800	14	25	7,340	14	16	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	1800	2200	7700	2000	1550	30	500	14	16	7,560	54	16	1900	15	25	7,640	26	12	7,560	0	0	0
30,00	0,100	7000	2200	200	8850	3500	1050	30	500	30	12	8,710	57	20	2750	22	16	8,790	32	12	8,710	0	0	12
30,00	0,100	7000	2200	600	7400	3000	1000	30	500	15	16	7,260	62	16	2850	23	20	7,340	10	20	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	2200	1000	7400	2600	1000	30	500	13	16	7,260	55	16	2500	19	25	7,340	24	12	7,260	0	0	12
30,00	0,100	7000	2200	1400	7400	2400	1350	30	500	15	16	7,260	45	16	2300	16	25	7,340	10	20	7,260	0	0	0
30,00	0,100	7000	2200	1800	7450	2100	1550	30	500	15	16	7,310	52	16	2000	16	25	7,390	10	20	7,310	0	0	0
30,00	0,100	7000	2200	2200	7400	2300	1550	30	500	16	16	7,260	33	20	2200	17	25	7,340	30	12	7,260	0	0	0

Anexo II: Resultados del estudio de parametrización.

TIPO 5R										ATERIALE		Zapl/Axinf			Zapl/Ayinf			Ax sup			Apiel			Acortante			
T	K	L	N1	N2	A1	B1	HI	HA	B-	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	Ramas	n	Ø	
30.00	0.200	5000	200	200	5400	400	100	30	500	3	16	5.260	27	16	300	3	2.0	5.340	4	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	200	600	6150	700	950	30	500	3	16	6.010	47	12	600	6	16	6.090	6	12	6.010	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	200	1000	6650	1000	900	30	500	5	20	6.510	48	12	900	7	16	6.590	8	12	6.510	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	200	1400	6950	1300	900	30	500	8	20	6.810	28	16	1200	7	16	6.890	10	12	6.810	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	200	1800	6950	1700	850	30	500	12	20	6.810	27	16	1600	13	12	6.890	12	12	6.810	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	200	2200	7050	2000	850	30	500	15	20	6.910	37	16	1900	13	12	6.990	14	12	6.910	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	600	200	5400	2100	850	30	500	8	16	5.260	37	12	2000	12	16	5.340	16	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	600	600	5450	900	1000	30	500	8	12	5.310	44	12	800	5	2.5	5.390	8	12	5.310	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	600	1000	5900	1200	950	30	500	10	12	5.760	45	12	1100	6	2.5	5.840	10	12	5.760	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	600	1400	6050	1600	900	30	500	12	12	5.910	44	12	1500	11	2.0	5.990	12	12	5.910	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	600	1800	6350	1900	900	30	500	10	16	6.210	46	12	1800	11	2.0	6.290	14	12	6.210	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	600	2200	6550	2200	900	30	500	15	16	6.410	35	16	2100	17	16	6.490	16	12	6.410	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1000	200	5450	2200	900	30	500	11	16	5.310	36	20	2100	18	2.0	5.390	4	2.5	5.310	0	0	0	0	8	
30.00	0.200	5000	1000	600	5400	1500	900	30	500	11	12	5.260	39	12	1400	12	2.0	5.340	4	2.0	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1000	1000	5400	1400	1050	30	500	12	12	5.260	46	12	1300	8	2.5	5.340	14	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1000	1400	5650	1600	1050	30	500	14	12	5.510	48	12	1500	9	2.5	5.590	14	12	5.510	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1000	1800	6100	1800	1050	30	500	9	16	5.960	51	12	1700	14	2.0	6.040	16	12	5.960	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1000	2200	6250	2200	1000	30	500	18	12	6.110	52	12	2200	15	2.0	6.190	18	12	6.110	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1400	200	6200	2800	850	30	500	11	16	6.060	23	2.5	2550	16	16	6.140	6	2.5	6.060	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1400	600	5950	2300	850	30	500	12	2.5	5.810	29	16	2200	16	2.0	5.890	16	12	5.810	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1400	1000	5400	1900	1000	30	500	16	12	5.260	43	12	1800	16	2.0	5.340	16	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1400	1400	5500	2000	1050	30	500	17	12	5.360	26	16	1900	17	2.0	5.440	10	16	5.360	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1400	1800	5600	2100	1100	30	500	19	12	5.460	50	12	2000	12	2.5	5.540	20	12	5.460	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1400	2200	6150	2100	850	30	500	16	16	6.010	42	20	2000	17	2.5	6.090	16	12	6.010	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1800	200	6000	3800	950	30	500	13	20	5.860	32	2.5	2600	34	12	5.940	8	2.5	5.860	0	0	0	0	8	
30.00	0.200	5000	1800	600	5450	3100	850	30	500	21	12	5.310	37	20	2300	19	20	5.390	12	16	5.310	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1800	1000	5400	2700	900	30	500	20	12	5.260	42	16	2400	21	2.0	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1800	1400	5400	2300	1050	30	500	11	16	5.260	32	16	2300	13	2.5	5.340	20	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1800	1800	5750	2300	1100	30	500	12	16	5.610	32	16	2200	13	2.5	5.690	12	16	5.610	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	1800	2200	5900	2500	1100	30	500	22	12	5.760	36	16	2400	21	2.0	5.840	24	12	5.760	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	2200	200																							
30.00	0.200	5000	2200	600	5400	4000	1050	30	500	19	16	5.260	41	20	2700	14	2.5	5.340	20	16	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	2200	1000	5400	3500	1000	30	500	28	12	5.260	38	20	2600	22	2.0	5.340	30	12	5.260	0	0	0	0	10	
30.00	0.200	5000	2200	1400	5400	3100	950	30	500	24	12	5.260	36	20	2500	26	2.0	5.340	24	12	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	2200	1800	5400	2900	1050	30	500	25	12	5.260	29	20	2800	16	2.5	5.340	14	16	5.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	5000	2200	2200	5400	3000	1100	30	500	15	16	5.260	45	16	2850	17	2.5	5.340	10	20	5.260	0	0	0	0	0	

T (N/mm <sup>2</sup> )	K (N/mm <sup>2</sup> )	TIPO 5R		GEOMETRIA						ATERIALE			Zapl Axinf			Zapl Ayinf			Ax sup			ApieI			Acortante		
		L (mm)	N1 (KN)	N2 (KN)	A1 (mm)	B1 (mm)	H1 (mm)	HA	B-	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	L (mm)	n	Ø (mm)	Ramas	n cercos	Ø (mm)	
30,00	0,200	6000	200	6400	400	1400	30	500	3	16	6,260	26	20	300	3	20	6,340	6	12	6,260	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	200	6400	400	1400	30	500	4	16	7,160	43	16	500	4	20	7,240	8	12	7,160	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	200	8100	800	1200	30	500	5	20	7,960	28	20	700	6	16	8,040	8	12	7,960	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	200	8300	1100	1150	30	500	8	20	8,160	43	16	1000	6	16	8,240	6	16	8,160	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	200	8400	1400	1150	30	500	7	25	8,260	28	20	1300	11	12	8,340	8	16	8,260	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	200	8450	1700	1100	30	500	4	20	8,310	42	16	1600	12	12	8,390	16	12	8,310	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	200	6800	1300	1150	30	500	11	16	6,660	23	20	1200	10	16	6,740	4	25	6,660	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	600	6500	800	1200	30	500	5	16	6,360	35	16	700	5	25	6,440	8	12	6,360	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	600	6850	1000	1200	30	500	6	16	6,710	37	16	900	6	25	6,790	10	12	6,710	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	600	7300	1300	1150	30	500	7	16	7,160	38	16	1200	10	20	7,240	14	12	7,160	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	600	7450	1700	1100	30	500	9	16	7,310	37	16	1600	11	20	7,390	16	12	7,310	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	600	7750	1900	1100	30	500	14	16	7,610	68	12	1800	11	20	7,690	10	16	7,610	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1000	7050	1600	1150	30	500	11	20	6,910	23	25	1500	9	20	6,990	82	12	6,910	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1000	6400	1300	1150	30	500	7	16	6,260	33	16	1200	8	25	6,340	14	12	6,260	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1000	6400	1200	1300	30	500	7	16	6,260	24	20	1100	8	25	6,340	14	12	6,260	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1400	6700	1400	1300	30	500	9	16	6,560	39	16	1300	9	25	6,640	6	20	6,560	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1000	7200	1600	1250	30	500	9	16	7,060	26	20	1500	9	25	7,140	6	20	7,060	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1400	6550	2500	1100	30	500	22	12	6,410	58	12	2400	16	16	6,490	24	12	6,410	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1400	6700	1900	1100	30	500	17	12	6,560	33	16	1800	10	25	6,640	18	12	6,560	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1400	6400	1700	1200	30	500	10	16	6,260	35	16	1600	11	25	6,340	10	16	6,260	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1400	6400	1700	1300	30	500	10	16	6,260	24	20	1600	11	25	6,340	20	12	6,260	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1800	6750	1800	1300	30	500	11	16	6,610	40	16	1700	12	25	6,690	20	12	6,610	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1400	6900	2100	1250	30	500	12	16	6,760	39	16	2000	13	25	6,840	22	12	6,760	0	0	0	0	0	0	
30,00	0,200	6000	1800	6450	3400	1100	30	500	17	16	6,310	52	16	2,850	18	16	6,390	18	16	6,310	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1800	6400	2700	1100	30	500	14	16	6,260	42	16	2,600	11	25	6,340	14	16	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1800	6400	2300	1100	30	500	12	16	6,260	23	20	2,200	14	25	6,340	12	16	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1800	6400	2000	1300	30	500	12	16	6,260	24	20	1,900	13	25	6,340	22	12	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1800	6400	2200	1300	30	500	13	16	6,260	24	20	2,100	14	25	6,340	24	12	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1800	6600	2300	1300	30	500	14	16	6,460	39	16	2,200	15	25	6,540	14	16	6,460	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	2200	7200	4000	1100	30	500	20	16	7,060	50	20	2,850	19	16	7,140	38	12	7,060	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	2200	6400	3400	1100	30	500	17	16	6,260	38	20	2,900	20	20	6,340	32	12	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	2200	6400	3000	1100	30	500	15	16	6,260	54	16	2,850	24	20	6,340	10	20	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1400	6400	2700	1150	30	500	14	16	6,260	30	20	2,600	16	25	6,340	26	12	6,260	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	1800	6500	2400	1300	30	500	14	16	6,360	38	16	2,300	16	25	6,440	26	12	6,360	0	0	0	6	6	6	
30,00	0,200	6000	2200	6700	2500	1100	30	500	22	12	6,560	48	16	2,400	20	25	6,640	24	12	6,560	0	0	0	6	6	6	

TIPO 5R				GEOMETRIA				ATERIALE			Zap1Axinf				Ax sup				Apic1			Acortante				
T	K	L	N1	N2	A1	B1	H1	HA	B-	n	Ø	L	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	n	Ø	L	Ramas	n	Ø
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(KN)	(KN)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)		(mm)	(mm)			(mm)
30.00	0.200	7000	200	200	7400	400	1750	30	500	3	20	7.260	58	300	3	20	7.340	8	12	7.260	0	0	0	0	0	
30.00	0.200	7000	200	600	8650	500	1650	30	500	4	16	8.510	41	20	400	4	20	8.590	8	12	8.510	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	200	1000	9000	800	1500	30	500	6	16	8.860	61	16	700	7	16	8.940	6	16	8.860	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	200	1400	9850	900	1450	30	500	5	25	9.710	64	16	800	6	16	9.790	12	12	9.710	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	200	1800	9800	1200	1400	30	500	7	25	9.660	62	16	1100	6	16	9.740	8	16	9.660	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	200	2200	10000	1400	1400	30	500	9	25	9.860	63	16	1300	10	12	9.940	6	20	9.860	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	600	600	7400	1400	1400	30	500	9	16	7.260	30	20	1300	11	16	7.340	6	20	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	600	600	7700	600	1600	30	500	3	20	7.560	56	16	500	5	25	7.640	10	12	7.560	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	600	1000	8150	800	1500	30	500	6	16	8.010	55	16	700	6	25	8.090	6	16	8.010	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	600	1400	8550	1100	1450	30	500	5	20	8.410	56	16	1000	9	20	8.490	14	12	8.410	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	600	1800	9000	1300	1400	30	500	11	16	8.860	57	16	1200	10	20	8.940	16	12	8.860	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	600	2200	9100	1600	1400	30	500	14	16	8.960	37	20	1500	11	20	9.040	20	12	8.960	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1000	200	7400	2400	1350	30	500	15	16	7.260	45	16	2.300	14	16	7.340	10	20	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1000	1000	7400	1100	1450	30	500	5	20	7.260	31	20	1000	7	25	7.340	14	12	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1000	1000	7400	1100	1500	30	500	5	20	7.260	32	20	1000	8	25	7.340	14	12	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1000	1400	7800	1300	1450	30	500	9	16	7.660	51	16	1200	9	25	7.740	6	20	7.660	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1000	1800	8550	1300	1550	30	500	6	20	8.410	38	20	1200	8	25	8.490	10	16	8.410	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1000	2200	8400	1800	1400	30	500	12	16	8.260	53	16	1700	10	25	8.340	12	16	8.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1400	200	7400	2200	1350	30	500	19	16	7.260	31	20	2.100	10	20	7.340	20	16	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1400	600	7450	1700	1400	30	500	12	16	7.310	47	16	1600	14	20	7.390	12	16	7.310	0	0	0	0	8
30.00	0.200	7000	1400	1000	7400	1500	1400	30	500	10	16	7.260	30	20	1400	11	25	7.340	10	16	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1400	1400	7400	1500	1550	30	500	11	16	7.260	33	20	1400	11	25	7.340	20	12	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1400	1800	7700	1600	1550	30	500	12	16	7.560	54	16	1500	12	25	7.640	12	16	7.560	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	1400	2200	8200	1700	1550	30	500	12	16	8.060	37	20	1600	12	25	8.140	8	20	8.060	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	800	200	7650	2900	1350	30	500	18	16	7.510	47	16	2.850	17	16	7.590	12	20	7.510	0	0	0	0	12
30.00	0.200	7000	800	600	7550	2300	1350	30	500	14	16	7.410	46	16	2.200	11	25	7.490	6	25	7.410	0	0	0	0	12
30.00	0.200	7000	800	1000	7400	2100	1350	30	500	13	16	7.260	45	16	2.000	13	25	7.340	24	12	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	800	1400	7400	1800	1500	30	500	8	20	7.260	50	16	1700	13	25	7.340	24	12	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	800	1800	7400	1900	1550	30	500	9	20	7.260	33	20	1800	14	25	7.340	14	16	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	800	2200	7700	2000	1550	30	500	14	16	7.560	54	16	1900	15	25	7.640	6	25	7.560	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	800	2600	7500	3700	1350	30	500	23	16	7.360	61	16	3.450	18	16	7.440	42	12	7.360	0	0	0	0	12
30.00	0.200	7000	2200	200	7450	3000	1350	30	500	19	16	7.310	49	16	2.900	20	20	7.390	34	12	7.310	0	0	0	0	8
30.00	0.200	7000	2200	1000	7400	2700	1350	30	500	17	16	7.260	45	16	2.600	15	25	7.340	32	12	7.260	0	0	0	0	6
30.00	0.200	7000	2200	1400	7400	2400	1350	30	500	15	16	7.260	45	16	2.300	16	25	7.340	10	20	7.260	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	2200	1800	7450	2100	1550	30	500	15	16	7.310	52	16	2.000	16	25	7.390	16	16	7.310	0	0	0	0	0
30.00	0.200	7000	2200	2200	7400	2300	1550	30	500	16	16	7.260	33	20	2.200	17	25	7.340	30	12	7.260	0	0	0	0	0