

**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>		