

INDICE:

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introducción a las Cimentaciones de Medianería. | 22 |
| 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 |
| 2 | Objetivos del trabajo. | 79 |
| 2.1 | <i>Introducción.</i> | 79 |
| 3 | Definición del problema de Optimización. | 81 |
| 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 ₂ (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 ⁻¹)': | 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 | Restricciones. Comprobaciones estructurales. | 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 |
| 4 | Estado del arte Optimización Estructuras | 215 |
| 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 |
| 5 | Métodos Heurísticos de Optimización. | 266 |
| 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 |
| 6 | Calibración de los Algoritmos. | 293 |
| 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 |
| 7 | Ejemplo de aplicación del Algoritmo de Simulated Annealing. | 344 |
| 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 |
| 8 | Estudio de Parametrización. | 406 |
| 8.1 | <i>Introducción.</i> | 406 |
| 8.2 | <i>Análisis de resultados.</i> | 407 |
| 8.3 | <i>Referencias bibliográficas.</i> | 416 |
| 9 | Conclusiones y Futuras líneas de investigación. | 417 |
| 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 |
| ANEXO I: Descripción de soluciones óptimas | | |
| ANEXO II: Resultados del estudio de parametrización. | | |