

Tabla de Contenidos

Lista de figuras	8
Lista de tablas	12
Notación.....	15
Acrónimos	21
PARTE I. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE	23
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	25
1.1 Diseño de estructuras y necesidad de optimización.....	25
1.2 Las pilas rectangulares huecas de hormigón armado	28
1.3 Objetivos del trabajo	31
1.4 Naturaleza del problema de optimización.....	32
1.5 Estructura del trabajo	32
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	35
2.1 Sobre la optimización en las estructuras	35
2.2 Evolución de la optimización de estructuras.....	37
2.2.1 Estructuras de hormigón	37
2.2.1.1 Métodos exactos.....	37
2.2.1.2 Métodos aproximados	39
2.2.2 Estructuras de acero.....	44
2.2.2.1 Métodos aproximados	44
2.2.3 Otras aportaciones.	49
2.3 Conclusiones. Situación del trabajo en la investigación	50
PARTE II. ELEMENTOS BÁSICOS DEL MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN.....	53
Capítulo 3. MÉTODOS HEURÍSTICOS DE OPTIMIZACIÓN	55

3.1	El problema de optimización condicionada	55
3.2	Diferentes métodos heurísticos y metaheurísticos	57
3.2.1	Definición de heurística y metaheurística.....	57
3.2.2	Clasificación de metaheurísticas.....	58
3.3	Métodos de búsqueda local	58
3.3.1	Búsqueda local de máximo gradiente (Descent local search, DLS)	58
3.3.2	Cristalización simulada (Simulated Annealing, SA)	59
3.3.3	Aceptación por umbrales (Threshold Accepting, TA).....	60
3.3.4	Búsqueda Tabú (Tabú Search, TS).....	61
3.3.5	Algoritmo del diluvio universal (Great Deluge Algorithm, GDA).....	61
3.3.6	Aceptación por cercanía al líder.	61
3.3.7	Procedimientos de búsqueda voraz, aleatoria y adaptativa (Greedy Randomized Adaptative Search Procedure, GRASP)	62
3.3.8	Búsqueda local iterada (Iterated Local Search, ILS)	62
3.3.9	Búsqueda en entornos variables (Variable Neighborhood Search, VNS)	62
3.4	Métodos basados en poblaciones	62
3.4.1	Colonia de Hormigas (Ant Colony, AC)	62
3.4.2	Algoritmos genéticos (Genetic Algorithms, GA).....	63
3.4.3	Algoritmos meméticos (Memetic algorithm, MA)	63
3.5	Redes neuronales	64
Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA		67
4.1	Definición de la pila de hormigón armado.....	67
4.1.1	Variables.....	68
4.1.2	Parámetros	75
4.2	Definición de la función objetivo.....	78

4.2.1 Costes unitarios.....	79
4.2.2 Evaluación del coste de la estructura.....	80
4.3 Comprobación estructural.....	85
4.3.1 Acciones y esfuerzos.....	85
4.3.2 Comprobación del soporte.....	88
4.3.2.1 Proceso general de comprobación.....	88
4.3.2.2 Inestabilidad.....	93
4.3.2.3 Agotamiento frente solicitaciones normales.....	101
4.3.2.4 Agotamiento frente a cortante.....	103
4.3.2.5 Fisuración.....	104
4.3.2.6 Fatiga.....	105
4.3.3 Comprobación de la cimentación.....	107
4.3.3.1 Proceso general de comprobación.....	107
4.3.3.2 Tensiones en el terreno.....	110
4.3.3.3 Armadura mínima.....	110
4.3.3.4 Agotamiento frente solicitaciones normales.....	110
4.3.3.5 Agotamiento frente a cortante.....	111
4.3.3.6 Fisuración.....	112
4.3.3.7 Fatiga.....	112
4.3.4 Diagramas tensión-deformación.....	113
4.3.4.1 Acero.....	113
4.3.4.2 Hormigón.....	114
4.3.5 Integración de tensiones.....	117
PARTE III. DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO.....	121
Capítulo 5. DESCRIPCIÓN DE LOS MEDIOS UTILIZADOS.....	123

5.1 Descripción del programa.....	123
5.1.1 Módulo de optimización.....	124
5.1.2 Módulo de comprobación.....	127
5.1.2.1 Agotamiento frente solicitaciones normales.....	127
5.1.2.2 Agotamiento frente a cortante.....	128
5.1.2.3 Inestabilidad.....	128
5.1.2.4 Fatiga.....	128
5.1.2.5 Fisuración.....	129
5.2 Lenguaje de programación y ordenador utilizado.....	129
Capítulo 6. COMPARACIÓN Y CALIBRACIÓN DE HEURÍSTICAS.....	131
6.1 Pila a optimizar y estudio de resultados.....	131
6.1.1 Pila a optimizar.....	131
6.1.2 Aspectos estadísticos del plan experimental.....	133
6.2 Aplicación de los métodos heurísticos.....	134
6.2.1 Random Walk.....	135
6.2.2 Descent Local Search.....	137
6.2.3 Threshold Accepting.....	141
6.2.4 Simulated Annealing.....	147
6.2.5 Ant Colony.....	153
6.2.5.1 Ant System (AS).....	156
6.2.5.2 Ant Colony System (ACS).....	162
6.2.5.3 Ant System Optimization (ASO).....	167
6.2.6 Genetic Algorithms (GA).....	176
6.2.6.1 Codificación binaria.....	181

6.2.6.2 Codificación mediante representación natural	185
6.3 Comparación de soluciones	187
6.3.1 Dimensiones, hormigones y armados	187
6.3.1.1 Soporte	187
6.3.1.2 Zapata	191
6.3.2 Mediciones, costes y tiempos	192
6.3.3 Conclusiones.....	194
Capítulo 7. ESTUDIO PARAMÉTRICO DE PILAS: VIADUCTOS DE CARRETERA	197
7.1 Pilas a optimizar.....	197
7.2 Análisis de los resultados.....	202
7.2.1 Geométricos.....	202
7.2.2 Armadura	204
7.2.3 Hormigón.....	206
7.2.4 Costes.....	209
Capítulo 8. ESTUDIO PARAMÉTRICO DE PILAS: VIADUCTOS DE FERROCARRIL.....	213
8.1 Pilas a optimizar.....	213
8.2 Análisis de los resultados.....	217
8.2.1 Geométricos.....	218
8.2.2 Armadura	219
8.2.3 Hormigón.....	222
8.2.4 Costes.....	225
Capítulo 9. ESTUDIO DE PILAS ALTAS	229
9.1 Pilas a optimizar.....	229
9.2 Análisis de los resultados.....	232
9.2.1 Dimensiones, hormigones y armados	232

9.2.1.1 Soportes.....	233
9.2.1.2 Zapatas	241
9.2.2 Mediciones, costes y cuantías.....	242
Capítulo 10. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	245
10.1 Conclusiones	245
10.1.1 Referentes al estado del arte	245
10.1.2 Referentes a los medios de optimización utilizados	246
10.1.3 Referentes a la estructura estudiada.....	247
10.1.4 Referentes al estudio paramétrico.....	248
10.2 Futuras líneas de investigación	250
Referencias	251
APÉNDICES.....	261
Apéndice 1. SECCIONES DE LOS TABLEROS.....	263
A1.1 Paramétrico viaductos de carretera (Capítulo 7).....	263
A1.2 Paramétrico viaductos de ferrocarril (Capítulo 8)	265
A1.3 Pilas entre vano de 60 y 90 metros de luz (Capítulo 6 y 9)	266
Apéndice 2. COMBINACIÓN DE ACCIONES	271
A2.1 Combinaciones pilas de viaductos de carretera	272
A2.2 Combinaciones pilas de viaductos de ferrocarril	277
Apéndice 3. VALORES DE LAS VARIABLES, MEDICIONES, COSTES Y CUANTÍAS.....	285
A3.1 Resultados variables pilas de viaductos de carretera (Capítulo 7).....	285
A3.1.1 Variables de los soportes	285
A3.1.1.1 Dimensión longitudinal exterior, espesores de las caras y hormigones ..	285
A3.1.1.2 Número de barras longitudinales de armado en las caras del soporte	290

A3.1.1.3	Diámetros de las barras longitudinales de las caras del soporte	295
A3.1.1.4	Cercos en el soporte.....	300
A3.1.1.5	Armado en cabeza	301
A3.1.2	Variables de las zapatas	302
A3.1.3	Mediciones.....	303
A3.1.4	Costes.....	305
A3.2	Resultados variables pilas de viaductos de ferrocarril (Capítulo 8).....	306
A3.2.1	Variables de los soportes	306
A3.2.1.1	Dimensión longitudinal exterior, espesores de las caras y hormigones ..	306
A3.2.1.2	Número de barras longitudinales de armado en las caras del soporte	311
A3.2.1.3	Diámetros de las barras longitudinales de las caras del soporte	316
A3.2.1.4	Cercos en el soporte.....	321
A3.2.1.5	Armado en cabeza	322
A3.2.2	Variables de las zapatas	323
A3.2.3	Mediciones.....	325
A3.2.4	Costes.....	326

Lista de figuras

Figura 1.1: Método de diseño tradicional.....	26
Figura 1.2: Método de diseño empleando métodos heurísticos.....	27
Figura 1.3: Alzado del viaducto del Regajo.....	28
Figura 1.4: Planta del viaducto del Regajo.....	28
Figura 1.5: Pila 1 de la calzada izquierda del viaducto del Regajo.....	29
Figura 1.6: Detalle de apoyos tipo POT.....	30
Figura 3.1: Formulación general de un problema de optimización condicionada.....	56
Figura 3.2: Problemática de óptimos locales de baja calidad.....	59
Figura 3.3: Red neuronal artificial con n neuronas de entrada, m en su capa oculta y una de salida... ..	64
Figura 4.1: Variables sección hueca del soporte.....	71
Figura 4.2: Variables de la zapata.....	74
Figura 4.3: Parámetros pila hormigón armado.....	78
Figura 4.4: Detalle cambio de sección en dos tramos consecutivos.....	84
Figura 4.5: Armado cabeza del soporte.....	85
Figura 4.6: Cargas aplicadas. Excentricidad debida a defectos de construcción.....	88
Figura 4.7: Esquema de comprobación de un soporte.....	92
Figura 4.8: Diagrama A-M-C tipo simplificado y utilizado.....	96
Figura 4.9: Ecuación de rigidez para un elemento.....	98
Figura 4.10: Modelo del soporte a resolver.....	99
Figura 4.11: Ecuación de rigidez a resolver.....	100
Figura 4.12: Modelo del tablero para obtener la rigidez en cabeza del soporte.....	100
Figura 4.13: Dominios de deformación últimos teniendo en cuenta los efectos de fluencia.....	102
Figura 4.14: Variación admisible tensiones de cortante.....	106

Figura 4.15: Variación admisible tensión hormigón	107
Figura 4.16: Esquema de comprobación de una zapata.....	109
Figura 4.17: Secciones a comprobar la flexión en la zapata	111
Figura 4.18: Secciones a comprobar el cortante en la zapata.....	112
Figura 4.19: Diagrama tensión-deformación del acero	114
Figura 4.20: Diagrama tensión-deformación del hormigón en ELU.....	114
Figura 4.21: Diagrama tensión-deformación del hormigón en ELS	115
Figura 4.22: Intersección del plano de deformaciones con la sección	117
Figura 4.23: Identificación vértices del polígono.....	118
Figura 4.24: Proyecciones de los vértices sobre la fibra neutra	118
Figura 4.25: División en cuadriláteros	119
Figura 4.26: Intersección del plano de deformaciones con la sección	120
Figura 5.1: Esquema funcionamiento del programa.....	124
Figura 5.2: Diagrama de flujo método de búsqueda local.....	125
Figura 5.3: Diagrama de flujo método de búsqueda poblacional	126
Figura 6.1: Coste de las soluciones factibles encontradas durante un RW	135
Figura 6.2: Histograma de frecuencias de las soluciones factibles encontradas	136
Figura 6.3: Diagrama de flujo de un DLS	138
Figura 6.4: Evolución del coste para diferentes movimientos y criterios de parada	139
Figura 6.5: Evolución del coste para diferentes movimientos y criterios de parada	140
Figura 6.6: Diagrama de flujo de un Threshold Accepting	142
Figura 6.7: Proceso de disminución del umbral en una ejecución	144
Figura 6.8: Proceso de evolución de un Threshold	145
Figura 6.9: Diagrama de flujo del Simulated Annealing.....	148
Figura 6.10: Proceso de disminución de la temperatura en una ejecución	150

Figura 6.11: Proceso de evolución del SA	151
Figura 6.12: A)Hormigas siguiendo el camino entre el hormiguero y la comida. B)Aparece un obstáculo en el camino: las hormigas eligen bordearlo por la derecha o por la izquierda con igual probabilidad.C)La feromona es depositada más rápido en el camino más corto.D)Todas las hormigas han elegido el camino más corto	154
Figura 6.13: Diagrama de flujo de la Ant Colony	155
Figura 6.14: Simulación de una hormiga en busca de alimento	169
Figura 6.15: Evolución del coste para diferente número de hormigas y etapas	174
Figura 6.16: Evolución del coste para diferente número de hormigas y etapas	175
Figura 6.17: Diagrama de flujo de un GA	177
Figura 6.18: Terminología y ejemplo de representación de soluciones en GA	178
Figura 6.19: Ruleta empleada en la selección de individuos.....	180
Figura 6.20: Cruzamiento por un punto	180
Figura 7.1: Lado longitudinal del soporte en función del vano y de la altura del soporte	202
Figura 7.2: Área planta de la base de la zapata en función del vano y de la altura del soporte.....	203
Figura 7.3: Kg de armadura vertical en arranques por m. l. en función del vano y de la altura del soporte	204
Figura 7.4: Kg de armadura vertical en el soporte por m.l. en función del vano y de la altura del soporte	205
Figura 7.5: Kg de armadura en las zapatas en función del vano y de la altura del soporte	205
Figura 7.6: Kg de armadura total por m.l. de soporte en función del vano y de la altura del soporte. 206	
Figura 7.7: m ³ hormigón soporte por m.l. de soporte en función del vano y de la altura del soporte. 207	
Figura 7.8: m ³ hormigón zapata en función del vano y de la altura del soporte	208
Figura 7.9: m ³ hormigón pila por m.l. soporte en función del vano y de la altura del soporte	209
Figura 7.10: Coste de las distintas pilas para vanos de 40 m de luz.....	210
Figura 7.11: Coste de las distintas pilas para vanos de 50 m de luz.....	210

Figura 7.12: Coste de las distintas pilas para vanos de 60 m de luz.....	211
Figura 7.13: Coste total de las pilas por altura de las mismas.....	212
Figura 8.1: Lado longitudinal del soporte en función del vano y de la altura del soporte	218
Figura 8.2: Área planta de la base de la zapata en función del vano y de la altura del soporte.....	219
Figura 8.3: Kg de armadura vertical en arranques por m. l. en función del vano y de la altura del soporte	220
Figura 8.4: Kg de armadura vertical en el soporte por m.l. en función del vano y de la altura del soporte	221
Figura 8.5: Kg de armadura en las zapatas en función del vano y de la altura del soporte.....	221
Figura 8.6: Kg de armadura total por m.l. de soporte en función del vano y de la altura del soporte.	222
Figura 8.7: m ³ hormigón soporte por m.l. de soporte en función del vano y de la altura del soporte.	223
Figura 8.8: m ³ hormigón zapata en función del vano y de la altura del soporte	224
Figura 8.9: m ³ hormigón pila por m.l. soporte en función del vano y de la altura del soporte	225
Figura 8.10: Coste de las distintas pilas para vanos de 40 m de luz.....	226
Figura 8.11: Coste de las distintas pilas para vanos de 50 m de luz.....	226
Figura 8.12: Coste de las distintas pilas para vanos de 60 m de luz.....	227
Figura 8.13: Coste total de las pilas por altura de las mismas.....	228

Lista de tablas

Tabla 4.1: Variables del soporte.....	68
Tabla 4.2: Variables de la zapata.....	72
Tabla 4.3: Parámetros.....	76
Tabla 4.4: Costes unitarios.....	79
Tabla 4.5: Abertura de fisura máxima según EHE ¹⁰⁴	104
Tabla 4.6: Separación entre cercos de vigas para el control de la fisuración.....	105
Tabla 4.7: Tabla diagrama tensión-deformación para el cálculo del Momento-Curvatura.....	116
Tabla 6.1: Parámetros pila.....	132
Tabla 6.2: Valores de la t de Student con una probabilidad del 5% de ser superados.....	133
Tabla 6.3: Desviaciones del coste medio respecto al mínimo.....	141
Tabla 6.4: Resultados de las 18 ejecuciones con los parámetros seleccionados.....	146
Tabla 6.5: Resultados de las 18 ejecuciones con los parámetros seleccionados.....	152
Tabla 6.6: Resultados obtenidos para $\alpha=0$ y $\beta=1$	159
Tabla 6.7: Resultados obtenidos para $\alpha=0.5$ y $\beta=0.5$	160
Tabla 6.8: Resultados obtenidos para $\alpha=1$ y $\beta=0$	161
Tabla 6.9: Resultados obtenidos para $\beta=0.5$	164
Tabla 6.10: Resultados obtenidos para $\beta=1$	165
Tabla 6.11: Resultados obtenidos para $\beta=1.5$	166
Tabla 6.12: Resultados obtenidos para $\alpha=0.2$ y $\beta=0.8$	170
Tabla 6.13: Resultados obtenidos para $\alpha=0.5$ y $\beta=0.5$	171
Tabla 6.14: Resultados obtenidos para $\alpha=0.8$ y $\beta=0.2$	172
Tabla 6.15: Resultados obtenidos para $\alpha=0.2$ y $\beta=0.8$	173
Tabla 6.16: Resultados obtenidos para $\alpha=0.8$ y $\beta=0.2$	174

Tabla 6.17: Resultados obtenidos sin elitismo	182
Tabla 6.18: Resultados obtenidos con elitismo	184
Tabla 6.19: Resultados obtenidos sin elitismo	185
Tabla 6.20: Resultados obtenidos con elitismo	186
Tabla 6.21: Espesores de las caras y hormigones de los soportes	188
Tabla 6.22: Número de barras en las caras del soporte	189
Tabla 6.23: Diámetro de las barras del soporte	190
Tabla 6.24: Variables armado cabeza del soporte	191
Tabla 6.25: Resultados zapatas	191
Tabla 6.26: Mediciones y cuantías	192
Tabla 6.27: Costes	193
Tabla 6.28: Costes mínimos y tiempos de ejecución	194
Tabla 7.1: Número de variables y tamaño del espacio de soluciones	198
Tabla 7.2: Parámetros pilas viaductos carretera	198
Tabla 7.3: Parámetros pilas viaductos carretera. Vano 40 m de luz.....	199
Tabla 7.4: Parámetros pilas viaductos carretera. Vano 50 m de luz.....	200
Tabla 7.5: Parámetros pilas viaductos carretera. Vano 60 m de luz.....	200
Tabla 7.6: Acción transversal del viento del tablero sobre las pilas.....	201
Tabla 8.1: Parámetros pilas viaductos ferrocarril.....	214
Tabla 8.2: Parámetros pilas viaductos ferrocarril. Vano 40 m de luz	215
Tabla 8.3: Parámetros pilas viaductos ferrocarril. Vano 50 m de luz	215
Tabla 8.4: Parámetros pilas viaductos ferrocarril. Vano 60 m de luz	216
Tabla 8.5: Acción transversal del viento del tablero sobre las pilas.....	217
Tabla 9.1: Número de variables y tamaño del espacio de soluciones	230
Tabla 9.2: Parámetros pilas viaducto pilas altas.....	231

Tabla 9.3: Pendiente transversal y dimensiones transversales exteriores del soporte.....	233
Tabla 9.4: Pendiente longitudinal y dimensiones longitudinales exteriores del soporte.....	234
Tabla 9.5: Espesores de las caras del soporte.....	235
Tabla 9.6: Tipos de hormigón	236
Tabla 9.7: Número de barras en dirección transversal	237
Tabla 9.8: Número de barras en dirección longitudinal	238
Tabla 9.9: Diámetro de las barras en dirección transversal.....	239
Tabla 9.10: Diámetro de las barras en dirección longitudinal.....	240
Tabla 9.11: Cercos soportes	241
Tabla 9.12: Variables armado cabeza del soporte	241
Tabla 9.13: Resultados zapatas	242
Tabla 9.14: Mediciones y cuantías	243
Tabla 9.15: Costes	244