

INDICE DE LA TESIS DOCTORAL

Título: Optimización de un Modelo de Cimentación de una Maquina Industrial Rotativa

Autor: Juan Luis Terrádez Marco

Directores: Antonio Hospitaler Pérez

Vicente Albero Gabarda

Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Preámbulo	1
1.2 Objetivos y Alcance de la Tesis Doctoral.....	3
1.3 Estructura de la Tesis Doctoral	3
1.4 Metodología empleada.....	5
Bibliografía del capítulo 1.....	13
Capítulo 2 Estado del Arte	15
2.1. Una visión general del desarrollo del cálculo dinámico de cimentaciones	16
2.2. Desarrollo clásico de la dinámica de vibraciones en las cimentaciones.....	22
2.2.1. El problema de Lord Kelvin (1848).....	22
2.2.2. El problema de Boussinesq (1878).....	23
2.2.3. Lamb y el problema dinámico de Boussinesq (1903).....	23
2.2.4. DEGEBO – E. Reissner (1936).....	25
2.2.5. Quilan y Sung (1953).....	32
2.2.6. Hausner y Castellani.....	33
2.2.7. Sung	34
2.2.8. Bycroft	35
2.2.9. Ecuaciones de Hsieh.....	36
2.2.10. Analogía de Lysmer (1965).....	38
2.2.11. El laboratorio experimental del profesor Barkan (1962).....	47
2.2.12. Analogía de Hall para el movimiento horizontal y el balanceo de la cimentación (sliding and rocking).....	48
2.2.13. Solución de Luco y Westman para una zapata rígida circular a partir de una zapata rectangular rígida de longitud infinita.....	48
2.2.14. Las aportaciones de Wolf al cálculo dinámico de cimentaciones	49
2.2.15. Métodos computacionales para determinar las funciones de impedancia.	50
2.2.16. Modelos continuos	51
2.2.17. Modelos Discretos.....	51
2.2.17.1 Métodos de análisis mediante elementos finitos	51
2.2.18. Análisis dinámico en el dominio del tiempo y la frecuencia.....	53
2.2.19. Métodos de elementos de contorno y modelos físicos aproximados.....	54
2.3. Optimización y diseño de cimentaciones sometidas a esfuerzos dinámicos. Trabajos previos.....	54

2.4. Conclusiones al estado del arte	58
Bibliografía del capítulo 2.....	60
Capítulo 3 Propiedades del suelo.....	63
3.1. Coeficiente de Poisson (ν).....	64
3.2. Módulo de cortante dinámico G.....	65
3.3. Métodos para determinar las propiedades del suelo.....	65
3.3.1 Trabajos de Campo	65
3.3.2 Ensayos de Laboratorio.....	69
3.3.3 Correlación con otras propiedades del suelo.....	69
3.4. Amortiguamiento del suelo	71
3.5. Conclusiones del capítulo 3.....	73
Bibliografía del capítulo 3.....	74
Capítulo 4 Acciones dinámicas y estados límites de servicio de la maquinaria industrial. Normas	75
4.1 Introducción. Consideraciones.....	75
4.2 Acciones generadas por la maquinaria.....	79
4.3 Fuerzas dinámicas generadas por la maquinaria industrial	80
4.3.1 Máquinas rotativas	80
4.3.2 Máquina Alternativa.....	81
4.3.3 Máquinas de impulso	82
4.3.4 Otros tipos de maquinaria	83
4.4 Cargas dinámicas generadas por máquinas rotativas	84
4.5 Excentricidad de los rotores. Norma ISO 1940/1.....	85
4.6 Gráficas de limitaciones de amplitud, velocidad y aceleración.....	86
4.6.1 Carta Rathbone (1.930).....	86
4.6.2 La carta de Blake (1964).....	88
4.6.3 La carta de Baxter y Bernhard (1967).....	91
4.6.4 Carta de Reihher-Meister (1970).....	93
4.6.5 Carta de Harris y Crede (1976)	95
4.6.6 Tablas limitativas de las vibraciones para maquinaria específica	96
4.6.7 Vibraciones de las estructuras.....	96
4.7 Normativa relativa a la limitación de las vibraciones en la maquinaria industrial	98
4.7.1 Introducción	98
4.7.2 Tipos de Normas	99
4.7.3 Normas sobre la instrumentación y sistemas de medida	99
4.7.4 Normas y Guías sobre la severidad de las vibraciones.....	100
4.7.5 Normas ISO.....	100
4.7.5.1 Norma ISO 2372-1974.....	100
4.7.5.2 Norma ISO 3945	103
4.7.5.3 Norma ISO 10816-1995.....	104

4.7.5.4	Norma VDI 2056.....	107
4.8	Normas relativas a las afecciones al ser humano de las vibraciones.....	108
4.8.1	Norma ISO-2631.....	109
4.8.2	Norma DIN 4150-2.....	111
4.9	Normas para el Diseño de Cimentaciones de Maquinaria Industrial.....	113
4.10	Criterios de desplazamiento, velocidad y aceleración aceptables en esta Tesis Doctoral.....	114
	Bibliografía del capítulo 4.....	115
Capítulo 5 Metodologías de Diseño de Cimentaciones para Maquinaria Industrial		117
5.1	Metodologías de diseño según diversos autores relevantes.....	118
5.1.1	Métodos de diseño según Richart, Hall & Woods, 1970.....	118
5.1.2	Modelo de diseño según Prakash y Puri, 1988.....	120
5.1.3	Metodología de diseño según Arya, O'Neill y Pincus, 1979.....	123
5.2	Criterios de diseño según Norma ACI 351.3R-04 (2004).....	125
5.2.1	Determinación de los efectos de las vibraciones sobre la maquinaria....	27
5.3	Criterios de diseño según norma IS 2974.....	127
5.4	Conclusiones al capítulo 5.....	128
	Bibliografía del capítulo 5.....	129
Capítulo 6 Modelo analítico de cimentación para una maquina industrial rotativa		131
6.1.	Tipología de Cimentaciones para Maquinaria Industrial que soporta cargas dinámicas.....	132
6.1.1.	Cimentación en bloque.....	133
6.1.2.	Bloques combinados de cimentación.....	133
6.1.3.	Cimentación elevada sobre pórticos.....	133
6.1.4.	Cimentación en losa elevada sobre pórticos aislados.....	134
6.1.5.	Maquinaria Industrial montada sobre resortes y aisladores.....	134
6.1.6.	Cimentaciones y estructuras con bloques de inercia.....	134
6.1.7.	Cimentaciones sobre pilotes.....	134
6.2.	Tipo de cimentación elegido para una máquina rotativa.....	135
6.3.	Fuerzas y momentos considerados en el modelo de cálculo.....	138
6.4.	Transitorio de arranque.....	140
6.5.	Ecuaciones del movimiento vertical en el eje -Z.....	141
6.6.	Planteamiento del desplazamiento en el eje -X(sliding) acoplado con el balanceo respecto a un eje paralelo al eje- ϕ (rocking) que pasa por la base de la cimentación ...	146
6.7.	Ecuaciones para deslizamiento y balanceo acoplados.....	149
6.8.	Modelo de Barkan con amortiguamiento para deslizamiento y balanceo acoplados.....	150
6.9.	Parámetros del modelo dinámico. Cálculo de impedancias y modelo físico.	162

6.10. Calibrado del modelo	170
Bibliografía del capítulo 6.....	178
Capítulo 7 Aplicación al modelo de diseño. Parámetros, variables y restricciones...	179
7.1 Definición de los parámetros y variables que componen el modelo de diseño ...	182
7.1.1 Parámetros de la máquina	182
7.1.2 Parámetro del suelo	186
7.1.3 Constante de la cimentación.....	195
7.1.4 Variables del modelo de diseño.....	195
7.1.5 Variables geométricas	196
7.1.6 Variables de rigidez y amortiguamiento (impedancias).....	197
7.1.7 Variables de selección de materiales.....	200
7.1.8 Impedancias de los resortes de unión.....	203
7.1.9 Variables de operación.....	204
7.2 Restricciones a las variables del modelo.....	205
7.2.1 Restricciones en el rango de las variables	205
7.2.2 Restricciones geométricas.....	209
7.2.3 Restricciones mecánicas.....	211
7.2.4 Restricciones a las variables de salida.....	214
7.3 Función Objetivo. Coste de la cimentación.....	216
Bibliografía del capítulo 7.....	220
Capítulo 8 Optimización heurística del modelo de cimentación de una maquina industrial rotativa	221
8.1 Búsqueda secuencial por entornos. Mecanismos de generación	224
8.2 Antecedentes de los métodos de optimización huerísticos.....	225
8.3 Clasificación de los métodos heurísticos.....	227
8.4 Métodos metaheurísticos.....	228
8.4.1 Planteamiento.....	228
8.4.2 Taxonomía de las técnicas metaheurísticas.....	228
8.5 La función objetivo. Coste de la cimentación a optimizar	231
8.6 Determinación del tamaño del espacio de soluciones posibles de la función coste	232
8.7 El espacio de soluciones de la función objetivo – Random Walk (Paseo aleatorio).....	235
8.7.1 Procedimiento de cálculo para la determinación del espacio de soluciones mediante un Random Walk (Paseo aleatorio).....	237
8.7.2 Aplicación de los métodos de búsqueda aleatorios. Random Walk (Paseo aleatorio).....	239
8.7.3 Variable coste-tiempo de ejecución de las soluciones factibles	245
8.7.4 Conjunto de soluciones S(Xd) del RW. Ajuste a distribución normal. 246	
8.7.5 Solución optima obtenida con el RW.....	248

8.8	Estimación del coste óptimo teórico por ajuste a dis. Weibull 3 parámetros	250
8.9	Plan experimental.....	251
	Bibliografía del capítulo 8.....	254
Capítulo 9 Optimización metaheurística mediante Descent Local Search		257
9.1	Descent Local Search.....	257
9.2	Esquema fundamental.....	258
9.3	Elección del número de variables a modificar en cada perturbación	262
9.4	Optimización mediante la metaheurística del “Descent Local Search”	265
9.5	DLS. Planos de la cimentación optimizada.....	273
9.6	Aproximación al valor del coste óptimo mediante un ajuste a distribución de Weibull 3 parámetros.....	278
	Bibliografía del capítulo 9.....	280
Capítulo 10 Optimización metaheurística aceptando soluciones de mayor valor: Simulated Annealing.....		281
10.1	Aceptación de soluciones con mayor valor para la salida de un mínimo local	281
10.2	Métodos de búsqueda iterativa de un solo punto.....	283
10.3	La metaheurística del Simulated Annealing.....	285
10.4	Elección de elementos genéricos para la resolución mediante la técnica del Simulated Annealing.....	293
10.5	Optimización mediante la técnica Simulated Annealing.....	295
10.6	SA. Planos de la cimentación optimizada	301
10.7	Ajuste del conjunto de soluciones obtenidas por la metaheurística simulated annealing a una distribución de Weibull de 3 parámetros	305
	Bibliografía del capítulo 10.....	307
Capítulo 11 Optimización metaheurística mediante algoritmo AMP: Late Acceptance Hill Climbing.....		309
11.1	Metodología	310
11.2	Implementación. Plan experimental.....	313
11.2.1	Determinar el valor mínimo teórico de la función coste mediante ajuste del conjunto de óptimos a una distribución Weibull de 3 parámetros	318
11.2.2	Determinar la longitud óptima LFa del vector de comparación Fa.....	328
11.2.3	Determinar la solución óptima.....	335
11.2.4	Analizar los tiempos de ejecución de los algoritmos en función de la longitud del LFa del vector comparación.....	338
11.3	LAHC. Planos de la cimentación optimizada.....	345
11.4	Conclusiones al capítulo 11.....	349
	Bibliografía del capítulo 11.....	350
Capítulo 12 Análisis de resultados, conclusiones y desarrollos futuros		351
12.1	Restricciones mecánicas aplicadas a la cimentación.....	352
12.2	Análisis comparativo de resultados.....	353
12.2.1	Vectores solución escogidos.	354

12.2.2	Vibraciones	356
12.2.3	Vibraciones en la dirección -X.....	359
12.2.4	Vibraciones en la dirección -Z.....	361
12.2.5	Comparación de valores estadísticos de las tres metaheurísticas.....	364
12.3	Conclusiones	365
12.4	Nuevas líneas de investigación y desarrollos futuros.....	366
	Bibliografía del capítulo 12.....	367