

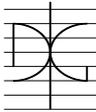
Trabajo de Investigación CST/MIH

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA DE APOYO
AL CÁLCULO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE
CIMBRADO/DESCIMBRADO DE EDIFICIOS EN ALTURA
HORMIGONADOS IN SITU. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
APLICANDO TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA**

Por:

MANUEL BUITRAGO MORENO

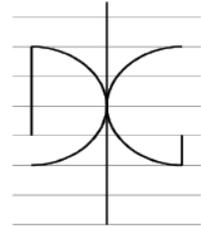
Julio 2014

Autor / Author: MANUEL BUITRAGO MORENO		Fecha / Date: 30 – 07 – 2014	
Título / Title DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA DE APOYO AL CÁLCULO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE CIMBRADO/DESCIMBRADO DE EDIFICIOS EN ALTURA HORMIGONADOS IN SITU. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO APLICANDO TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA			
Directores del trabajo / Supervisores: JOSÉ MIGUEL ADAM MARTÍNEZ		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 199
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			
Palabras clave / Keywords: cimbra, optimización, heurística, cálculo, edificios, programa, hormigón, cimbrado			
Código Unesco: 12 1203 15 33 3305 32 33 3312 09			



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN INFORMÁTICA DE
APOYO AL CÁLCULO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE
CIMBRADO/DESCIMBRADO DE EDIFICIOS EN ALTURA
HORMIGONADOS IN SITU. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
APLICANDO TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA**

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Máster en Ingeniería del Hormigón

Autor: Manuel Buitrago Moreno

Director: José Miguel Adam Martínez

Valencia, Julio de 2.014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría mostrar mi enorme agradecimiento a mi director de trabajo final de máster, José Miguel Adam, por la oportunidad prestada y su consideración hacia mí durante estos últimos años. También me gustaría agradecer a la gente del grupo de la línea de investigación de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios, su plena disposición para la resolución de cualquier duda planteada, sobre todo a Pedro, Isabel y Nacho. De entre todos ellos cabe destacar a Yezid, con el que he tenido largas discusiones por videoconferencia, especialmente al inicio de este trabajo, para las que la distancia no ha sido ningún problema. Muchas gracias a todos.

También me gustaría mostrar mi agradecimiento hacia mis compañeros de máster con los que he pasado momentos de mucho trabajo y hemos podido sacar adelante todo aquello que nos hemos propuesto.

Cómo no, agradezco enormemente el apoyo de Marina, por el tiempo perdido y no dedicado con tanta asistencia a clases tras las jornadas diarias de trabajo, los trabajos, estudios y la realización de este trabajo final de máster. También agradezco sus recomendaciones, consejos, apoyo y compañía que han hecho posible todo lo conseguido.

No me gustaría olvidarme de mi familia cuyo apoyo durante todos estos años de estudio ha sido incondicional.

Por último, agradecer a la Cátedra de Empresa de Construcción Sostenible y Avanzada por el premio obtenido a la I+D+i para el desarrollo del presente trabajo final de máster.

ÍNDICE GENERAL

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	25
1.1 Introducción	25
1.2 Objetivos	27
1.3 Contenido.....	27
2. CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	29
2.1 Introducción	29
2.2 Sistemas y procesos de cimbrado para forjados de edificación hormigonados in situ ...	29
2.2.1 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado y descimbrado.....	31
2.2.2 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado.....	31
2.2.3 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado	32
2.3 Transmisión de cargas durante la construcción	32
2.3.1 Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963)	33
2.3.2 Método simplificado para recimbrado de Taylor (1967)	35
2.3.3 Modelo de Liu et al. (1985, 1986).....	36
2.3.4 Modelo EFM de Stivaros y Halvorsen (1990)	38
2.3.5 Modelo de Mosallam y Chen (1991).....	40
2.3.6 Método simplificado Modificado de Mosallam y Chen (1991)	41
2.3.7 Modelo de Moragues et al. (1992, 1994, 1996)	42
2.3.8 Método Simplificado de Duan y Chen (1995)	46
2.3.9 Método simplificado de Fang et al. (2001)	48
2.3.10 Estudio realizado por Alvarado et al. (2009)	51
2.3.11 Nuevo método simplificado por Calderón et al. (2011)	53
2.3.12 Estudio realizado por Gasch et al (2012)	56
2.4 Estimación del plazo de descimbrado	57
2.4.1 Condición de descimbrado	57
2.4.1.1 Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986).....	58
2.4.1.2 Método propuesto por Marí (1995).....	59
2.4.1.3 Método por comprobación de coeficientes de carga.....	60
2.4.2 Estimación del plazo de descimbrado	61
2.4.2.1 Método mediante el ensayo de probetas de hormigón	62

2.4.2.2 Método de las curvas de referencia.....	62
2.4.2.3 Aplicación del método de la madurez al descimbrado de forjados de hormigón.....	63
2.4.2.4 Método de Díaz (2008).....	66
2.4.3 Recomendaciones de la normativa para estimar los plazos de descimbrado.....	67
2.4.3.1 Instrucción de hormigón estructural (EHE-08).....	67
2.4.3.2 Eurocódigo EC-2 (1992).....	69
2.4.3.3 ACI 347 (American Concrete Institute, Guide to formwork for concrete) (2001).....	69
2.4.3.4 Código modelo CEB-FIP 1990 (1995).....	70
2.5 Técnicas de diseño óptimo habitualmente utilizadas en ingeniería.....	71
2.5.1 Técnicas de diseño óptimo.....	72
2.5.2 Técnicas aproximadas empleadas en la optimización monoobjetivo.....	72
2.5.2.1 Algoritmos que realizan la búsqueda de forma aleatoria.....	73
2.5.2.2 Algoritmos que realizan la búsqueda secuencial por entornos.....	74
2.5.2.3 Algoritmos evolutivos.....	79
2.5.2.4 Redes neuronales.....	79
2.5.3 Técnicas aproximadas empleadas en la optimización multiobjetivo.....	80
2.6 Conclusiones relativas al estado del arte.....	80
3. CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DEL NUEVO MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO DESARROLLADO POR CALDERÓN ET AL (2011) EN UNA NUEVA APLICACIÓN INFORMÁTICA.....	83
3.1 Desarrollo de la herramienta que permite calcular la deformación de los puntales bajo carga unitaria.....	89
3.2 Desarrollo de la herramienta que permite calcular la deformación de los forjados bajo carga unitaria.....	90
3.2.1 Metodología adoptada para el cálculo de los diagramas de momentos de cada una de las bandas definidas por el EFM.....	91
3.2.2 Criterios adoptados para el cálculo de la inercia de las bandas centrales y de soportes en función del tipo de forjado.....	97
3.2.3 Metodología adoptada en la aplicación del método de la madurez para la actualización de las características mecánicas de los forjados.....	99
3.3 Desarrollo del cuerpo principal de la aplicación informática.....	100
4. CAPÍTULO 4. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE LA NUEVA APLICACIÓN INFORMÁTICA.....	103

4.1	Introducción	103
4.2	Descripción de la estructura.....	103
4.3	Proceso constructivo	104
4.4	Descripción del sistema de cimbrado	108
4.4.1	Puntales	108
4.4.2	Sopandas principales.....	109
4.4.3	Sopandas intermedias.....	109
4.4.4	Basculantes.....	110
4.5	Resultados del edificio experimental según la nueva aplicación informática	110
4.6	Comparación de resultados y validación de la nueva aplicación informática	116
5.	CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL MEJOR PROCESO DE CIMBRADO/DESCIMBRADO DE EDIFICIOS EN ALTURA HORMIGONADOS IN SITU.....	121
5.1	Definición del problema de optimización.....	122
5.1.1	Parámetros o datos del problema.....	123
5.1.2	Variables a considerar en la optimización.....	123
5.1.3	Restricciones a cumplir	125
5.1.4	Función objetivo.....	125
5.1.5	Problema estudiado	126
5.2	Optimización completa evaluando todo el campo de soluciones	127
5.3	Optimización heurística aplicando el algoritmo de saltos múltiples aleatorios [Random Walk]	131
5.3.1	Introducción	131
5.3.2	Consideraciones preliminares	131
5.3.3	Resultados y conclusiones obtenidas	132
5.4	Optimización heurística aplicando el algoritmo gradiente en su versión <i>First Best</i>	135
5.4.1	Introducción	135
5.4.2	Consideraciones preliminares	135
5.4.3	Resultados y conclusiones obtenidas	136
5.5	Optimización heurística aplicando el algoritmo de cristalización simulada [Simulated Annealing]	139
5.5.1	Introducción	139

5.5.2 Consideraciones preliminares.....	142
5.5.3 Resultados y conclusiones obtenidas.....	143
5.6 Comprobación de la validez de la solución más óptima al problema planteado.....	145
5.7 Conclusiones relativas a la implementación de algoritmos de optimización.....	146
6. CAPÍTULO 6. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA NUEVA APLICACIÓN INFORMÁTICA AL EDIFICIO DE BELLAS ARTES DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.....	149
6.1 Descripción de la estructura	149
6.2 Proceso constructivo.....	150
6.3 Descripción del sistema de cimbrado.....	154
6.4 Comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado real y estimación del coste	154
6.5 Consideraciones relativas a la búsqueda de una solución óptima	168
6.6 Búsqueda de la solución óptima aplicando técnicas de optimización heurística	169
6.6.1 Estrategia de saltos múltiples aleatorios [Random Walk]	169
6.6.2 Estrategia de búsqueda local por gradiente [First Best]	171
6.6.3 Estrategia de búsqueda por entornos aplicando cristalización simulada [Simulated Annealing]	173
6.7 Comprobación de la validez de la solución más óptima al problema planteado.....	176
7. CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIÓN ORIGINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	181
7.1 Conclusiones	181
7.2 Aportación original del Trabajo Final de Máster	184
7.3 Futuras líneas de trabajo.....	185
8. REFERENCIAS.....	187
9. APÉNDICE 1. CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN MEDIA PARA CADA BANDA	193
10. APÉNDICE 2. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD REAL DEL EDIFICIO EXPERIMENTAL	195
A2.1 Introducción.....	195
A2.2 Evolución del módulo de elasticidad del edificio experimental.....	195

A2.2.1 Datos de partida.....	195
A2.2.2 Aplicación de la madurometría	196
A2.2.2.1 El método de la madurez.....	196
A2.2.2.2 Estimación del módulo de elasticidad.....	198

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Sistema para reticulares (SANRO 2014)	30
Fig. 2.2 Sistema de losas (ALSINA 2009).....	30
Fig. 2.3 Sistema de mesas	30
Fig. 2.4 Sistema de puntales con arriostramiento lateral (UNISPAN 2014).....	30
Fig. 2.5 Proceso de cimbrado y descimbrado.....	31
Fig. 2.6 Proceso de cimbrado, recimbrado, descimbrado	31
Fig. 2.7 Proceso de cimbrado, clareado y descimbrado	32
Fig. 2.8 Mecanismo para realizar el clareado (ALSINA 2009)	32
Fig. 2.9 Operaciones de cimbrado y descimbrado $n=3$	33
Fig. 2.10 Coeficientes de carga para puntales y forjados $n=2$	34
Fig. 2.11 Coeficientes de carga para puntales y forjados $n=3$	34
Fig. 2.12 Coeficientes de carga para puntales y forjados considerando la variación del módulo de elasticidad $n=3$	35
Fig. 2.13 Coeficientes de carga para puntales y forjados $n=2$ (Recimbrado)	35
Fig. 2.14 Modelo estructural Modelo de Liu et al. (1985)	36
Fig. 2.15 Influencia de la rigidez de la cimentación	37
Fig. 2.16 Resultados del modelo EMF comparado con distintos modelos numéricos.....	39
Fig. 2.17 Coeficientes de carga máximos para un forjado cimbrado	39
Fig. 2.18 Coeficientes de carga máximos para dos forjados cimbrados	40
Fig. 2.19 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para dos plantas cimbradas.....	45
Fig. 2.20 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para tres plantas cimbradas.....	45
Fig. 2.21 Operaciones de (a) Hormigonado del último forjado y (b) Descimbrado del primer forjado.....	46
Fig. 2.22 Operación de cimbrado y clareado del último forjado y descimbrado del primero. Calderón et al. (2011)	53
Fig. 2.23 Discretización de la estructura, EFM. Calderón et al. (2011).....	54

Fig. 2.24 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-450 ARI). Fernández (1986).	63
Fig. 2.25 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-350). Fernández (1986)	63
Fig. 2.26 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición escoria). Fernández (1986)	63
Fig. 2.27 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición puzolana). Fernández (1986)	63
Fig. 2.28 Curva para estimar el plazo de descimbrado en función de la evolución de la resistencia a tracción Díaz (2008)	67
Fig. 2.29 Recorrido por el espacio de soluciones en una búsqueda por gradiente (Payá 2007)	75
Fig. 2.30 Comparación entre los resultados obtenidos empleando un criterio "First Best" y uno "Global Best" en un espacio de soluciones (Payá 2007).....	76
Fig. 2.31 Comparación entre la solución óptima alcanzable mediante una estrategia que no admite peores soluciones y una que sí lo hace (Payá 2007).....	76
Fig. 2.32 Valor de la probabilidad "p" de aceptar una solución de mayor coste (factor de Boltzmann) en función de la temperatura T (Payá 2007).....	77
Fig. 3.1 Secuencia a seguir por la aplicación informática para evaluar un proceso de cimbrado/descimbrado.	85
Fig. 3.2 Discretización de la estructura, EFM. Calderón et al. (2011).	90
Fig. 3.3 Definición de los pórticos virtuales. F. Regalado (2003).....	92
Fig. 3.4 Definición de las bandas de soporte y central en función del tipo de pórtico virtual. F. Regalado (2003).	92
Fig. 3.5 Momentos directos propuestos por Montoya-Meseguer-Morán. F. Regalado (2003).	93
Fig. 3.6 Reparto de momentos en bandas centrales y de soportes según F. Regalado a partir de los valores propuestos por la EHE. F. Regalado (2003).	94
Fig. 3.7 Desviaciones límite permitidas para la aplicación de la metodología seguida. F. Regalado (2003)	95
Fig. 3.8 Condiciones de contorno posibles para un vano y parámetros establecidos en función de las condiciones de contorno.	96
Fig. 3.9 Nudos suplementarios según EHE marcando los cambios de inercia en el dintel virtual. F. Regalado (2003)	97

Fig. 3.10 Secciones para la zona aligerada y para la zona de ábacos. F. Regalado (2003)	97
Fig. 4.1 Vista 3D del edificio	104
Fig. 4.2 Proceso constructivo día “0”	105
Fig. 4.3 Proceso constructivo día “3”	105
Fig. 4.4 Proceso constructivo día “7”	105
Fig. 4.5 Proceso constructivo día “13”	106
Fig. 4.6 Proceso constructivo día “14”	106
Fig. 4.7 Proceso constructivo día “17”	106
Fig. 4.8 Proceso constructivo día “20”	107
Fig. 4.9 Proceso constructivo día “24”	107
Fig. 4.10 Proceso constructivo día “25”	107
Fig. 4.11 Puntal empleado en el edificio experimental.	108
Fig. 4.12 Descripción de las sopandas principales	109
Fig. 4.13 Distribución de sopandas principales y secundarias en los forjados.....	109
Fig. 4.14 Extracción del basculante de las sopandas principales	110
Fig. 4.15 Evolución del módulo de elasticidad experimental y según las distintas normativas.....	115
Fig. 5.1 Diagrama de flujo establecido para la búsqueda de soluciones óptimas.....	122
Fig. 6.1 Planta del edificio y vano de estudio considerado para la aplicación práctica.	150
Fig. 6.2 Proceso constructivo día “0”	150
Fig. 6.3 Proceso constructivo día “3”	151
Fig. 6.4 Proceso constructivo día “7”	151
Fig. 6.5 Proceso constructivo día “10”	152
Fig. 6.6 Proceso constructivo día “11”	152
Fig. 6.7 Proceso constructivo día “14”	152
Fig. 6.8 Proceso constructivo día “17”	153
Fig. 6.9 Proceso constructivo día “18”	153

Fig. 6.10 Proceso constructivo día “21”	154
Fig. A1.1 Viga elástica biapoyada sometida a carga uniformemente repartida con momentos M_1 y M_2 en sus extremos (izquierda). Esquemas ilustrativos de la deformación real de la viga elástica y su deformación media (derecha).	193
Fig. A2.1 Evolución del módulo de elasticidad de la probeta de hormigón	198
Fig. A2.2 Evolución del módulo de elasticidad para el tiempo equivalente a una temperatura de referencia 20°C.	199

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Coeficientes máximos en puntales modelos Liu, Chen y Bowman (1985).....	37
Tabla 2.2 Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de tres plantas cimbradas.....	42
Tabla 2.3 Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de dos plantas cimbradas y una recimbrada	43
Tabla 2.4 Coeficientes máximos de carga en forjados	44
Tabla 2.5 Coeficientes máximos de carga en puntales (Cimentación).....	44
Tabla 2.6 Coeficientes máximos de carga en puntales (Casos Restantes)	44
Tabla 2.7 Comparación entre los métodos simplificados de Grundy y Kabaila y de Duan y Chen para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado.....	49
Tabla 2.8 Comparación de coeficientes de carga en forjados por diferentes modelos y el modelo de Fang et al. para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado	52
Tabla 2.9 Comparación entre los resultados experimentales y los del nuevo método simplificado. Calderón et al. (2011).....	55
Tabla 2.10 Comparación entre los resultados del modelo de elementos finitos y los del nuevo método simplificado. Calderón et al. (2011).....	55
Tabla 2.11 Comparación entre los resultados del método simplificado de Duan y Chen, los del experimental y los del método de elementos finitos. Calderón et al. (2011)	56
Tabla 2.12 Comparación entre los resultados de Fang et al., los del experimental y los del método de elementos finitos. Calderón et al. (2011)	56
Tabla 2.13 Relación de resistencias en función de la resistencia a compresión del hormigón (Considerando la relación pésima, que se obtiene para el hormigón de menor resistencia para edificación según la EHE, $f_{ck} = 25$ MPa.).....	58
Tabla 2.14 Criterios para establecer los plazos de descimbrado propuestos por Marí.....	60
Tabla 2.15 Periodos mínimos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado según la EHE-08.	68
Tabla 2.16 Períodos mínimos de descimbrado, recomendados por el Código modelo.....	71
Tabla 3.1 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (I).	85

Tabla 3.2 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (II).	86
Tabla 3.3 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (III).	87
Tabla 3.4 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (IV).	88
Tabla 3.5 Propuesta de reparto de los momentos isostáticos en las vigas virtuales de los forjados de losas y reticulares. F. Regalado (2003).	93
Tabla 3.6 Porcentajes del momento isostático asignados a las vigas virtuales según la EHE.	93
Tabla 3.7 Reparto de momentos en bandas de soportes y centrales según la EHE. F. Regalado (2003).	94
Tabla 3.8 Ejemplo de secuencia de operaciones constructivas seguida por la aplicación informática para el caso de un edificios de 3 plantas con 2 plantas consecutivas cimbradas	101
Tabla 4.1 Características geométricas del puntal empleado en el estudio experimental	108
Tabla 4.2 Resistencia del puntal dependiendo de la altura de uso según datos del fabricante	108
Tabla 4.3 Proceso de cimbrado/descimbrado introducido a la aplicación informática.	111
Tabla 4.4 Datos de entrada considerados (I).	111
Tabla 4.5 Datos de entrada considerados (II).	112
Tabla 4.6 Datos de entrada considerados (III).	113
Tabla 4.7 Datos de entrada considerados (IV).	114
Tabla 4.8 Datos de entrada considerados (V).	115
Tabla 4.9 Resultados obtenidos del cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado del edificio experimental.	116
Tabla 4.10 Comparación de resultados de la carga asumida por los puntales en el edificio experimental estudiado según los distintos métodos de cálculo y las medidas experimentales realizadas.	117
Tabla 4.11 Comparación de resultados y validación basada en parámetros estadísticos de la nueva aplicación informática.	118
Tabla 5.1 Variables consideradas en el proceso de optimización.	124
Tabla 5.2 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos evaluando el campo completo de soluciones.	129

Tabla 5.3 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de saltos múltiples aleatorios.	133
Tabla 5.4 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por búsqueda local por gradiente aplicando 1 movimiento.	137
Tabla 5.5 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por búsqueda local por gradiente aplicando 2 movimientos.	138
Tabla 5.6 Calibración de los parámetros correspondientes al coeficiente de enfriamiento y a la longitud de la cadena de markov.	143
Tabla 5.7 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por SA aplicando 1 movimiento...144	144
Tabla 5.8 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por SA aplicando 2 movimientos. 144	144
Tabla 5.9 Cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado más óptimo.	146
Tabla 5.10 Comparación de resultados obtenidos a través de las distintas estrategias de optimización consideradas para el edificio experimental.	147
Tabla 6.1 Datos de entrada considerados (I).	155
Tabla 6.2 Datos de entrada considerados (II).	156
Tabla 6.3 Datos de entrada considerados (III).	157
Tabla 6.4 Datos de entrada considerados (IV).	158
Tabla 6.5 Datos de entrada considerados (V).	159
Tabla 6.6 Datos de entrada considerados (VI).	160
Tabla 6.7 Datos de entrada considerados (VII).	161
Tabla 6.8 Datos de entrada considerados (VIII).	162
Tabla 6.9 Datos de entrada considerados (IX).	163
Tabla 6.10 Datos de entrada considerados (X).	164
Tabla 6.11 Comparación de resultados de la carga asumida por los puntales en el edificio estudiado según los distintos métodos de cálculo y las medidas experimentales realizadas.	165
Tabla 6.12 Comparación de resultados y nueva validación de la nueva aplicación informática basada en parámetros estadísticos.	166
Tabla 6.13 Resultados obtenidos del cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado del edificio de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.	167

Tabla 6.14 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de saltos múltiples aleatorios.	170
Tabla 6.15 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de búsqueda local por gradiente con su modalidad <i>First Best</i>	172
Tabla 6.16 Calibración de los parámetros correspondientes al coeficiente de enfriamiento y a la longitud de la cadena de Markov.....	174
Tabla 6.17 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada.....	175
Tabla 6.18 Proceso de cimbrado/descimbrado más óptimo obtenido por los distintos algoritmos considerando un tiempo de cálculo similar.	177
Tabla 6.19 Proceso de cimbrado/descimbrado propuesto a partir de la modificación del porcentaje de clareado del proceso más óptimo obtenido por los distintos algoritmos.	179
Tabla 7.1 Comparación de resultados obtenidos a través de las distintas estrategias de optimización consideradas para el edificio experimental.....	183
Tabla 7.2 Comparación de resultados obtenidos a través de las distintas estrategias de optimización consideradas para el edificio de bellas artes.	184
Tabla A2.1 Resultados de los ensayos de módulo de elasticidad.....	195
Tabla A2.2 Evolución de la temperatura del hormigón de las probetas del forjado 1 del edificio experimental.	196
Tabla A2.3 Tiempo equivalente probeta de hormigón.....	198

RESUMEN

Principalmente, para racionalizar los procesos constructivos de edificios en altura de hormigón in situ se adoptan dos estrategias. Por un lado, se intenta reducir el tiempo empleado en cada una de las operaciones constructivas. Por otro, se intenta recuperar el material empleado para el cimbrado de cada uno de los forjados lo antes posible, de forma que pueda ser utilizado en el cimbrado de forjados superiores. A través de estas dos estrategias se consiguen procesos de cimbrado/descimbrado de edificios más económicos.

Para conseguir la eficiencia buscada, es necesario en parte disponer de un método de cálculo para poder evaluar todas las opciones que se propongan. De esta forma, en este trabajo se ha conseguido una aplicación informática que calcula y comprueba los procesos de cimbrado/descimbrado a través del nuevo procedimiento simplificado por Calderón et al (2011) y de otras hipótesis contrastadas.

Esta aplicación informática es capaz de considerar los tres tipos de sistemas (Cimbrado/Descimbrado, Cimbrado/Clareado/Descimbrado y Cimbrado/Recimbrado/Descimbrado) para los forjados tipo losa, reticulares de casetón perdido y reticular de casetón recuperable. Además, también se consideran distintas condiciones de contorno de los vanos evaluados, sean de esquina, de medianera o interiores. Como posibles valores del número de plantas consecutivas cimbradas, la aplicación informática es capaz de considerar desde una planta hasta 4 plantas consecutivas.

Una vez desarrollado el módulo de cálculo y comprobación, se ha conseguido cumplir con el siguiente objetivo de este trabajo. Este objetivo consiste en obtener procesos de cimbrado/descimbrado óptimos a partir de evaluar todo o parte del campo de soluciones. Las distintas soluciones se establecen a partir de las distintas variables que forman un proceso de cimbrado/descimbrado. Se ha demostrado que en muy pocos casos es factible aplicar la evaluación completa del campo de soluciones (solo hasta 3 plantas). Por lo tanto se han desarrollado en este trabajo distintas estrategias de optimización heurística que incorpora la aplicación informática. Estas estrategias se corresponden con la de saltos múltiples aleatorios, búsqueda local por gradiente y búsqueda por entornos aplicando cristalización simulada.

Tras la aplicación de las distintas estrategias a un caso real, se ha obtenido que la estrategia más eficiente se corresponde con la de búsqueda por entornos aplicando cristalización simulada. Con esta estrategia se ha llegado a determinar un ahorro económico próximo al 68 % del coste material del sistema de apuntalamiento asociado a la construcción del edificio considerado, respecto al proceso de cimbrado/descimbrado real.

ABSTRACT

Mainly, to economize the construction process of building structures and slabs using successive levels of shoring, two strategies are adopted. On the one hand, it tries to reduce the time spent in each of the construction operations. On the other hand, it attempts to recover most of the components used as soon as possible. So these components can be used on the construction of upper floors. Through these two strategies, more efficient buildings construction processes are achieved.

To achieve the desired efficiency, it is necessary to have a calculation method to evaluate different options. Thus, in this work it has gotten a software application which calculates and verifies building construction processes through the new simplified procedure by Calderon et al (2011) and other verified hypotheses.

This software is able to consider the three construction system types available (Shoring/Striking, Shoring/Reshoring/Striking and Shoring/Clearing/Striking) for slabs, waffle slabs and girderless hollow floor slabs. It also takes into account the different possible boundary conditions. In addition, software application is able to consider different values of the number of successive levels of shoring, from a plant to four successive levels.

The second objective of this work was to obtain optimal building construction processes. Different solutions were established from the different variables that form a building construction process. All options define the solutions field. From here, it can be choose full assessment of the solutions field or evaluate only a part through heuristic optimization. It has been shown that in very few cases is feasible to apply full assessment of the solutions field (only up to 3-storey buildings). Thus, in this work it has been developed different heuristic optimization strategies implemented in the software application. Three strategies are tested in order to minimise the economic cost: Random Walk (RW), First Best Gradient (FB) and Simulated Annealing (SA).

After applying different strategies to a real case, it has been obtained that the most efficient strategy is simulated annealing (SA), which proceed to the most intelligent search of the optimal solution in this work. This strategy has achieved cost savings about 68 % of the shoring system material cost respect to the real process associated with the building construction taken into account in the second part of this work.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Cada año se construyen miles de metros cuadrados de estructura y forjados de edificios con el sistema de cimbrados sucesivos. Este sistema consiste en apoyar las estructuras auxiliares de apuntalamiento sobre forjados hormigonados recientemente. De este modo, el peso de cada nuevo forjado hormigonado se distribuye, a través de la cimbra, entre varios forjados de las plantas inferiores. Para ello, todos los sistemas de construcción utilizan un procedimiento similar, que consiste en disponer una superficie de encofrado sobre la que se vierte el hormigón del forjado correspondiente. La superficie de encofrado queda apoyada sobre sopandas y puntales metálicos telescópicos.

La mejora de plazos y de economía de los sistemas de construcción descritos se basa, principalmente, en la posibilidad de recuperar la mayor parte de los componentes utilizados en el menor tiempo posible. De este modo, el número total de elementos utilizados (puntales, vigas, metros cuadrados de tablero de encofrado), será el mínimo posible.

La condición para usar el menor número de elementos posible, es poder descimbrar la estructura, o al menos parte de ella, en el menor tiempo posible. Factores como el sistema y proceso de cimbrado empleado, las características de la estructura a construir (materiales y acciones de cálculo), las condiciones ambientales (humedad y temperatura) y el proceso de cálculo, entre otros, hacen que estimar estos tiempos sea un proceso complejo.

La seguridad de la estructura durante el proceso constructivo es el factor más importante a tener en cuenta para establecer los plazos de construcción. Cabe citar que un importante número de publicaciones, p.e., Eldukair y Ayyub (1991), Kaminetzky y Stivaros (1994), Feld y Carper (1997), Epaarachchi et al. (2002), Azkune (2007), coinciden en que una de las etapas más críticas para la seguridad de una estructura es justamente su construcción. Este hecho queda de manifiesto al observar que un gran número de los colapsos de estructuras de edificación se presentan durante el proceso constructivo (Kaminetzky 1991; Azkune 2007). Por lo tanto, conocer cómo se transmiten las cargas entre los forjados y puntales durante el proceso constructivo resulta ser un aspecto fundamental para garantizar la seguridad de la estructura y del personal que trabaja en la obra.

Considerando las particularidades definidas con anterioridad, son varios los métodos analíticos y experimentales que se han desarrollado durante décadas para la evaluación de las cargas sobre forjados y puntales, dentro de la construcción de un edificio. En el Capítulo 2 se describen con detalle alguno de estos métodos.

A pesar del amplio número de investigaciones relacionadas con el cimbrado de forjados sucesivos, el clareado ha recibido muy poca atención por parte de la comunidad científica. Aunque en el Capítulo 2 se realiza una descripción detallada de los procesos de cimbrado más comunes en el sector de la

edificación actual, cabe aquí resaltar la importancia del clareado en España, debido a su extendido uso. El clareado consiste en la retirada del encofrado y de más del 50 % de los puntales que soportan el forjado pocos días después de su hormigonado. De esta forma se reduce notablemente el material necesario para el encofrado y cimbrado, mejorando notablemente la economía y racionalizando el proceso constructivo. La aplicación de este método encuentra, sin embargo, numerosas resistencias por parte de proyectistas, contratistas y directores de obra debido a que al reducir el número de puntales que sustentan el forjado, supone que la carga se reparta ahora en un menor número de puntales, transmitiendo más carga a los puntales que quedan. Obviamente, esto no es así ya que al reducir la rigidez del apuntalamiento, los forjados pasan a asumir parte de la carga. Pese a la importancia de este hecho, hasta la fecha, sólo Moragues et al. (1992, 1994, 1996), Alvarado et al. (2009) y Gasch et al (2012) han estudiado el efecto que tiene el clareado en la transmisión de cargas durante la construcción de forjados.

Además, a partir de las diversas investigaciones realizadas, los distintos autores han ido proponiendo métodos simplificados de cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, de los que cabe destacar los métodos simplificados de Grundy y Kabaila (1963), Duan y Chen (1995), Fang et al (2001) y el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011).

Aunque es verdad que los métodos de cálculo anteriormente nombrados suponen una forma simplificada de abordar el cálculo sin la necesidad de utilizar software estructural específico, no es tarea sencilla ni poco laboriosa para el usuario final de estos métodos simplificados, el calcular la transmisión de cargas entre forjados y puntales para un proceso constructivo definido, sobre todo para los métodos simplificados más exactos y más recientes.

Tal y como se evidencia en los párrafos anteriores, es necesaria la consideración de una nueva aplicación informática que permita al usuario calcular y comprobar los procesos de cimbrado/descimbrado de edificios de forma sencilla y muy rápida.

Por otra parte, se ha evidenciado anteriormente la necesidad que existe en esta etapa de construcción de racionalizar el proceso de cimbrado/descimbrado seguido, de tal forma que se pueda establecer un importante ahorro económico que resultará beneficioso tanto para las empresas como para los clientes. Por lo tanto, aprovechando la programación del módulo de cálculo y comprobación de procesos, se puede plantear la obtención de procesos óptimos desde el punto de vista económico a través de la aplicación de algoritmos de optimización. Con este objeto se plantea el trabajo “Desarrollo de una aplicación informática de apoyo al cálculo del proceso constructivo de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ. Optimización del proceso aplicando técnicas de optimización heurística”, de forma que el usuario de la aplicación pueda aprovecharse del trabajo realizado. Este trabajo se desarrolla en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Máster es el desarrollo de una aplicación informática que permita al usuario, por una parte, calcular y comprobar procesos de cimbrado/descimbrado de edificios, y por otra, obtener soluciones óptimas de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ que pueda utilizar directamente en la práctica o que sirva como punto inicial para adecuar un proceso constructivo a sus necesidades.

A partir de los objetivos principales planteados, se dependen una serie de objetivos secundarios como son:

- ✓ Construcción de edificios de forma más segura ya que se hace intervenir una componente científica y de cálculo de los procesos constructivos.
- ✓ Construcción de edificios de forma más económica y rápida, ya que se trata de los dos objetivos perseguidos con la optimización del proceso de cimbrado/descimbrado de edificios.
- ✓ Cálculo del proceso constructivo de forma muy sencilla y rápida con la aplicación de la nueva herramienta informática.

1.3 Contenido

El presente Trabajo Final de Máster está estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte.
- Capítulo 3. Implementación del nuevo método simplificado desarrollado por Calderón et al (2011) en la nueva aplicación informática.
- Capítulo 4. Ejemplo de funcionamiento de la nueva aplicación informática.
- Capítulo 5. Implementación de algoritmos de optimización para la obtención del mejor proceso de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ.
- Capítulo 6. Aplicación práctica de la nueva herramienta informática al edificio de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Capítulo 7. Conclusiones, aportación original y futuras líneas de trabajo.
- Referencias.
- Apéndices.

En el Capítulo 1 se justifica la realización del presente Trabajo Final de Máster, exponiendo la ventaja que supone disponer de la nueva herramienta informática para el cálculo rápido y sencillo del proceso de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ. Además, también se expone que de forma pionera se podrán encontrar procesos de cimbrado/descimbrado de edificios óptimos que el usuario podrá trasladar a la práctica.

El Capítulo 2 muestra, a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica, el estado del arte relativo al tema planteado. En una primera parte se describen los sistemas y procesos de cimbrado de uso común en edificación. Se estudian en detalle las diversas investigaciones de carácter numérico relativas a la

transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo de edificios de forjados sucesivos. A continuación se detallan los criterios para determinar los plazos de descimbrado, recopilados en distintas normas y propuestas de estimación de diversos autores. Finalmente se recopilan las técnicas de diseño óptimo habitualmente utilizadas en ingeniería.

En el Capítulo 3 se desarrolla la implementación del módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado a través de la aplicación del nuevo método simplificado por Calderón et al (2011), la condición de descimbrado propuesta por Calavera (1981) y corroborada por otros autores y la aplicación del método de madurez para conocer la evolución de las características mecánicas del hormigón en función del tiempo.

En el Capítulo 4 se expone un ejemplo práctico basado en un edificio experimental construido por Alvarado et al (2009) que sirve para la comprobación del funcionamiento de la nueva aplicación informática, concretamente del módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios.

En el Capítulo 5 se desarrolla la implementación de los algoritmos de optimización para la obtención de procesos de cimbrado/descimbrado óptimos (desde el punto de vista del coste económico). En primer lugar se plantea el problema de la optimización para este caso concreto. Posteriormente se plantea, como se detallará en el capítulo correspondiente, la consideración de una optimización exacta y de diversos algoritmos de optimización heurística como son: Saltos Múltiples Aleatorios (Random Walk), Gradiente (First Best) y Cristalización Simulada (SA). El desarrollo de los distintos algoritmos de optimización se apoyará en el ejemplo práctico de cálculo utilizado en el Capítulo 4.

En el Capítulo 6 se realizará una aplicación práctica a un edificio real para el que se podrá observar el cumplimiento del proceso de cimbrado/descimbrado adoptado, así como el grado de optimización conseguido en caso de considerar los distintos algoritmos de optimización heurística.

En los Capítulos 7 se establecen una serie de conclusiones alcanzadas a lo largo del documento así como las futuras líneas de trabajo que pueden continuarse a partir del trabajo desarrollado en este documento.

Finalmente se recogen varios Apéndices que contienen información que complementa el trabajo desarrollado. Estos apéndices profundizan en temas tratados en el Trabajo Final de Máster y facilitan el entendimiento del mismo al lector.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Durante la construcción de edificios de hormigón armado de plantas sucesivas, es habitual que al hormigonar un forjado éste se apoye en un sistema de cimbrado que a su vez se apoya en forjados inferiores recientemente hormigonados. Las cargas producidas durante este proceso constructivo suelen ser inferiores a las cargas de servicio de los forjados, pero en ocasiones puede que esto no ocurra, encontrándose claramente cargas superiores a las de servicio. Además, cuando apoyamos un forjado superior en uno inferior recientemente hormigonado, el hormigón de este último no ha alcanzado los valores característicos de sus propiedades mecánicas, por lo que es necesario conocer los valores de cargas transmitidos durante la construcción.

Diferentes autores han estudiado la transmisión de cargas durante la construcción de edificios de hormigón armado. Éstos buscan representar, mediante modelos teóricos, la respuesta estructural dependiendo del proceso constructivo, considerando la evolución de la transmisión de cargas sobre el forjado y sobre los puntales, las cargas actuantes, la variación del esquema estructural y la evolución de las propiedades del hormigón.

En este capítulo se pretende establecer los antecedentes y el estado actual de conocimiento que motivan el desarrollo del presente Trabajo Final de Máster. En la primera parte se describirán los sistemas y procesos de cimbrado para forjados de edificación. Seguidamente se describirán los modelos teóricos existentes para determinar la transmisión de cargas durante los procesos de cimbrado de forjados consecutivos. A continuación, se realizará una descripción de las metodologías adoptadas por diversos autores sobre la estimación de tiempos de descimbrado a partir de la evolución de las propiedades del hormigón en el tiempo. Con todo ello se establecerán las bases para la programación de la nueva aplicación informática de evaluación de procesos constructivos. Finalmente, se expondrán los distintos algoritmos de optimización heurística habitualmente utilizados en ingeniería, que servirán, en posteriores capítulos, para abordar el problema de la obtención de procesos de cimbrado/descimbrado óptimos.

2.2 Sistemas y procesos de cimbrado para forjados de edificación hormigonados in situ

Desde el punto de vista constructivo, el hecho de que el hormigón sea un material moldeable impone la necesidad de un encofrado, capaz de soportar el peso y los empujes laterales del hormigón fresco, y una cimbra, capaz de sustentar dicho encofrado. Una vez fraguado el hormigón, desaparece la presión hidrostática del mismo sobre el encofrado, pero dado a que el hormigón aún no habrá alcanzado suficiente resistencia, la cimbra deberá mantenerse durante más de tiempo.

La cimbra es un elemento estructural que soporta el hormigón mientras éste adquiere características resistentes suficientes para soportar su peso y posibles cargas en situaciones provisionales.

Los sistemas de cimbrado más usados en la construcción de forjados de hormigón in situ en edificación son los sistemas de puntales y los de mesas. Los sistemas de puntales emplean puntales, sopandas, paneles de madera y frecuentemente cantos reforzados con perfiles conformados de chapa de acero (Fig. 2.1 y 2.2).

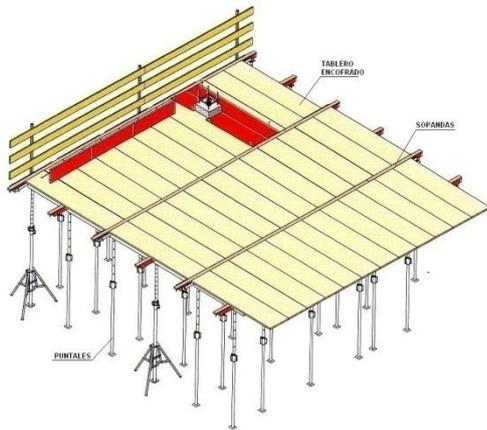


Fig. 2.2 Sistema de losas (ALSINA 2009)



Fig. 2.1 Sistema para reticulares (SANRO 2014)

Los sistemas de mesas son un conjunto estructural, rígidamente unido y compuesto por puntales, cabezales, vigas y tablero (Fig. 2.3 y 2.4).

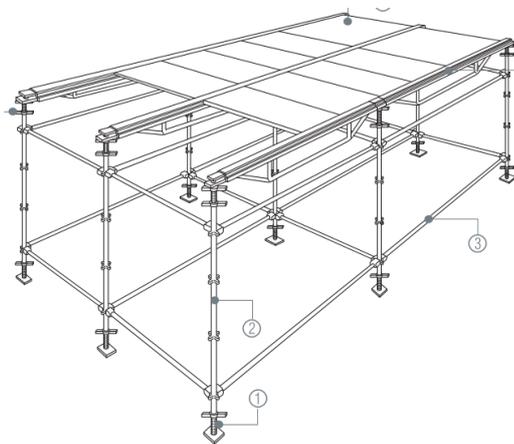


Fig. 2.4 Sistema de puntales con arriostramiento lateral (UNISPAN 2014)

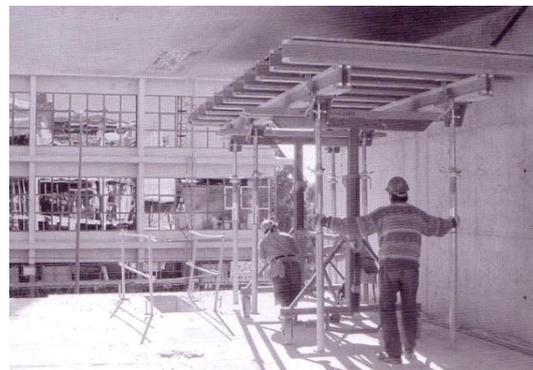


Fig. 2.3 Sistema de mesas

Los rendimientos en la construcción de forjados de edificación están muy relacionados con un rápido descimbrado. Este factor ha contribuido a la aparición de nuevas técnicas de construcción, como son el recimbrado y el clareado, que permiten optimizar la utilización de los sistemas de cimbrado.

2.2.1 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado y descimbrado

En el proceso de cimbrado y descimbrado (en adelante proceso de CD) solo intervienen dos etapas claramente definidas, la colocación de la cimbra donde se vierte el hormigón, y la retirada de esta cimbra. En este proceso existirán cuantos juegos de cimbras sean necesarios por cada planta pudiendo tener dos, tres, o más plantas consecutivas cimbradas. La Figura 2.5 muestra un edificio con tres plantas consecutivas cimbradas.



Fig. 2.5 Proceso de cimbrado y descimbrado

2.2.2 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado

En 1967, Taylor desarrolla el proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado (en adelante proceso de CRD). Este proceso consiste en descimbrar determinadas plantas (aquellas en las que el forjado resista única y exclusivamente su peso propio), descargando completamente los puntales correspondientes. A continuación se apuntala de nuevo, asegurando el contacto entre los puntales y los forjados, de forma que los puntales colaboren con los futuros incrementos de carga. De esta forma se consigue que los forjados, a edades cortas, y en el momento de ser recimbrados, deban soportar única y exclusivamente su peso propio. La Figura 2.6 muestra dos forjados consecutivos donde se aprecia claramente que los tableros de encofrado han sido retirados en el proceso de recimbrado.



Fig. 2.6 Proceso de cimbrado, recimbrado, descimbrado

2.2.3 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado

El clareado o descimbrado parcial es una operación de uso habitual en España, que consiste en la retirada del encofrado y de más del 50 % de los puntales que soportan el forjado pocos días después de su hormigonado. De esta forma se reduce notablemente el material necesario para el encofrado y cimbrado. Esta técnica mejora notablemente la economía y racionaliza el proceso constructivo. La Figura 2.7 muestra el desarrollo del proceso de cimbrado, clareado y descimbrado (en adelante proceso de CCD) para un ciclo de construcción donde se observa un primer forjado clareado y un segundo forjado completamente cimbrado. En la Figura 2.8 se muestra el mecanismo que permite extraer el tablero de encofrado sin dejar de apuntalar el forjado.



Fig. 2.7 Proceso de cimbrado, clareado y descimbrado

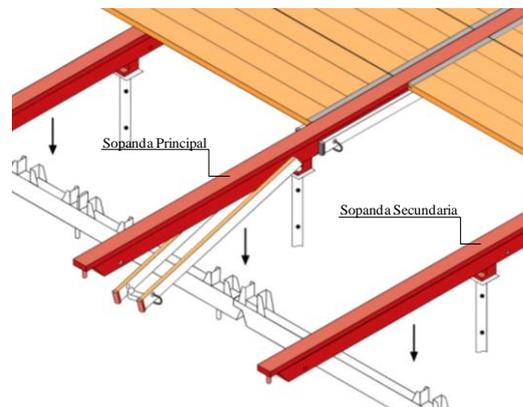


Fig. 2.8 Mecanismo para realizar el clareado (ALSINA 2009)

2.3 Transmisión de cargas durante la construcción

En la construcción de edificios en altura, es necesario apoyar la cimbra sobre forjados que no suelen tener la resistencia suficiente para soportar las cargas del forjado superior cuando éste se construye. Así, es necesario cimbrar varias plantas consecutivas, consiguiendo de esta forma que la carga se reparta entre varios forjados.

Diferentes autores han desarrollado modelos teóricos para estimar la distribución de las cargas en los forjados y puntales originadas durante la construcción. Adicionalmente, algunas investigaciones, han comparado los resultados de estos modelos teóricos con los resultados experimentales obtenidos mediante la medición de cargas en edificios reales. En este documento solo se presta especial atención a aquellos estudios teóricos, sobre todo a los que conducen a la obtención de un método simplificado de cálculo del proceso constructivo de cimbrado/descimbrado de edificios, por su aplicación directa para la consecución de los objetivos perseguidos.

2.3.1 Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963)

Cuando Grundy y Kabaila (1963) publicaron el primer método simplificado, se comenzó a conocer, con la aplicación del mismo, cuáles eran las cargas que un proceso evolutivo de construcción podía provocar en la estructura. Este método tomó como base las siguientes hipótesis:

- ✓ Se supone que los forjados inferiores, conectados con puntales, a los que se les transmite la carga del nuevo forjado, tienen todos la misma rigidez. Aunque el valor de la rigidez de estos forjados es distinto, la variación del módulo de elasticidad con la edad presenta un crecimiento rápido a edades cortas, permitiendo así considerar que los forjados tienen un valor similar de módulo de elasticidad.
- ✓ La rigidez de los puntales se considera infinita con respecto a la flexibilidad de los forjados.
- ✓ Los puntales de la planta baja descansan sobre un suelo infinitamente rígido.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia pueden ser despreciados.
- ✓ Las cargas de los puntales se asumen a cargas uniformemente repartidas sobre los forjados.

Según Grundy y Kabaila en el proceso de cimbrado y descimbrado se presentan dos etapas a considerar, la primera corresponde a la fase de hormigonado del último forjado y la segunda a la fase de descimbrado del forjado inferior. En la fig. 2.9 se muestra para un número de plantas cimbradas $n = 3$ las dos etapas.

En la primera etapa correspondiente al cimbrado del último forjado, si hay n plantas cimbradas, cuando se hormigona el último forjado, su peso propio q (kN/m^2) se reparte entre los n forjados inferiores, correspondiendo a cada uno de ellos una fracción de carga de:

$$\frac{q}{n} \text{ kN/m}^2 \tag{2.1}$$

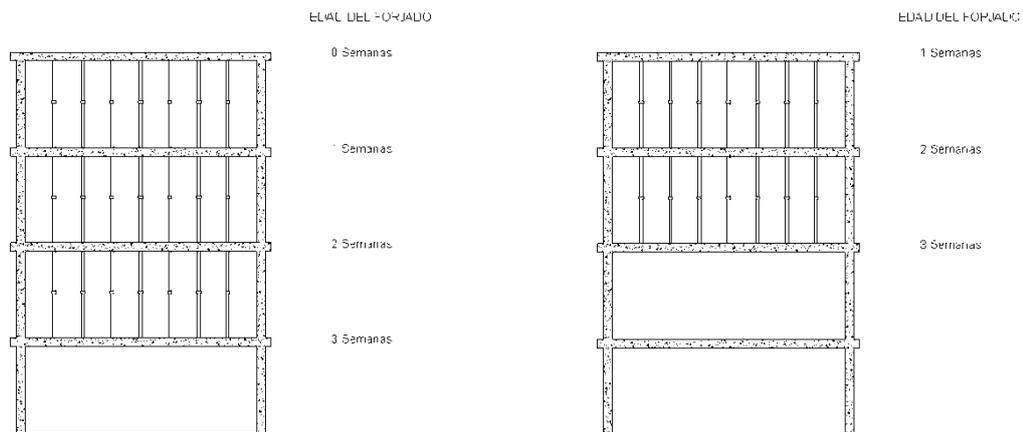


Fig. 2.9 Operaciones de cimbrado y descimbrado $n=3$

En la segunda etapa, al descimbrar la planta inferior, la diferencia entre la carga total q_1 (kN/m^2), que recibía, y su peso propio (incluido en éste, el peso del sistema de encofrado y la posible sobrecarga de

construcción) q (kN/m^2), se reparte entre los n forjados superiores correspondiendo a cada uno de ellos:

$$\frac{q_1 - q}{n} \text{ kN/m}^2 \quad (2.2)$$

De esta forma, se obtienen coeficientes de carga, que se definen como la relación entre la carga de construcción y el peso propio del forjado. En las Figuras 2.10 y 2.11, para 2 y 3 juegos de puntales respectivamente, se muestran los coeficientes de carga, considerando un ciclo de construcción de d días por planta y d_1 días para el descimbrado de una planta y el montaje de puntales y sopandas a la nueva planta superior.

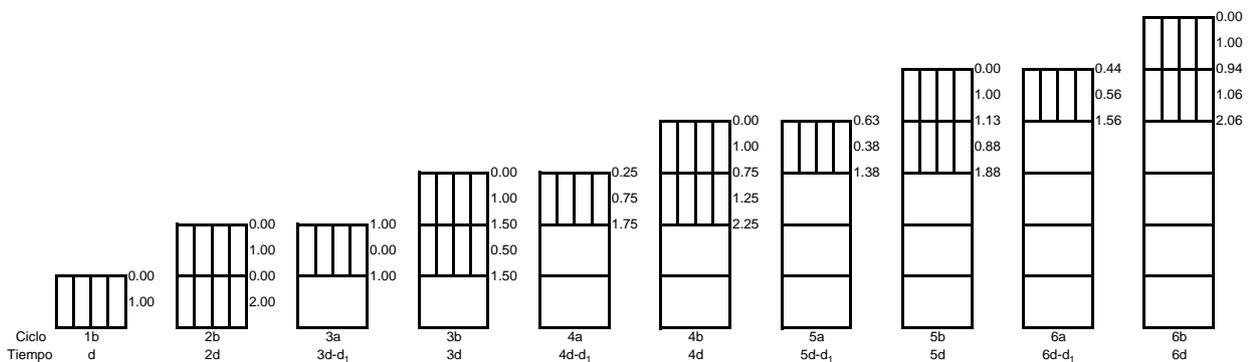


Fig. 2.10 Coeficientes de carga para puntales y forjados $n=2$

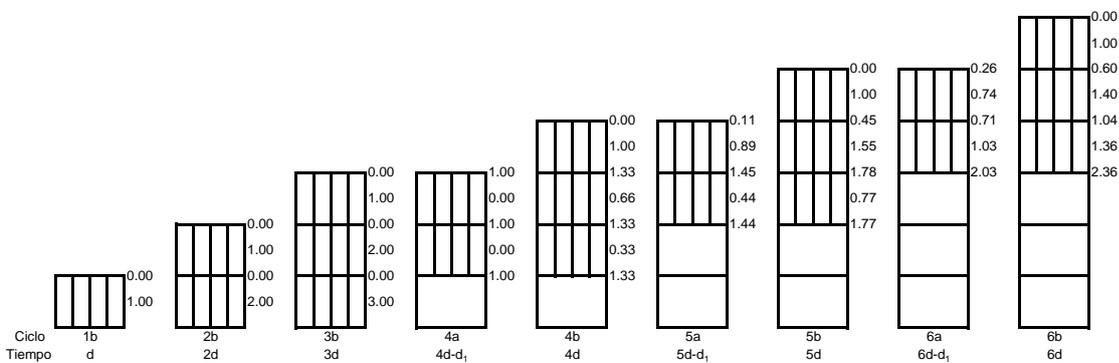


Fig. 2.11 Coeficientes de carga para puntales y forjados $n=3$

La Figura 2.12 muestra para $n = 3$, los coeficientes de cimbrado y descimbrado, determinados por Grundy y Kabaila (1963), considerando que la carga no se reparte por igual entre los forjados colaborantes, sino haciéndolo en proporción a sus rigideces y adoptando un ciclo de construcción de una semana por planta ($d = 7$ y $d_1 = 2$ días). Se supone que la situación de los forjados corresponde a no fisuración o fisuración reducida, con lo cual equivale a hacer el reparto de las cargas en proporción a los valores del módulo de elasticidad del hormigón a las distintas edades.

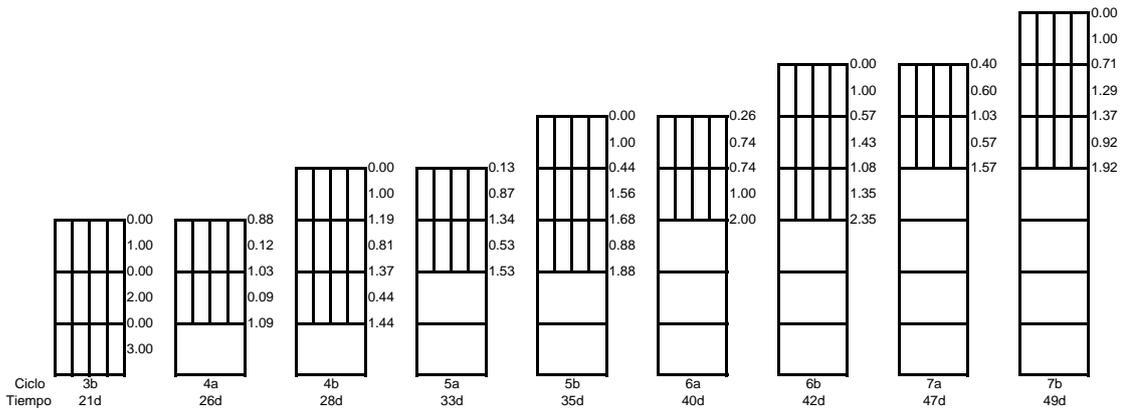


Fig. 2.12 Coeficientes de carga para puntales y forjados considerando la variación del módulo de elasticidad $n=3$

Comparando los coeficientes de carga de las Figuras 2.11 y 2.12, se puede considerar, según Grundy y Kabaila que la variación del módulo de elasticidad tiene una influencia despreciable en el reparto de cargas en los procesos de cimbrado y descimbrado.

2.3.2 Método simplificado para recimbrado de Taylor (1967)

Taylor (1967), después de realizar un profundo estudio sobre la influencia que tiene apoyar puntales sobre forjados recién hormigonados determinó que los coeficientes del método simplificado de Grundy y Kabaila podrían ser reducidos. Así es como surge la técnica del recimbrado, la cual permite reducir los coeficientes de carga que se producen, mediante un apuntalamiento convencional como los tratados hasta la fecha, debido a que se redistribuyen las cargas de los forjados recientemente hormigonados.

La aplicación de esta técnica implica un especial control de las deformaciones que se presentan en los forjados, debido a que el hormigón en el momento del recimbrado no ha alcanzado su resistencia característica. Por lo tanto, esta técnica requiere un control exhaustivo.

La Figura 2.13 muestra los coeficientes de carga determinados para un proceso de recimbrado, para dos juegos de puntales.

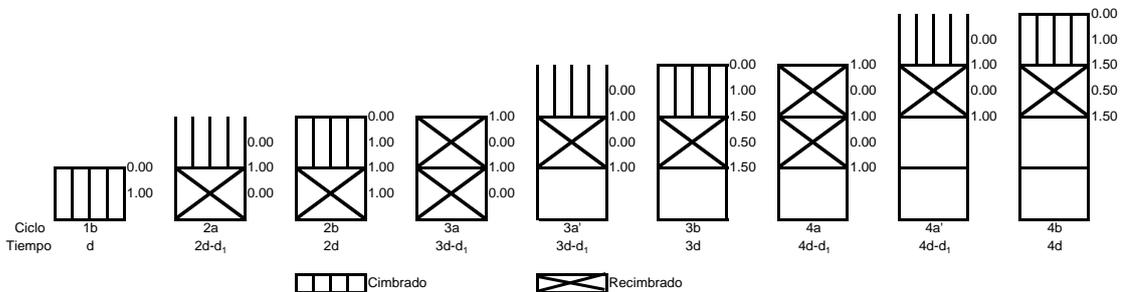


Fig. 2.13 Coeficientes de carga para puntales y forjados $n=2$ (Recimbrado)

Algunos autores como Agarwal y Gardner (1974), definen la técnica del recimbrado como un procedimiento de difícil control y que requiere una estricta supervisión, algo inusual en algunas obras. Además, existe el inconveniente de someter hormigones muy jóvenes a esfuerzos que pueden llegar a traducirse en deformaciones permanentes excesivas en la estructura.

2.3.3 Modelo de Liu et al. (1985, 1986)

Liu et al. (1985,1986), desarrollan un modelo conocido como el método refinado, en dos y tres dimensiones, planteando hipótesis diferentes a las planteadas por Grundy y Kabaila (1963). En el análisis se consideran las siguientes hipótesis:

- ✓ Se asume un comportamiento elástico de los forjados de hormigón armado, considerando la variación de rigidez con respecto al tiempo.
- ✓ El peso y geometría en todos los forjados se asumen como similares.
- ✓ Los puntales en los procesos de cimbrado y recimbrado, son asimilados como soportes elásticos con igual rigidez axial.
- ✓ Se consideran cuatro tipos de condiciones de contorno del forjado, la primera considerando al forjado continuo en todas sus direcciones, la segunda y la tercera considerándolo continuo en una dirección y extremo en la otra dirección, y la cuarta considerando un forjado aislado.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida e indeformable.

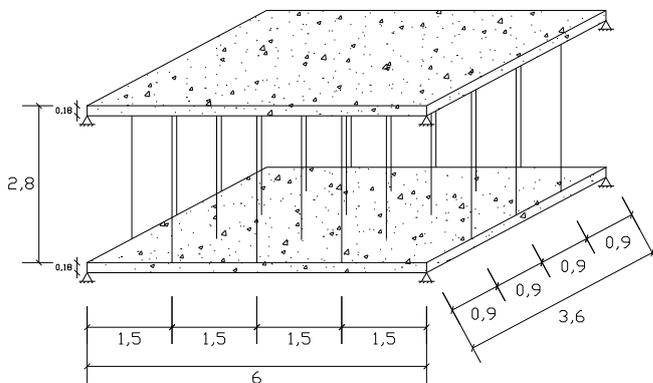


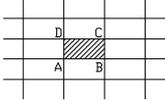
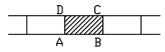
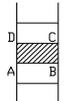
Fig. 2.14 Modelo estructural Modelo de Liu et al. (1985)

El modelo (en tres dimensiones) desarrollado por Liu, et al. (1985) es idéntico al mostrado en la Figura 2.14. El ciclo constructivo considerado es de dos plantas cimbradas y una recimbrada, con un ritmo de ejecución de un forjado por semana.

En la Tabla 2.1, se muestran los coeficientes de carga máxima en puntales obtenidos por Liu et al. (1985) en modelos de 2 y 3 dimensiones, comparados con los coeficientes del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), para un proceso de construcción con dos plantas cimbradas y una recimbrada, hormigonando una planta por semana.

Adicionalmente Liu et al. (1985), consideraron nuevas hipótesis (no incluidas en su propuesta) como la influencia de la rigidez de la cimentación, la deformabilidad de los pilares y la relación largo-ancho del forjado.

Tabla 2.1 Coeficientes máximos en puntales modelos Liu, Chen y Bowman (1985)

No.	Condiciones de Contorno del Forjado	Carga Máxima en Puntales			M_{3D}/M_s
		Método Grundy y Kabaila (M_s)	Método 2D (M_{2D})	Método 3D (M_{3D})	
1		2.00	1.83	1.86	0.93
2		2.00	1.83	1.97	0.99
3		2.00	2.07	2.06	1.03
4		2.00	2.07	2.07	1.04

En cuanto a la influencia de la rigidez de la cimentación, se consideró como superficie de cimentación una losa con iguales dimensiones que el forjado, a la que se le variaba su rigidez. Los resultados obtenidos con respecto a la fase de construcción con dos forjados apuntalados apoyados en la cimentación, en donde se presenta la carga máxima en puntales para un proceso de construcción de dos plantas cimbradas y 1 recimbrada, muestran un pequeño aumento de la carga máxima en puntales cuando se aumenta la rigidez de la cimentación, tal y como se observa en la Figura 2.15. Se concluye con ello, la escasa influencia de la rigidez del cimiento en las cargas en los puntales.

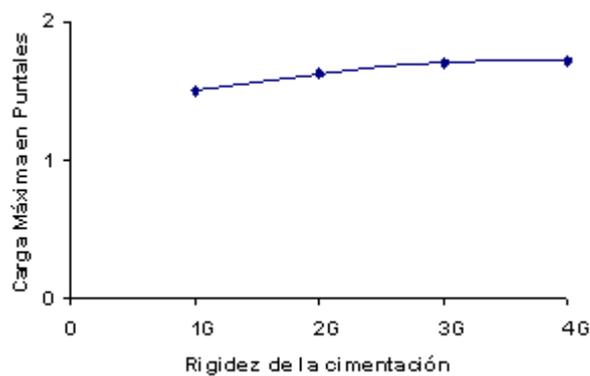


Fig. 2.15 Influencia de la rigidez de la cimentación

En lo referente a la deformación de los pilares, se encontró que su influencia era despreciable en el momento de determinar la distribución de cargas en los puntales. Lo mismo ocurrió con la relación

largo-ancho del forjado, donde se encontraron diferencias alrededor de un 3% en la carga máxima en puntales.

Finalmente Liu et al. (1985, 1986) concluyen que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) es adecuado para predecir las cargas en el proceso de construcción, aunque consideran la posibilidad de corregir los coeficientes de carga mediante el uso de un coeficiente (1.05-1.10), que permita contemplar la influencia de aspectos no considerados en dicho método.

2.3.4 Modelo EFM de Stivaros y Halvorsen (1990)

El uso del *Equivalent Frame Method* (EFM) es propuesto por Stivaros y Halvorsen (1990) para el cálculo de la transmisión de cargas entre forjados y puntales con el fin de mejorar los métodos anteriormente descritos. El EFM fue propuesto en 1970 en la revisión del código de la edificación de la ACI Committee 311, como un método de diseño de estructuras de hormigón.

Stivaros y Halvorsen proponen utilizar el EFM para el diseño de procesos constructivos de edificios de hormigón. El EFM propone un modelo en dos dimensiones de la estructura considerando las siguientes hipótesis:

- ✓ Se consideran los puntales como apoyos elásticos con un valor de rigidez igual a la rigidez total de los puntales correspondientes.
- ✓ Se asume que el nudo entre la losa y el puntal es una articulación.
- ✓ Se considera la cimentación como infinitamente rígida.
- ✓ Se consideran dos tipos de condiciones de contorno, la primera correspondiente a un vano aislado y la segunda a un conjunto de tres vanos.

El modelo representa un edificio en dos dimensiones considerando a los puntales como elementos verticales tipo barra, con una rigidez equivalente a la rigidez total de los puntales ubicados en la fila. Las losas son representadas con elementos tipo viga, con un ancho igual a la luz entre pilares y canto igual al canto real de la losa. Los pilares se consideran como elementos tipo viga con una sección igual a la sección real.

La Figura 2.16 muestra las cargas máximas en los forjados, comparando los resultados del EFM con los resultados obtenidos con los métodos anteriores. En la gráfica las operaciones constructivas se expresan mediante dos números. El primero hace referencia al último forjado hormigonado. El segundo número se refiere a la fase constructiva:

- ✓ (1) se refiere al hormigonado del nivel superior.
- ✓ (2) se refiere a la retirada del reapuntalamiento del nivel inferior.
- ✓ (3) se refiere a la retirada del apuntalamiento del nivel inferior.

Como se puede observar en la Figura 2.16, los tres métodos coinciden en predecir la carga máxima correctamente (operación 4-2), así como el lugar y el paso constructivo en el que ésta se presenta. Además la diferencia de resultados está por debajo de un 5%. Sin embargo estas diferencias se corresponden a una secuencia determinada de proceso constructivo. Por este motivo Stivaros y

Halvorsen (1990) consideraron varias secuencias constructivas cambiando el número de forjados que se encontraban cimbrados y recimbrados. Los resultados de las cargas máximas para diferentes combinaciones constructivas se presentan en las Figuras 2.17 y 2.18.

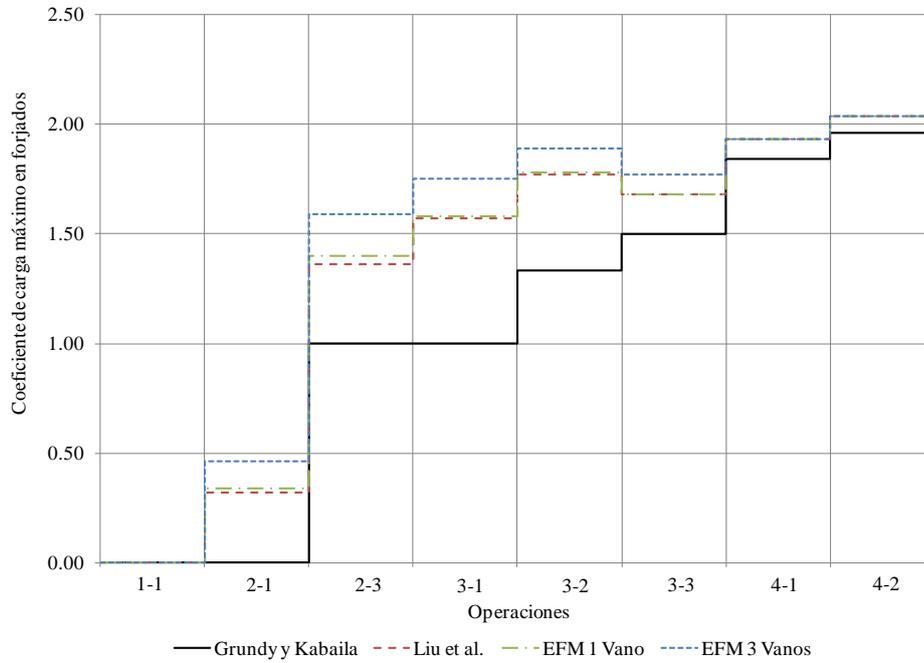


Fig. 2.16 Resultados del modelo EMF comparado con distintos modelos numéricos

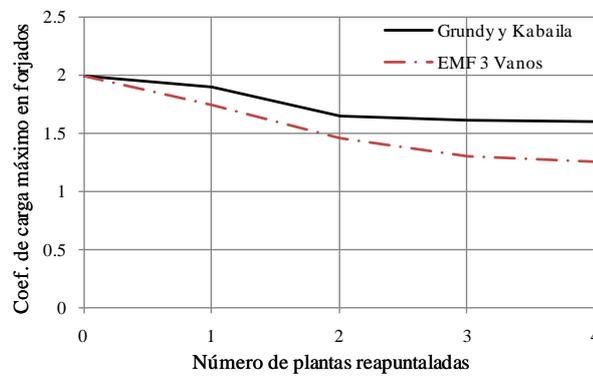


Fig. 2.17 Coeficientes de carga máximos para un forjado cimbrado

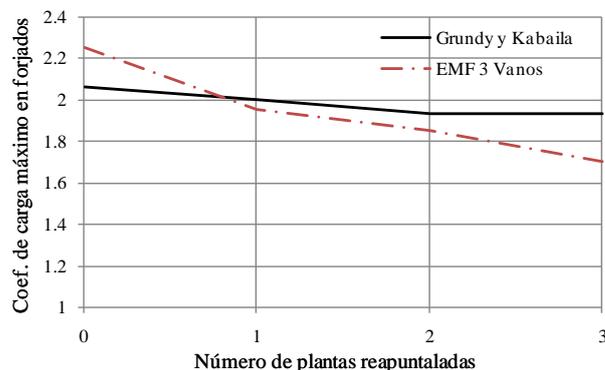


Fig. 2.18 Coeficientes de carga máximos para dos forjados cimbrados

Como se puede observar en las Figuras 2.17 y 2.18, la carga máxima fluctúa dependiendo del esquema constructivo utilizado, siendo en algunos casos la diferencia con las estimaciones del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) mucho mayor al 5%. También se evidencia la necesidad de emplear modelos que consideren varios vanos y no modelos de un único vano que pueden incurrir en errores importantes.

2.3.5 Modelo de Mosallam y Chen (1991)

Mosallam y Chen (1991) desarrollaron un modelo en dos dimensiones con el fin de determinar la distribución de cargas en forjados durante el proceso de construcción, y compararlas con las obtenidas con los modelos de Liu et al. (1985-1986), y con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963).

Las hipótesis básicas del modelo de Mosallam y Chen (1991) son:

- ✓ El comportamiento de los forjados y pilares se considera elástico, y su rigidez dependiente del tiempo.
- ✓ Los puntales en los procesos de cimbrado y recimbrado son asimilados como soportes elásticos con una rigidez finita.
- ✓ La rigidez de la cimentación es considerada como correspondiente a la rigidez de una losa de cimentación de iguales características a los forjados.
- ✓ Los pilares inferiores al último forjado a hormigonar tienen una edad de 7 días.
- ✓ La distribución de cargas de construcción en puntales y forjados se considera cambiante durante el periodo de tiempo definido en el hormigonado de forjados consecutivos.

El modelo en dos dimensiones es igual al modelo empleado por Liu et al. (1985, 1986). La única diferencia se basa en no despreciar la deformación vertical de los pilares.

Comparando el método simplificado de Grundy y Kabaila con los resultados obtenidos, se observa que el método de Grundy y Kabaila sobreestima las cargas que se presentan en un proceso de construcción. Las diferencias con el método de Grundy y Kabaila, llevaron a los autores a determinar la influencia que tienen cada una de las hipótesis contempladas en el modelo:

- a. *Influencia de la rigidez de la cimentación:* para determinar dicha influencia se modificó el modelo, considerando una cimentación infinitamente rígida. Los resultados obtenidos mostraron que, con respecto a la distribución de cargas en forjados, no hay ninguna diferencia. Sin embargo, en la distribución de cargas en puntales existe un incremento de carga de aproximadamente un 11%.
- b. *Influencia de las condiciones de contorno del forjado:* se analizan dos casos extremos, un forjado simplemente apoyado y uno empotrado. Los resultados obtenidos muestran que las condiciones de contorno del forjado tienen muy poca influencia en la distribución de cargas en los forjados. Sin embargo, en la consideración del forjado simplemente apoyado se sobreestima en un 43% la carga máxima en puntales.
- c. *Influencia de la rigidez de los forjados:* se observó la pequeña influencia que tiene considerar el módulo de elasticidad del hormigón como variable o constante, en la distribución de cargas de construcción en los forjados.
- d. *Influencia de la rigidez de los puntales:* al incrementar la rigidez de los puntales la carga máxima en forjados tiende a disminuir y la carga máxima en puntales tiende a incrementarse.
- e. *Influencia de despreciar el cambio en la distribución de cargas durante los ciclos de construcción:* El método simplificado de Grundy y Kabaila asume que la distribución de carga de construcción se mantiene constante durante el hormigonado de forjados consecutivos. Esta hipótesis lleva a sobreestimar la carga máxima en forjados y la carga máxima en puntales considerablemente.

2.3.6 Método simplificado Modificado de Mosallam y Chen (1991)

Mosallam y Chen (1991) al ver las diferencias entre los resultados obtenidos del modelo en dos dimensiones con los resultados del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), desarrollaron el método simplificado modificado de Mosallam y Chen.

Dicho método, considera una redistribución de carga y mantiene el resto de suposiciones adoptadas por Grundy y Kabaila (1963). Es decir que la distribución de cargas se calcula dos veces por operación, al inicio y al final de cada paso constructivo, considerando la evolución del módulo de elasticidad del hormigón.

Los coeficientes de carga obtenidos con el método simplificado modificado de Mosallam y Chen (1991) se comparan con los coeficientes del modelo simplificado de Grundy y Kabaila (1963) y con los coeficientes obtenidos en el modelo en dos dimensiones de Mosallam y Chen (1991). Dicha comparación queda incluida en las Tablas 2.2 y 2.3 para los casos de tres plantas cimbradas, y dos plantas cimbradas y una recimbrada respectivamente.

Tabla 2.2 Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de tres plantas cimbradas

Paso	Nivel	Método simplificado de Grundy y Kabaila		Modelo en 2D Mosallam-Chen		Método simplificado de Mosallam y Chen	
		Puntales	Forjado	Puntales	Forjado	Puntales	Forjado
1	1	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
2	2	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	2.00	0.00	1.51	0.86	2.00	0.00
3	3	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	2	2.00	0.00	1.08	1.15	2.00	0.00
	1	3.00	0.00	1.34	0.85	3.00	0.00
4	3	0.00	1.00	0.08	0.94	0.00	1.00
	2	0.00	1.00	0.06	1.03	0.00	1.00
	1		1.00		1.07		1.00
5	4	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	3	0.66	1.34	0.70	1.42	0.66	1.34
	2	0.33	1.33	0.32	1.36	0.33	1.33
	1		1.33		1.29		1.33
6	4	0.89	0.11	0.09	0.94	0.00	1.00
	3	0.44	1.45	0.06	1.03	0.00	1.00
	2		1.44		1.07		1.00
7	1		1.00		1.00		1.00
	5	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	4	1.55	0.45	0.71	1.41	0.66	1.34
	3	0.77	1.78	0.33	1.35	0.33	1.33
8	2		1.78		1.28		1.33
	5	0.74	0.26	0.10	0.93	0.00	1.00
	4	1.03	0.71	0.07	1.02	0.00	1.00
	3		2.03		1.05		1.00
9	2		1.00		1.00		1.00
	6	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	5	1.40	0.60	0.72	1.40	0.66	1.34
	4	1.36	1.04	0.34	1.34	0.33	1.33
10	3		2.36		1.27		1.33
	6	0.54	0.46	0.11	0.93	0.00	1.00
	5	0.49	1.05	0.08	1.01	0.00	1.00
	4		1.49		1.05		1.00
	3		1.00		1.00		1.00

2.3.7 Modelo de Moragues et al. (1992, 1994, 1996)

La diferencia encontrada en los valores de carga de construcción medidos en obra, con las cargas estimadas mediante el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), motivaron al desarrollo de una modelización numérica en dos dimensiones. Las hipótesis contempladas para dicho modelo son las siguientes:

- ✓ Cálculo lineal, en dos dimensiones.
- ✓ Se consideran puntales metálicos de rigidez conocida.
- ✓ No se considera el peso propio de los puntales.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.
- ✓ Los puntales se consideran apoyados en sus extremos.
- ✓ Los efectos de retracción y fluencia son despreciados.

Tabla 2.3 Comparación entre los modelos de Grundy y Kabaila (1963) y los modelos de Mosallam y Chen (1991) para el caso de dos plantas cimbradas y una recimbrada

Paso	Nivel	Método simplificado Grundy y Kabaila		Modelo en 2D Mosallam-Chen		Método simplificado Mosallam y Chen	
		Puntales	Forjado	Puntales	Forjado	Puntales	Forjado
1	1	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
2	2	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	2.00	0.00	1.51	0.86	2.00	0.00
3,4	2	0.00	1.00	0.06	0.97	0.00	1.00
	1	0.00	1.00	0.00	1.07	0.00	1.00
	3	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
5	2	1.00	1.00	0.72	1.41	1.00	1.00
	1	1.00	1.00	0.39	1.32	1.00	1.00
6	3	0.67	0.33	0.62	0.51	0.67	0.33
	2	0.33	1.34	0.29	1.31	0.34	1.33
	1	0.00	1.33	0.00	1.27	0.00	1.34
7,8	3	0.50	0.50	0.50	0.59	0.50	0.50
	2	0.00	1.50	0.00	1.47	0.00	1.50
	1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00
9	4	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
	3	1.17	0.83	1.12	1.10	1.17	0.83
	2	0.34	1.83	0.25	1.80	0.33	1.83
	1	0.00	1.34	0.00	1.22	0.00	1.33
10	4	0.89	0.11	0.62	0.51	0.67	0.33
	3	0.95	0.94	0.75	0.91	0.84	0.83
	2	0.00	1.95	0.00	1.63	0.00	1.84
	1	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Adicionalmente se consideraron 4 variaciones:

- ✓ Supuesto básico (Considerando el conjunto de hipótesis antes mencionadas).
- ✓ Variación del módulo de elasticidad del hormigón, con la edad.
- ✓ Clareado.
- ✓ Variación del módulo de elasticidad del hormigón con la edad, y clareado.

El clareado, es un proceso de uso habitual en España, el cual no puede ser considerado como un recimbrado, ya que el forjado no deja de estar apuntalado en el momento de la retirada de los fondos de encofrado, sino apoyado en la mitad de los puntales que se encontraban en el momento del hormigonado.

Se muestran a continuación los resultados y conclusiones obtenidas con las diferentes modelizaciones numéricas realizadas por Moragues et al. (1994, 1996) en forma de coeficientes de carga que se corresponden siempre a tomar como unidad el peso propio del forjado.

- ✓ Como indica el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), el forjado más solicitado corresponde a la última planta que fue hormigonada con puntales hasta la cimentación cuando se tiene sobre él un número de plantas cimbradas igual a los juegos de cimbras que se utilicen. En la Tabla 2.4 se muestran los coeficientes máximos de carga en forjados.

Tabla 2.4 Coeficientes máximos de carga en forjados

N	Método de Grundy y Kabaila	Hipótesis				Benidorm
		No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado No E Variable	Clareado E Variable	
2	2.25	2.12	2.14	1.77	1.83	-
3	2.36	2.18	2.22	1.77	1.81	1.84

- ✓ Las cargas máximas en puntales aparecen siempre en los que apoyan en la cimentación, cuando tienen todos los juegos de cimbra sobre ellos (Tabla 2.5). Salvando este momento de la obra, las cargas máximas sobre puntales aparecen sobre la última planta que fue cimbrada hasta la cimentación, cuando se hormigona la planta “n” situada sobre ella (Tabla 2.6).

Tabla 2.5 Coeficientes máximos de carga en puntales (Cimentación)

N	Método de Grundy y Kabaila	Hipótesis				Benidorm
		No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado No E Variable	Clareado E Variable	
2	2	1.54	1.73	2.78	2.96	-
3	3	1.85	2.13	3.15	3.35	3.38

Tabla 2.6 Coeficientes máximos de carga en puntales (Casos Restantes)

N	Método de Grundy y Kabaila	Hipótesis				Benidorm
		No clareado No E Variable	No Clareado E Variable	Clareado No E Variable	Clareado E Variable	
2	1.12	1.16	2.01	2.15	-	1.25
3	1.34	1.44	2.49	2.60	2.40	1.55

Las Figuras 2.19 y 2.20 muestran los coeficientes de carga para cada uno de los pasos constructivos en dos casos. El primero considerando dos plantas cimbradas y el segundo considerando 3 plantas cimbradas, en ambos casos con el paso intermedio del clareado.

Finalmente Moragues (1996) concluye expresando la necesidad de realizar más investigaciones que consideren aspectos como las deformaciones producidas por el proceso constructivo, la posible fisuración del hormigón joven y la influencia que pueden tener las deformaciones de retracción y térmicas durante el proceso constructivo.

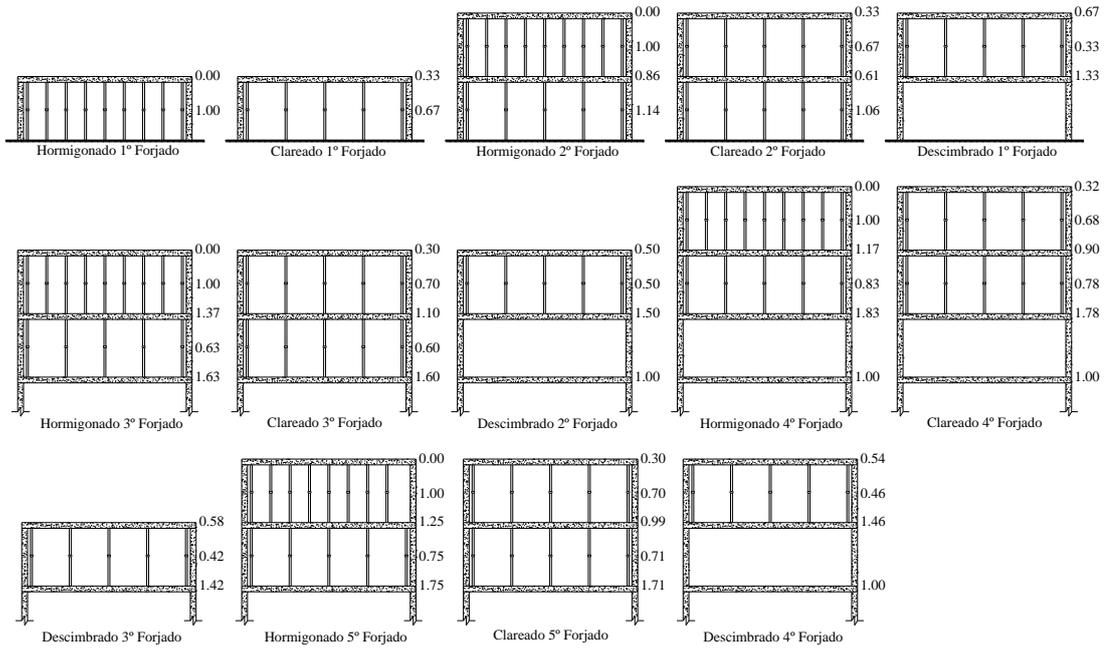


Fig. 2.19 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para dos plantas cimbradas

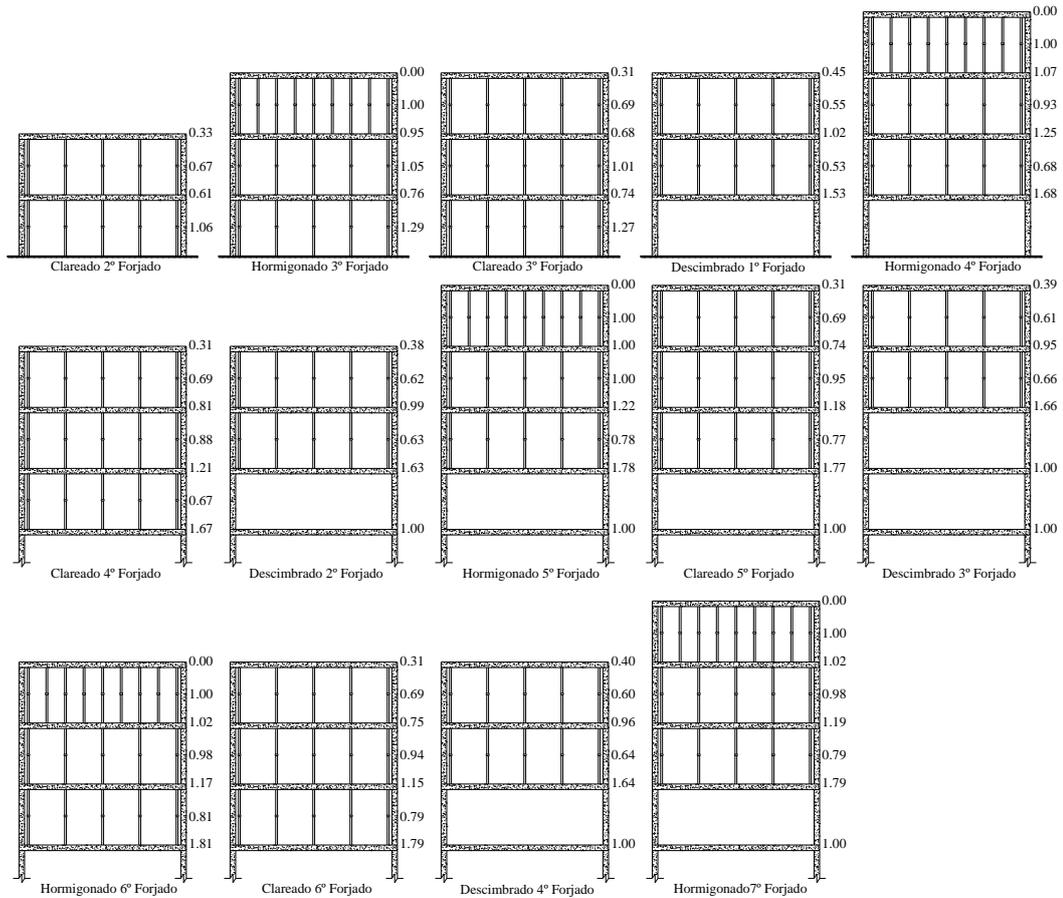


Fig. 2.20 Coeficientes de carga modelo Moragues et al. (1996) para tres plantas cimbradas

2.3.8 Método Simplificado de Duan y Chen (1995)

El método de Duan y Chen (1995), conocido como el método simplificado mejorado, al igual que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), busca un procedimiento que no exija la utilización de ningún software de análisis estructural para tener la máxima difusión práctica posible, tal y como se pretende y se busca con la aplicación informática de este trabajo. La principal hipótesis de partida se basa en considerar que los puntales tienen una rigidez finita.

La Figura 2.21 muestra la discretización estructural de la fase de hormigonado considerada, donde P es el peso propio del forjado recién hormigonado (n), que se reparte entre los forjados inferiores hormigonados previamente y conectados mediante puntales.

Los incrementos de carga en puntales F_j , producidos por las cargas en forjados P_j son:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= P_1 \\
 F_2 &= P_1 + P_2 \\
 &\dots \\
 F_j &= P_1 + P_2 + \dots + P_j \\
 &\dots \\
 F_n &= P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = P
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

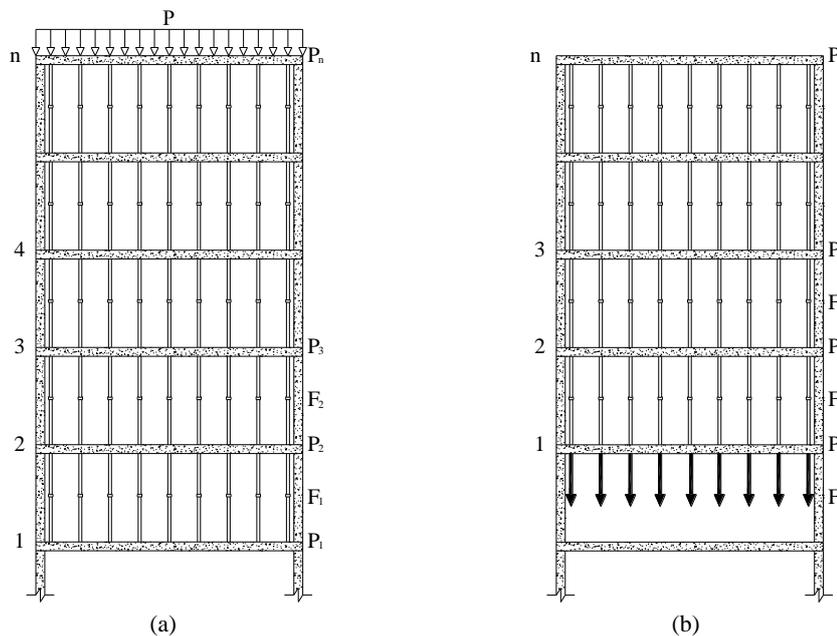


Fig. 2.21 Operaciones de (a) Hormigonado del último forjado y (b) Descimbrado del primer forjado

Asumiendo que las cargas transmitidas a los puntales son uniformemente distribuidas, Duan y Chen determinaron que la deformación de los puntales ubicados en la parte central, es igual a la deformación media de los puntales ubicados en el mismo nivel. De esta forma aplicando la compatibilidad de desplazamientos para la parte central de los forjados ubicados en j y $j-1$ tenemos:

$$\Delta_j = \Delta_{j-1} + \Delta_{sh,j-1} \quad (2.4)$$

donde Δ_j y Δ_{j-1} son las flechas en el centro de los forjados j y $j-1$ respectivamente. $\Delta_{sh,j-1}$ la deformación media de los puntales ubicados en el nivel $j-1$. Sustituyendo deformaciones por esfuerzos y expresando las cargas en puntales en función de las solicitaciones en los forjados, tenemos:

$$K_j \cdot P_j = K_{j-1} \cdot P_{j-1} + K_{sh,j-1}(P_1 + P_2 + \dots + P_{j-1}) \quad (2.5)$$

donde los factores K se definen como las deformaciones del elemento estructural bajo la acción de una carga unitaria ya sea forjado o puntal. Para el cálculo de estos factores se emplean las siguientes expresiones (la expresión 2.6 para forjados y la expresión 2.7 para puntales):

$$K_j = \gamma \cdot \frac{L^2}{E_j \cdot I} \quad (2.6)$$

$$K_{sh,j-1} = \frac{H}{E_{sh} \cdot A} \quad (2.7)$$

donde γ es un coeficiente que depende de las condiciones de contorno y la relación largo ancho del forjado; E_j el módulo de elasticidad de los forjados y E_{sh} es el módulo de elasticidad de los puntales; L es la longitud del vano más largo del forjado e I el momento de inercia del forjado suponiendo un ancho unitario; H es la altura de los puntales y A el área de todos los puntales.

Una vez calculados los coeficientes K de forjados y puntales, se definen los ratios de cargas entre dos forjados consecutivos:

$$\begin{aligned} \alpha_{21} &= \frac{P_2}{P_1} = \frac{K_1}{K_2} + \frac{K_{sh}}{K_2} \\ \alpha_{32} &= \frac{P_3}{P_2} = \frac{K_2}{K_3} + \frac{K_{sh}}{K_3} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{21}}\right) \\ \alpha_{43} &= \frac{P_4}{P_3} = \frac{K_3}{K_4} + \frac{K_{sh}}{K_4} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{32}} + \frac{1}{\alpha_{21} \cdot \alpha_{32}}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

.....

$$\alpha_{n\ n-1} = \frac{P_n}{P_{n-1}} = \frac{K_{n-1}}{K_n} + \frac{K_{sh}}{K_n} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{n-1\ n-2}} + \frac{1}{\alpha_{n-1\ n-2} \cdot \alpha_{n-2\ n-3}} + \dots\right)$$

Por otro lado se tiene que el peso propio P del forjado recién hormigonado se reparte entre los forjados inferiores conectados por puntales, entonces se cumple que:

$$\sum_{j=1}^n P_j = P \quad (2.9)$$

Así, las solicitaciones de carga en los forjados se pueden calcular por las siguientes expresiones:

$$P_1 = \frac{P}{1 + \alpha_{21} + \alpha_{21} \cdot \alpha_{32} + \alpha_{21} \cdot \alpha_{32} \cdot \alpha_{43} + \dots + \alpha_{21} \cdot \alpha_{32} \cdot \alpha_{n-1 \ n-2}} \quad (2.10)$$

$$P_j = \alpha_{j \ j-1} \cdot P_{j-1} \quad (2.11)$$

La operación de descimbrado resulta equivalente a la aplicación de una fuerza equivalente en sentido descendente con la misma magnitud que las fuerzas transmitidas por los puntales retirados. Así, las formulas aplicadas para el descimbrado son análogas al hormigonado, teniendo en cuenta que la transmisión de cargas se realiza en sentido contrario. De esta manera, para el caso de descimbrado presentado en la Figura 2.21 (b) las relaciones entre los incrementos de carga en los forjados P_j y los incrementos de carga en los puntales F_j , son las siguientes:

$$\begin{aligned} F_1 &= -(P_2 + P_3 + \dots + P_n) \\ F_2 &= -(P_3 + P_4 + \dots + P_n) \\ &\dots \\ F_j &= -(P_{j+1} + P_{j+2} + \dots + P_n) \\ &\dots \\ F_{n-1} &= -P_n \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\sum_{j=1}^n P_j = F_0 \quad (2.13)$$

Las ecuaciones de compatibilidad de desplazamientos son similares tanto en el caso de hormigonado como en el caso de descimbrado. Así, se cumple que la carga transmitida por los puntales retirados se reparte entre los forjados superiores cimbrados, validando la expresión 2.13.

El método simplificado de Duan y Chen permite calcular los incrementos de carga en las fases de hormigonado y descimbrado. En la Tabla 2.7 se muestran los resultados del método desarrollado por Duan y Chen comparándolos con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963).

De los resultados obtenidos, Duan y Chen concluyeron lo siguiente:

- ✓ El método simplificado de Grundy y Kabaila subestima las solicitaciones de los forjados, debido a que considera los puntales como infinitamente rígidos.

2.3.9 Método simplificado de Fang et al. (2001)

Fang et al. (2001) propusieron un nuevo método. La principal consideración de este método es considerar que durante el curado del hormigón la rigidez de los elementos estructurales varía significativamente, y en consecuencia, los esfuerzos en la estructura tienen que redistribuirse especialmente en forjados recién hormigonados.

Tabla 2.7 Comparación entre los métodos simplificados de Grundy y Kabaila y de Duan y Chen para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado.

Paso	Nivel	Método simplificado de Grundy y Kabaila		Método simplificado de Duan y Chen	
		Puntales	Forjado	Puntales	Forjado
1	1	1.00	0.00	1.00	0.00
2	2	1.00	0.00	1.00	0.00
	1	2.00	0.00	1.65	0.35
3,4	2	0.00	1.00	0.39	0.61
	1	0.00	1.00	0.00	1.39
	3	1.00	0.00	1.00	0.00
5	2	1.00	1.00	0.97	1.07
	1	1.00	1.00	0.33	1.59
	3	0.67	0.33	0.95	0.05
6	2	0.33	1.34	0.78	1.16
	1	0.00	1.33	0.00	1.78
	3	0.50	0.50	0.66	0.34
7,8	2	0.00	1.50	0.00	1.65
	1	0.00	1.00	0.00	1.00
	4	1.00	0.00	1.00	0.00
9	3	1.17	0.83	1.14	0.86
	2	0.34	1.83	0.19	1.94
	1	0.00	1.34	0.00	1.19
	4	0.89	0.11	0.97	0.03
10	3	0.95	0.94	1.06	0.91
	2	0.00	1.95	0.00	2.05
	1	0.00	1.00	0.00	1.00

El modelo de Fang et al. (2001) considera las siguientes hipótesis:

- ✓ Modelo bidimensional, considerando una articulación en la unión entre puntales y forjado.
- ✓ Se considera la variación del módulo de elasticidad con el tiempo.
- ✓ La cimentación se considera como infinitamente rígida.
- ✓ El modelo es incremental. Considera la acumulación de cargas y desplazamientos.
- ✓ El forjado recién hormigonado evoluciona desde una situación en que no soporta ninguna carga, hasta soportar parte de su peso propio, provocando una redistribución del peso propio del forjado proporcional a su ganancia de rigidez y a la rigidez del sistema de apuntalamiento.

Se describe a continuación el procedimiento para determinar la redistribución de cargas, el cual se basa en expresiones que reparten la carga en función de la relación de rigideces entre los forjados y la cimbra. La rigidez del forjado en el nivel i se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{slab,i} = \frac{\lambda_i \cdot E_{ci} \cdot I_i}{L_{slab}^4} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.14)$$

donde, n es el número de forjados conectados por puntales, λ_i el coeficiente que considera las condiciones de contorno de los forjados y la naturaleza de las cargas (diferente para cargas puntuales y cargas distribuidas), E_{ci} módulo de elasticidad del hormigón dependiente del tiempo, I_i el momento de inercia de la franja de forjado considerado y L_{slab} la luz del forjado.

La rigidez del sistema de cimbrado ubicado en el nivel i se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_{shore,i} = \frac{\rho_i \cdot s \cdot E_{shore,i} \cdot A_{shore,i}}{L_{shore,i} \cdot L_{slab}} \quad i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (2.15)$$

siendo, s el número de puntales instalados en el vano considerado, ρ_i el coeficiente que considera las cargas desiguales en los puntales, $E_{shore,i}$ el módulo de elasticidad de los puntales ubicados en el nivel i , $A_{shore,i}$ el área de la sección transversal de los puntales, $L_{shore,i}$ la longitud de los puntales y L_{slab} la luz del forjado.

Asumiendo que el peso propio del forjado superior es q , que la carga soportada por el forjado inferior es q_i , y que la deformación del forjado i es Δ_i , entonces:

$$\Delta_i = \frac{q_i}{K_{slab,i}} \quad (2.16)$$

$$\Delta_{i+1} - \Delta_i = \sum_{j=1}^i \frac{q_j}{K_{shore,i}} \quad (2.17)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i = q \quad (2.18)$$

de la ecuación 2.16 se cumple que:

$$\Delta_1 = \frac{q_1}{K_{slab,1}} \quad (2.19)$$

$$\Delta_2 = \frac{q_2}{K_{slab,2}} \quad (2.20)$$

$$\Delta_2 - \Delta_1 = \frac{q_1}{K_{shore,1}} \quad (2.21)$$

entonces:

$$q_2 = q_1 \left(\frac{K_{slab,2}}{K_{slab,1}} + \frac{K_{slab,2}}{K_{shore,1}} \right) = m_{2,1} \cdot q_1 \quad (2.22)$$

$$v_{i,j} = \frac{K_{slab,i}}{K_{slab,j}} \quad (2.23)$$

$$u_{i,j} = \frac{K_{slab,i}}{K_{shore,j}} \quad (2.24)$$

El coeficiente $m_{i,1}$ representa la relación de carga soportada por el forjado del nivel i y la carga soportada por el primer forjado. Los coeficientes $v_{i,j}$ y $u_{i,j}$ definen la relación de rigidez entre dos forjados, y entre el forjado y puntales respectivamente.

Así se tiene que la carga soportada por el forjado del tercer nivel será:

$$q_3 = q_2 \left(\frac{K_{slab,3}}{K_{slab,2}} + \frac{K_{slab,3}}{K_{shore,2}} \right) + q_1 \cdot \frac{K_{slab,3}}{K_{shore,2}} = m_{2,1} \cdot q_1 (v_{3,2} + u_{3,2}) + u_{3,2} \cdot q_1$$

$$= m_{3,1} \cdot q_1 \quad (2.25)$$

La carga soportada por el forjado del nivel i se puede expresar de la siguiente forma:

$$q_i = m_{i,1} \cdot q_1 \quad (2.26)$$

$$m_{i,1} = m_{i-1,1} \cdot v_{i,i-1} + u_{i,i-1} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} m_{j,1} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.27)$$

$$q_i = q \cdot \frac{m_{i,1}}{\sum_{j=1}^n m_{j,1}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.28)$$

Si se considera el peso propio del forjado superior como unitario ($q = 1$), se pueden establecer los coeficientes de carga. La Tabla 2.8 muestra una comparación entre los coeficiente de carga obtenidos con el modelo de Fang et al. y algunos de los modelos descritos anteriormente.

De esta comparación de resultados, Fang et al. (2001) concluyen que los resultados de su nuevo modelo se ajustan a los resultados obtenidos por Mosallam y Chen (1991), y a los resultados obtenidos por el método simplificado de Duan y Chen. Posteriormente y para un ciclo constructivo de tres plantas apuntaladas Fang et al. (2001) consideran que el método de Mosallam y Chen (1991) y el método simplificado de Duan y Chen (1995), no estiman adecuadamente las solicitaciones de carga máxima en los forjados.

2.3.10 Estudio realizado por Alvarado et al. (2009)

Alvarado (2009) desarrolló en su Tesis Doctoral un modelo de elementos finitos en tres dimensiones que incluía la operación del clareado de uso habitual en España, con el objetivo de simular el proceso constructivo seguido en un edificio experimental construido, por primera vez, exclusivamente con fines experimentales. Las hipótesis asumidas en el MEF son las siguientes:

- ✓ Comportamiento elástico y lineal del forjado de losa maciza de hormigón armado, considerando la variación de rigidez respecto al tiempo.
- ✓ Los pilares son considerados de sección rectangular con comportamiento elástico y lineal. También se considera la variación de su rigidez respecto al tiempo.
- ✓ Los puntales de acero son considerados como soportes elásticos con una rigidez finita, apoyados en sus extremos.

- ✓ Los tableros de encofrado de madera son considerados como elementos con un comportamiento elástico y lineal y de rigidez finita.
- ✓ Las sopandas de acero son simuladas como elementos con un comportamiento elástico y lineal, con una rigidez finita.
- ✓ La cimentación se considera infinitamente rígida.
- ✓ No se consideran los efectos de los cambios de temperatura en los diferentes elementos de la estructura, sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales.
- ✓ Los efectos de fluencia y retracción son despreciados.

Tabla 2.8 Comparación de coeficientes de carga en forjados por diferentes modelos y el modelo de Fang et al. para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado

Paso	Nivel	Simplificado Grundy y Kabaila	Mosallam y Chen	Simplificado Mosallam y Chen	Simplificado Duan y Chen	Simplificado Fang et al.
1	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1	0.00	0.86	0.00	0.35	0.38
	2	1.00	0.97	0.93	0.61	0.67
3,4	1	1.00	1.07	1.07	1.39	1.33
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	2	1.00	1.41	0.93	1.07	1.10
	1	1.00	1.32	1.07	1.59	1.51
6	3	0.33	0.51	0.30	0.05	0.20
	2	1.34	1.31	1.27	1.16	1.14
7,8	1	1.33	1.27	1.43	1.78	1.66
	3	0.50	0.59	0.50	0.34	0.44
9	2	1.50	1.47	1.50	1.65	1.56
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
10	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.83	1.10	0.80	0.86	0.93
9	2	1.83	1.80	1.84	1.94	1.86
	1	1.34	1.22	1.36	1.19	1.20
10	4	0.11	0.51	0.30	0.03	0.30
	3	0.94	0.91	0.84	0.91	0.84
10	2	1.95	1.63	1.86	2.05	1.86
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

El modelo de elementos finitos quedó calibrado al comparar los resultados experimentales con los numéricos. Utilizó este edificio experimental para calcular, según algunos métodos de los autores citados anteriormente, los coeficientes de carga que asumen tanto los forjados como los puntales para un proceso constructivo CCD. Con ello obtuvo el ajuste de cada método con las medidas experimentales y, a su vez, con el modelo de elementos finitos.

Alvarado (2009) afirma que, en general, el método que presenta un mayor ajuste a las medidas experimentales y a los resultados del modelo numérico es el método simplificado de Duan y Chen (1995). A pesar de tener una media de error sensiblemente mayor que la del método propuesto por Fang et al. (2001) su desviación típica es considerablemente inferior. Lo que a nivel de cada operación constructiva lo hace más preciso. Este método es el que se ajusta mejor a las medidas experimentales obtenidas en la estructura estudiada.

2.3.11 Nuevo método simplificado por Calderón et al. (2011)

Las hipótesis tomadas en el nuevo método simplificado son las siguientes:

- ✓ Se considera la variación de rigidez de los forjados con el tiempo.
- ✓ La cimentación se considera infinitamente rígida.
- ✓ El modelo es incremental y considera la acumulación de cargas y desplazamientos durante las diferentes fases de construcción.
- ✓ Los puntales son considerados como soportes elásticos con una rigidez finita.
- ✓ Las cargas transmitidas de puntales a forjados se consideran uniformemente distribuidas.
- ✓ La deformación media del forjado coincide con la media de los puntales que lo soportan.
- ✓ Se consideran diferentes condiciones de contorno (vano interno, vano extremo, vano aislado, etc.) y la deformabilidad se estima por el método de Scanlon y Murray.
- ✓ Se puede aplicar para los métodos CD, CRD y CCD.
- ✓ No se consideran los efectos de retracción y fluencia.

De forma similar al método usado por Duan y Chen, la Figura 2.22 muestra la simulación estructural del proceso CCD.

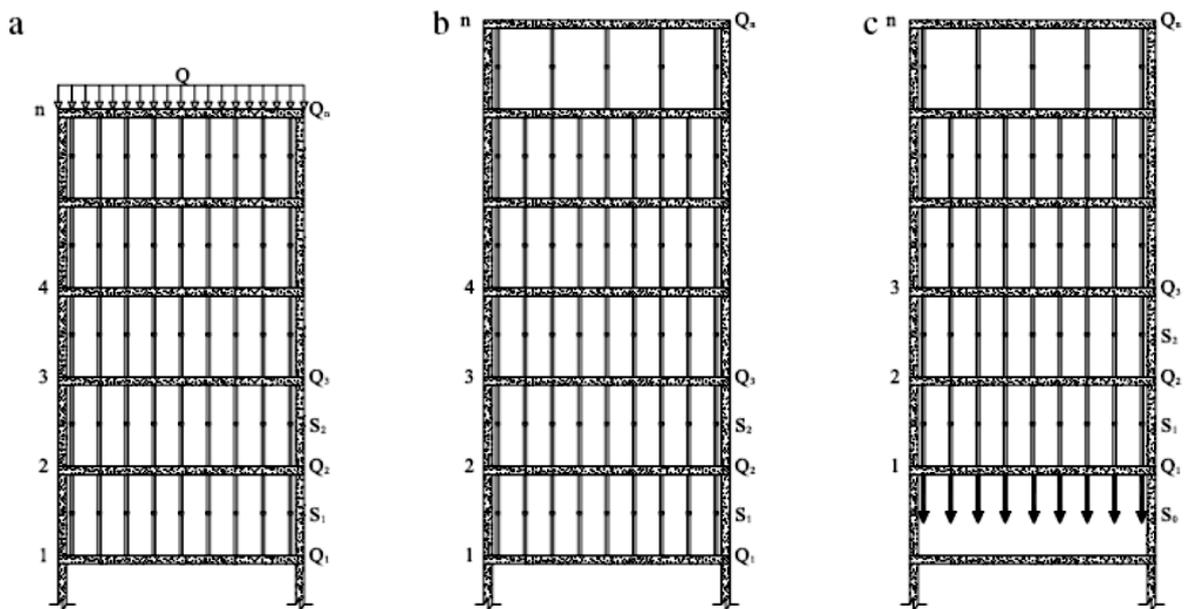


Fig. 2.22 Operación de cimbrado y clareado del último forjado y descimbrado del primero. Calderón et al. (2011)

Siguiendo el mismo razonamiento que usaban Duan y Chen en su formulación desde la ecuación (2.3) hasta la (2.13), se puede calcular la distribución de cargas en forjados y puntales. Ahora bien, en este método se introduce una modificación en el cálculo del factor K_j que sustituye a la forma de calcularlo expuesta por Duan y Chen en la ecuación (2.6). Este factor se define como la deformación del forjado bajo la acción de una carga unitaria. La deformación en los forjados, en este caso, se calculó por el *equivalent frame method* (EFM).

La aplicación de este método implica, en primer lugar, el cálculo del diagrama de momentos flectores de las bandas central y de pilares según se muestra en la figura 2.23.

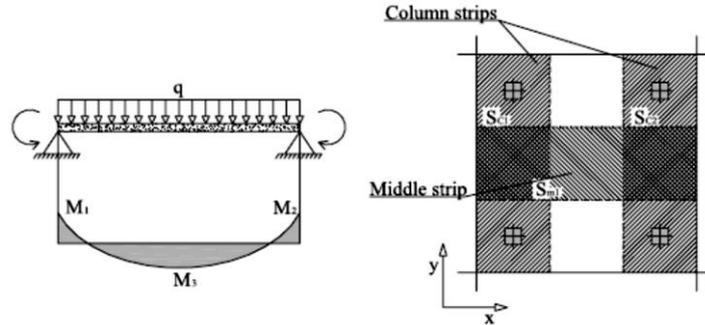


Fig. 2.23 Discretización de la estructura, EFM. Calderón et al. (2011)

Una vez calculados los diagramas de momentos, los desplazamientos verticales se calculan asumiendo que las bandas central y de pilares son vigas. Entonces, el desplazamiento vertical, se calcula de la forma convencional para estos elementos.

En cada banda, las cargas se consideran uniformemente distribuidas. Así, el diagrama de momentos flectores puede obtenerse bajo condiciones de equilibrio estático a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{(M_1 + M_2)}{2} + M_3 = M_0 \quad (2.29)$$

donde q es la fracción de carga asignada a la banda analizada en cuestión, L es la distancia entre pilares y M_0 es el momento isostático de la luz entre pilares. El desplazamiento medio para cada banda se calcula con la ecuación de la viga elástica obteniendo:

$$\overline{\Delta}_s = \frac{q \cdot L^4}{120 \cdot E \cdot I} - \frac{(M_1 + M_2) \cdot L^2}{24 \cdot E \cdot I} \quad (2.30)$$

donde I es el momento de inercia de la banda considerada y E es el módulo de elasticidad del hormigón dependiente del tiempo. La evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados se calcula aplicando la técnica de la madurez (explicada en el apartado 2.4.2.3 del presente Capítulo), similar a la empleada por Waller et al. y Adam et al. (2007).

Los desplazamientos medios verticales en las direcciones x e y se obtendrían por los desplazamientos de la banda de pilares más los desplazamientos de la banda central, como muestran las siguientes ecuaciones:

$$\overline{\Delta}_y = \frac{\overline{\Delta}_{SC1} + \overline{\Delta}_{SC2}}{2} + \overline{\Delta}_{Sm1} \quad (2.31)$$

$$\overline{\Delta}_x = \frac{\overline{\Delta}_{SC3} + \overline{\Delta}_{SC4}}{2} + \overline{\Delta}_{Sm2} \quad (2.32)$$

Por lo que el desplazamiento medio vertical en direcciones x e y es el que se toma como desplazamiento del forjado. Así pues, el factor K_j ha sido determinado como el desplazamiento del forjado debido a los efectos de una carga unitaria.

Calderón et al. (2011) verificaron este nuevo método simplificado aplicándolo al edificio construido exclusivamente con fines experimentales que utiliza Alvarado (2009) en su Tesis Doctoral y comparándolo con otros métodos teóricos anteriormente expuestos, incluyendo entre ellos el modelo de elementos finitos en tres dimensiones propuesto en dicha Tesis Doctoral. Los resultados comparativos fueron los mostrados en las Tablas 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12.

Tabla 2.9 Comparación entre los resultados experimentales y los del nuevo método simplificado. Calderón et al. (2011)

Step	Stage of construction	Level	\overline{S}_{exp} (KN/m ²)	\overline{S}_{nsp} (KN/m ²)	$\frac{\overline{S}_{exp}}{\overline{S}_{nsp}}$
1	Casting level 1	1	5.64	5.64	1.00
2	Clearing level 1	1	3.07	4.23	0.73
3	Casting level 2	2	5.60	5.64	1.00
4	Clearing level 2	1	4.48	8.36	0.54
		2	2.91	3.48	0.84
5	Striking level 1	1	3.86	6.47	0.60
		2	1.57	1.02	1.54
6	Casting level 3	3	5.50	5.64	0.98
		2	3.07	3.12	0.98
7	Clearing level 3	3	3.12	3.08	1.01
		2	2.78	2.02	1.37
8	Load in level 3	3	4.33	5.75	0.75
		2	3.38	3.38	1.00
9	Striking level 2	3	3.67	4.34	0.85
-	Mean	-	-	-	0.94
-	Standard deviation	-	-	-	0.25

Tabla 2.10 Comparación entre los resultados del modelo de elementos finitos y los del nuevo método simplificado. Calderón et al. (2011)

Step	Stage of construction	Level	\overline{S}_{FEM} (KN/m ²)	\overline{S}_{nsp} (KN/m ²)	$\frac{\overline{S}_{FEM}}{\overline{S}_{nsp}}$
1	Casting level 1	1	5.52	5.64	0.98
2	Clearing level 1	1	3.41	4.23	0.81
3	Casting level 2	2	5.80	5.64	1.02
4	Clearing level 2	1	6.60	8.36	0.79
		2	2.90	3.48	0.83
5	Striking level 1	1	5.33	6.47	0.82
		2	1.39	1.02	1.36
6	Casting level 3	3	5.80	5.64	1.03
		2	3.04	3.12	0.97
7	Clearing level 3	3	2.77	3.08	0.90
		2	2.19	2.02	1.08
8	Load in level 3	3	5.37	5.75	0.93
		2	3.36	3.38	0.99
9	Striking level 2	3	4.23	4.34	0.97
-	Mean	-	-	-	0.96
-	Standard deviation	-	-	-	0.14

Las estimaciones obtenidas por el método simplificado de Duan y Chen y por el método simplificado de Fang et al. sobreestiman las cargas en los puntales debido a que consideran que la deformación media de todos los puntales bajo forjado coincide con la deformación media de los puntales situados en el centro de vano. Por lo que el nuevo método simplificado descrito anteriormente presenta un mayor grado de ajuste para la construcción estudiada que los otros dos métodos simplificados.

Tabla 2.11 Comparación entre los resultados del método simplificado de Duan y Chen, los del experimental y los del método de elementos finitos. Calderón et al. (2011)

Step	Stage of construction	Level	S_{sim} (KN/m ²)	\overline{S}_{exp} (KN/m ²)	$\frac{S_{exp}}{S_{sim}}$	\overline{S}_{FEM} (KN/m ²)	$\frac{\overline{S}_{FEM}}{S_{sim}}$
1	Casting level 1	1	5.64	5.64	1.00	5.52	0.98
2	Clearing level 1	1	4.51	3.07	0.68	3.41	0.76
3	Casting level 2	2	5.64	5.60	0.99	5.80	1.03
4	Clearing level 2	1	8.91	4.48	0.50	6.60	0.74
		2	4.40	2.91	0.66	2.90	0.66
5	Striking level 1	1	7.90	3.86	0.49	5.33	0.68
		2	0.79	1.57	1.99	1.39	1.76
6	Casting level 3	3	5.64	5.50	0.98	5.80	1.03
7	Clearing level 3	2	3.33	3.07	0.92	3.04	0.91
		3	3.27	3.12	0.95	2.77	0.85
8	Load in level 3	2	2.26	2.78	1.23	2.19	0.97
		3	6.49	4.33	0.67	5.37	0.83
9	Striking level 2	3	3.67	3.38	0.92	3.36	0.92
-	Mean	-	4.79	3.67	0.77	4.23	0.88
-	Standard deviation	-	-	-	0.91	-	0.93
-		-	-	-	0.36	-	0.26

Tabla 2.12 Comparación entre los resultados de Fang et al., los del experimental y los del método de elementos finitos. Calderón et al. (2011)

Step	Stage of construction	Level	S_{fang} (KN/m ²)	\overline{S}_{exp} (KN/m ²)	$\frac{S_{exp}}{S_{fang}}$	\overline{S}_{FEM} (KN/m ²)	$\frac{\overline{S}_{FEM}}{S_{fang}}$
1	Casting level 1	1	5.64	5.64	1.00	5.52	0.98
2	Clearing level 1	1	4.62	3.07	0.66	3.41	0.74
3	Casting level 2	2	5.64	5.60	0.99	5.80	1.03
4	Clearing level 2	1	8.97	4.48	0.50	6.60	0.74
		2	3.84	2.91	0.76	2.90	0.76
5	Striking level 1	1	7.50	3.86	0.51	5.33	0.71
		2	0.68	1.57	2.32	1.39	2.05
6	Casting level 3	3	5.64	5.50	0.98	5.80	1.03
7	Clearing level 3	2	3.21	3.07	0.95	3.04	0.95
		3	3.27	3.12	0.95	2.77	0.85
8	Load in level 3	2	2.14	2.78	1.30	2.19	1.02
		3	6.43	4.33	0.67	5.37	0.84
9	Striking level 2	3	3.55	3.38	0.95	3.36	0.95
-	Mean	-	4.96	3.67	0.74	4.23	0.85
-	Standard deviation	-	-	-	0.95	-	0.96
-		-	-	-	0.43	-	0.32

2.3.12 Estudio realizado por Gasch et al (2012)

Para poder evaluar la transmisión de cargas entre forjados y puntales, durante la construcción de edificios de hormigón armado de plantas sucesivas, se llevó a cabo un estudio experimental en tres obras reales mediante la instrumentación de un número determinado de puntales. Las tres obras estudiadas abarcan las distintas tipologías de forjados más comunes en edificación, y en todas ellas se adoptó un proceso constructivo de cimbrado, clareado y descimbrado. El estudio experimental ha evidenciado que la transmisión de cargas entre forjados y puntales es diferente según el vano analizado. Esto se debe a que las condiciones de contorno y geometría del vano hacen particular la deformabilidad y/o la rigidez de cada uno de los vanos del forjado.

En otra fase de la investigación, se calibró un modelo numérico basado en el desarrollado por Alvarado et al (2009), ajustándolo a las diferentes tipologías estructurales, y de las cuales se conoce su comportamiento experimental a través de las medidas de cargas en puntales y temperaturas tomadas en obra. Los resultados obtenidos de los modelos numéricos se ajustaron a las mediciones experimentales.

Por último se comprobó el ajuste de varios de los métodos simplificados expuestos anteriormente, a partir de los resultados numéricos y experimentales obtenidos, que permitieron, mediante coeficientes

de carga, evaluar la transmisión de cargas durante el proceso de cimbrado, clareado y descimbrado de edificios con forjados consecutivos de hormigón in situ. El método que mejor grado de ajuste presenta, tanto con las medidas experimentales como con los modelos numéricos, fue el *Nuevo Procedimiento Simplificado* (Calderón et al., 2011).

Por otro lado, un efecto poco estudiado es el que tienen los cambios de temperatura ambiente en la distribución de cargas entre forjados y puntales, pese a que algunos autores han registrado lo importante de su influencia. Es por ello que otro de los objetivos principales del estudio fue conocer las variaciones de temperatura de los diferentes elementos de la estructura durante su construcción y determinar su influencia en la variación de carga en los puntales y forjados.

Para evaluar el efecto que tiene la variación de la temperatura ambiente en los diferentes elementos de la estructura durante su construcción, se desarrolló un estudio experimental donde se midió tanto la evolución de la temperatura ambiente como las variaciones de temperatura que se producían en el espesor de los forjados, observando la magnitud e importancia de los gradientes de temperatura en el forjado.

Posteriormente, mediante el desarrollo de un modelo teórico de elementos finitos, se realizó una aproximación numérica al efecto que producen los cambios de temperatura en la transmisión de cargas entre forjados y puntales. Los resultados que se obtuvieron del modelo numérico de temperaturas muestran la importancia de las variaciones de temperatura en las cargas de puntales y forjados durante la construcción de edificios. Estos cambios en las cargas son producto de la combinación de dos efectos principales: los cambios de temperatura en los pilares y los puntales y la diferencia de temperatura entre las caras superior e inferior de los forjados.

2.4 Estimación del plazo de descimbrado

La determinación del plazo de descimbrado, depende fundamentalmente del momento en el que el hormigón es capaz de resistir los esfuerzos a los cuales va a estar sometido durante el proceso de construcción. El desarrollo de las resistencias mecánicas a corto plazo, para un hormigón determinado, dependen fundamentalmente de la composición de la mezcla y de la temperatura.

En el presente apartado se recogen algunos métodos que permiten determinar la resistencia necesaria del hormigón de los forjados para soportar las cargas que se presentan durante su construcción. Dentro de estos métodos se recogen también las recomendaciones para determinar los plazos de descimbrado incluidas en normativas de carácter nacional e internacional.

2.4.1 Condición de descimbrado

Calavera (1981) ya mencionó que establecer un juicio sobre la edad de descimbrado supone verificar que, bajo las acciones aplicadas en ese momento, los esfuerzos que aparecen pueden ser resistidos con seguridad suficiente con la resistencia que el hormigón presenta a esa edad.

Así, queda claro que para establecer la edad de descimbrado de un forjado es necesario establecer una serie de condicionantes, de tal forma que la estructura no vea afectada sus características de servicio. A continuación se recogen las propuestas de algunos autores que establecen condicionantes para realizar el proceso de descimbrado.

2.4.1.1 Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986)

El método propuesto por Calavera fue publicado por primera vez en 1981, como fruto de un extenso estudio que posteriormente sería validado experimentalmente por Fernández Gómez (1986) en el desarrollo de su Tesis Doctoral. Este método no es solo válido para forjados, siendo también aplicable para piezas de hormigón sometidas a flexión.

En la Tabla 2.13 se relacionan en función de la relación $\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$ del hormigón a compresión, la evolución de las resistencias a corte y punzonamiento, tracción y flexión, según las leyes teóricas establecidas por la EHE.

Tabla 2.13 Relación de resistencias en función de la resistencia a compresión del hormigón (Considerando la relación pésima, que se obtiene para el hormigón de menor resistencia para edificación según la EHE, $f_{ck} = 25$ MPa.)

Relación a Compresión $\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$	Tracción, Adherencia y Rasante $\sqrt[3]{\left(\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}\right)^2}$	Corte y Punzonamiento $\left(\sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}}\right)^{\frac{1}{3}}$	Flexión		Deformaciones $\left(\frac{f_{c,j} + 8}{f_{c,28} + 8}\right)^{\frac{1}{3}}$
			Cuantía Baja	Cuantía Alta	
0	0	0	0	0	-
0.25	0.40	0.63	0.81	-	0.75
0.50	0.63	0.79	0.94	0.85	0.85
0.75	0.83	0.91	0.99	0.88	0.93
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

De la Tabla 2.13 se concluye que la evolución de resistencia que resulta crítica es la de la resistencia a tracción del hormigón. De igual forma también se observa como la evolución del módulo de deformación (inversamente proporcional a las deformaciones), es mucho más rápida que la resistencia a tracción, por lo cual, este último criterio resulta ser más restrictivo. Por este motivo, la mayoría de autores adoptan la resistencia a tracción como condicionante del proceso de descimbrado.

De esta forma, si la carga actuante sobre un forjado al descimbrar es αp siendo p la carga total característica del proyecto, (peso propio más cargas permanentes más sobrecargas), el forjado podrá ser descimbrado cuando el hormigón del propio forjado, presente una resistencia a tracción pura $f_{ckt,j}$ tal que:

$$f_{ckt,j} \geq \alpha \cdot f_{ckt,28} \quad (2.33)$$

Considerando que se trata de una etapa transitoria, la EHE (1998) permitía que el factor de mayoración de acciones durante la etapa de construcción (γ'_{fg}), pudiera reducirse, no siendo menor a

1.25. Sin embargo, la actual EHE-08 no permite ninguna reducción del factor de mayoración de acciones. De la misma forma, en ninguna de las dos normativas se propone un valor del coeficiente de mayoración de acciones durante la construcción que sea inferior al considerado en servicio. Sin embargo parece lógico que éste dependa del nivel de control. De esta forma Calavera (2002) propone los siguientes valores dependientes del nivel de control:

$\gamma'_{fg} = 1.30$ para obras con control de ejecución intenso.

$\gamma'_{fg} = 1.35$ para obras con control de ejecución normal.

$\gamma'_{fg} = 1.40$ para obras con control de ejecución reducido.

Así la ecuación (2.33) queda de la siguiente forma:

$$f_{ckt,j} \geq \alpha \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \cdot f_{ckt,28} \quad (2.34)$$

donde, $f_{ckt,j}$ es la resistencia a tracción del hormigón a los j días, $f_{ckt,28}$ la resistencia a tracción del hormigón a los 28 días, α la relación entre la carga característica de construcción y la carga característica del forjado, γ'_{fg} el coeficiente de mayoración de acciones de la etapa de construcción y γ_{fg} el coeficiente de mayoración de acciones definido en la normativa.

Si la ecuación 2.34 se cumple para todos los forjados en todas las operaciones constructivas, solo faltaría establecer a qué edad el hormigón alcanza el valor de resistencia necesario para realizar el proceso de descimbrado.

2.4.1.2 Método propuesto por Marí (1995)

Partiendo de un amplio estudio experimental desarrollado por Serrà (1994), en vigas descimbradas a edades cortas, Marí (1995) estableció una serie de hipótesis como punto de partida para el desarrollo de una metodología para el cálculo del plazo de descimbrado en estructuras de hormigón solicitadas a flexión. Dichas hipótesis de partida son las siguientes:

- ✓ Los modelos propuestos por las diferentes normativas europeas para el cálculo de flexión y cortante de una pieza de hormigón son adecuados para predecir el comportamiento de dicha pieza a edades jóvenes. Se consideran las características mecánicas del hormigón correspondientes a la edad de descimbrado.
- ✓ La adherencia entre el hormigón y el acero, para edades habituales de descimbrado, es suficiente para considerar los mecanismos propios del hormigón armado.
- ✓ La deformabilidad diferida resulta ser el factor más condicionante, por tanto el que requiere de un mayor control.

A partir de estas hipótesis, Marí (1995) desarrolla una metodología que consiste en determinar, para cada uno de los estados límites, que características mecánicas debe tener el hormigón para satisfacer dicho estado límite. Verificando esto, tanto para el instante del descimbrado como para la vida útil de la estructura.

La Tabla 2.14 muestra las fórmulas propuestas por Marí, derivadas de la satisfacción de los estados límite de flexión, cortante, adherencia, anclaje, fisuración y deformabilidad. En estas intervienen parámetros como la geometría, armado y nivel de cargas en construcción.

Considerando cada una de las expresiones de la Tabla 2.14, y empleando una metodología para establecer la evolución de las propiedades del hormigón en el tiempo, la metodología propuesta por Marí (1995) permite estimar los plazos de descimbrado de vigas y forjados de hormigón sin perjudicar la seguridad, funcionalidad y durabilidad de la estructura.

Tabla 2.14 Criterios para establecer los plazos de descimbrado propuestos por Marí

Estado límite	Condición a cumplir
Flexión	$f_{c,j} \geq 1500 \cdot (\rho - \rho')$
Cortante	$f_{c,j} \geq 5 \cdot \frac{A_{st} \cdot f_{td}}{b}$
Adherencia	$f_{c,j} \geq k \cdot \left(\frac{A_{st} \cdot f_{td}}{n \cdot \pi \cdot \phi_1} \right)^{\frac{3}{2}}$
Anclaje	$f_{c,j} \geq f_{c,28} \cdot \left(\frac{G}{G+Q} \right)^{\frac{3}{2}}$
Deformabilidad	$E_{c,j} \geq E_{c,28} \cdot f(j) \cdot \frac{a_{28}}{a_{adm}}$
Fisuración	$f_{c,j} \geq f_{c,28} \cdot \frac{G}{G+Q}$

2.4.1.3 Método por comprobación de coeficientes de carga

El método consiste en la verificación de los forjados valiéndose en el diseño clásico mediante cargas y resistencias factorizadas (LRFD, Load a Resistance Factored Design).

Considerando las cargas muertas y las sobrecargas actuantes en un forjado, los requisitos de resistencia del hormigón para satisfacer el estado de servicio se pueden determinar mediante:

$$R_n = \frac{\gamma_D \cdot D_s + \gamma_L \cdot L_s}{\phi_s} \quad (2.35)$$

siendo, γ_D y γ_L los factores de mayoración de cargas muertas y sobrecargas respectivamente, ϕ_s el coeficiente de reducción de resistencia del hormigón para el estado de servicio, D_s y L_s las cargas muertas y sobrecargas de diseño y R_n la resistencia nominal del hormigón del forjado.

Asumiendo que el factor reductor de resistencia del hormigón es similar para los estados de servicio y de construcción, la resistencia de diseño U_n de una losa de hormigón a edades tempranas se puede expresar como:

$$U_n = \phi_c \cdot \beta \cdot R_n = \beta(\gamma_D \cdot D_s + \gamma_L \cdot L_s) \quad (2.36)$$

donde, β es el factor reductor de la resistencia del hormigón asociado a una edad temprana.

Finalmente debe comprobarse que las solicitaciones de carga son menores a las capacidades resistentes de la losa de hormigón:

$$\gamma'_{fg} \cdot C_t \leq U_n \quad (2.37)$$

siendo, γ'_{fg} el factor de mayoración de cargas de construcción, y C_t la carga actuante calculada para el forjado durante el proceso constructivo, que dependerá del modelo de cálculo empleado para estimar la distribución de cargas entre puntales y forjados.

Así, reemplazando la ecuación 2.36 tenemos la siguiente expresión que permite verificar si el proceso constructivo empleado es adecuado para cada uno de los forjados de la estructura analizada:

$$C_t \leq \beta \cdot \frac{(\gamma_D \cdot D_s + \gamma_L \cdot L_s)}{\gamma'_{fg}} \quad (2.38)$$

Mosallam y Chen (1990) modificaron la Ec. (2.38), adoptando los factores de mayoración de cargas recomendados por los códigos de edificación americanos: $\gamma_D = 1.40$ y $\gamma_L = 1.70$ (norma ACI Committee 318 1983), y $\gamma'_{fg} = 1.30$ para las cargas de construcción propuesto en la norma de la ANSI A10.9 (1983). También proponen el uso del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) para estimar las transmisión de cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo, pero amplificando las cargas por un factor de 1.10 debido a la imprecisión del método. Así, la Ec. 2.38 se simplifica en:

$$C_t \leq \beta \cdot (1.40 \cdot D_s + 1.70 \cdot L_s) \quad (2.39)$$

Duan y Chen (1996), a diferencia de Mosallam y Chen (1990) proponen no mayorar las cargas de construcción, puesto que para el cálculo de C_t se trabaja con acciones mayoradas. También proponen el uso del método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) para estimar la distribución de cargas en puntales y forjados, dependiendo del valor de la relación entre la rigidez de la losa y la de la cimbra. Así la expresión propuesta por Duan y Chen (1996) es la siguiente:

$$C_t \leq \beta \cdot (1.00 \cdot D_s + 1.20 \cdot L_s) \quad (2.40)$$

Mediante la validación de estas expresiones se puede determinar si el proceso constructivo diseñado es adecuado para todos los forjados y para todas las fases de la construcción de la estructura.

2.4.2 Estimación del plazo de descimbrado

Una vez establecido el condicionante para realizar la operación de descimbrado, que en todos los casos viene condicionado por el desarrollo de las propiedades del hormigón en el tiempo, haría falta determinar la evolución de dichas propiedades.

A continuación se analizarán cuatro metodologías para determinar la evolución de las propiedades del hormigón, considerándolas como válidas para los tipos de materiales empleados en España en la actualidad.

2.4.2.1 Método mediante el ensayo de probetas de hormigón

Este método consiste en controlar el desarrollo de las propiedades del hormigón mediante el ensayo de probetas cilíndricas de 15 x 30 cm curadas en condiciones de obra. Si se aplica esta metodología al condicionante propuesto por Calavera (1981), se presenta la dificultad derivada de realizar ensayos a tracción directa. Por consiguiente, Calavera (1981) propone emplear el ensayo brasileño (o de tracción indirecta) para determinar la resistencia a tracción indirecta del hormigón, que resulta ser un ensayo de fácil ejecución en laboratorio.

Así, considerando que la resistencia a tracción pura (f_{ckt}), está relacionada con la resistencia a tracción indirecta obtenida en el ensayo brasileño (f'_{ckt}) mediante la siguiente expresión:

$$f_{ckt} = 0.85 \cdot f'_{ckt} \quad (2.41)$$

se tiene que la expresión 2.34 queda de la siguiente forma:

$$f'_{ckt,j} \geq \frac{\alpha}{0.85} \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \cdot f_{ckt,28} \quad (2.42)$$

Si se considera que la resistencia a tracción pura del hormigón ($f_{ckt,28}$) se corresponde, empleando la fórmula de la EHE-08, con la resistencia a compresión del hormigón a 28 días ($f_{ck,28}$) mediante la siguiente expresión:

$$f_{ckt,28} = 0.21 \cdot \sqrt[3]{(f_{ck,28})^2} \quad (2.43)$$

se tiene que la condición de descimbrado queda en función de la resistencia a compresión del hormigón de la siguiente forma:

$$f_{ckt,j} \geq 0.25 \cdot \alpha \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \cdot \sqrt[3]{(f_{ck,28})^2} \quad (2.44)$$

2.4.2.2 Método de las curvas de referencia

El desarrollo de curvas de evolución de las propiedades del hormigón con el tiempo a diferentes temperaturas, constituye un método para el cálculo del plazo de descimbrado. Concretamente si nos basamos en el hecho demostrado por Calavera (1981), que considera que la evolución de la resistencia crítica es la de la resistencia a tracción, autores como Klieger (1958), Gardener y Poon (1976) y Fernández (1986), han definido algunas curvas de evolución de resistencia a tracción en función de la temperatura y del tipo de cemento empleado.

Las Figuras 2.24 a 2.27 representan las curvas obtenidas por Fernández (1986) para algunos cementos españoles. La aplicación de este método tiene el inconveniente de que las curvas obtenidas por los autores anteriormente mencionados dependen del tipo de cemento utilizado e incluso del tipo de adición empleada (Perepérez 1981), circunstancia que hace necesario el suministro por parte de los

Fabricantes de cemento, de las curvas de evolución de la resistencia a tracción a diferentes temperaturas.

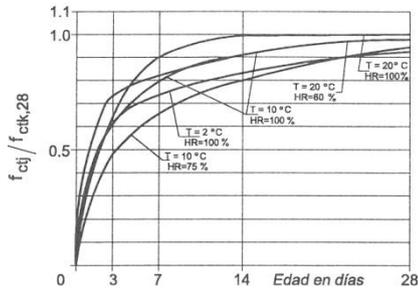


Fig. 2.24 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-450 ARI). Fernández (1986).

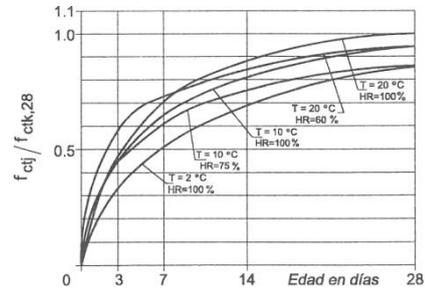


Fig. 2.25 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-350). Fernández (1986)

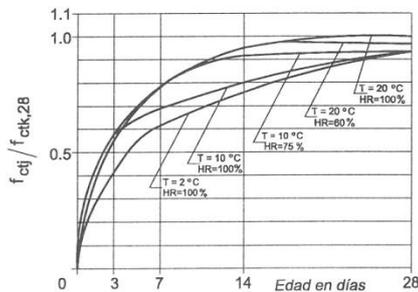


Fig. 2.26 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición escoria). Fernández (1986)

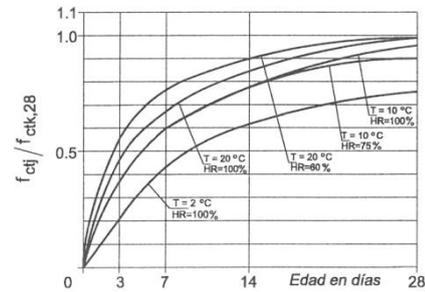


Fig. 2.27 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición puzolana). Fernández (1986)

2.4.2.3 Aplicación del método de la madurez al descimbrado de forjados de hormigón

Alvarado et al. (2005), proponen una metodología basada en el método de la madurez del hormigón y en la condición de descimbrado propuesta por Calavera (1981). La madurez es el grado de desarrollo alcanzado por una determinada propiedad de una mezcla de base de cemento, y depende de la historia de temperaturas a lo largo del proceso de curado (ASTM C 1074-98 1999).

La técnica de la madurometría permite mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo, evaluar la evolución de cualquier parámetro en tiempo real y para una temperatura dada. El concepto de madurometría está basado en el principio de tiempo equivalente, y considera una energía de activación aparente del material para estimar la resistencia real del hormigón puesto en obra.

El tiempo equivalente o edad teórica se puede definir como el número j de días (o de horas) necesario, a una temperatura de referencia T_R , para que la madurez de la mezcla se iguale a la alcanzada con temperaturas distintas a la de referencia aplicadas durante un periodo de tiempo t (ASTM 1999). Tomando como base la ley de Arrhenius (Ec. 2.45), Freiesleben Hansen y Pedersen (1977) propusieron la Ec. 2.46 de tiempo equivalente (CEB 1992).

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (2.45)$$

donde, k es la constante de velocidad (1/s para una reacción de primer orden), A la constante denominada factor de frecuencia (1/s para un reacción de primer orden), E la energía de activación (independiente de la temperatura), T la temperatura en grados kelvin y R la constante de los gases perfectos (8.3144 J°K mol).

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left(e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273+T_R} - \frac{1}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (2.46)$$

siendo, j el tiempo equivalente en días, E la energía de activación aparente (J/mol), T_R la temperatura de referencia y T_i la temperatura en el intervalo de tiempo Δt_i en grados centígrados.

Como valor de energía de activación, según propuesta del Código Modelo CEB-FIP 1990 (CEB-FIP 1993) y por el anejo B de la propuesta de modificación del Eurocódigo 2, se considera una energía aparente de activación constante e igual aproximadamente a 33258 J/mol, y una temperatura de referencia de 20°C. De esta forma el tiempo equivalente se puede expresar como:

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left(e^{\left(13.65 \cdot \frac{4000}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (2.47)$$

El campo de aplicación de este modelo se extiende entre las temperaturas de 0 °C y 60°C y con cementos con contenidos casi nulos o relativamente reducidos de adiciones (tipos CEM I y CEM II).

Según el Código Modelo CEB-FIP 1990 (CEB-FIP, 1993), simplificadaamente, se puede estimar la evolución de resistencia media a compresión f_{cm} y tracción f_{ctm} a partir de las siguientes expresiones:

$$f_{cm,j} = f_{cm,28} \cdot e^{\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{j}} \right) \right)} \quad (2.48)$$

donde, $f_{cm,j}$ es la resistencia media a compresión del hormigón a los j días, $f_{cm,28}$ la resistencia media a compresión a los 28 días y s un coeficiente que depende de la velocidad de endurecimiento del cemento ($s = 0.38$ para cementos de endurecimiento lento, $s = 0.25$ para cementos de endurecimiento normal y $s = 0.20$ para cementos de endurecimiento rápido y elevada resistencia inicial).

Para estimar la resistencia característica del hormigón, a partir de la resistencia media a compresión, el Código Modelo CEB-FIP (1990), propone la siguiente expresión:

$$f_{ck} = f_{cm} - \Delta f \quad (2.49)$$

donde, f_{ck} es la resistencia característica a compresión del hormigón, f_{cm} la resistencia media a compresión del hormigón y Δf igual a 8 MPa.

Ahora si adoptamos la condición de descimbrado propuesta por Calavera (1981) (Ec. (2.34)), faltaría por determinar la relación que existe entre el desarrollo de la resistencia a tracción del hormigón y la resistencia a compresión. Para ello, las distintas normas, como la norma española EHE-08 o EC-2 y la norteamericana ACI 318 proporcionan una relación entre la resistencia característica a tracción (f_{ckt}) y la resistencia a compresión de un hormigón (f_{ck}). Así:

$$f_{ckt} = 0.7 * f_{ctm} = 0.7 * 0.21 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (\text{EHE-08 y EC-2}) \quad (2.50)$$

$$f_{ckt} = 0.345 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (\text{ACI}) \quad (2.51)$$

Por lo tanto, conociendo las relaciones existentes y considerando la normativa de aplicación europea, la evolución de la resistencia a tracción del hormigón se puede calcular según las siguientes expresiones:

$$\text{Si } j < 28 \text{ días; } f_{ctm,j} = f_{ctm,28} \cdot e^{\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{j}}\right)\right)} \quad (2.52)$$

$$\text{Si } j \geq 28 \text{ días; } f_{ctm,j} = f_{ctm,28} \cdot \sqrt[3]{\left[e^{\left(s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{j}}\right)\right)}\right]^2} \quad (2.53)$$

Entonces, la resistencia a tracción característica en función de la edad del hormigón se puede considerar según la siguiente expresión:

$$f_{ctk,j} = 0.7 * f_{ctm,j} \quad (2.54)$$

Tras la aplicación del método de la madurez en el hormigón y la obtención del tiempo equivalente j , conocemos en este punto la evolución del hormigón a compresión y tracción en función del tiempo, parámetros fundamentales para establecer la condición de descimbrado tal y como se ha descrito. Por otra parte, además de las características mecánicas a compresión y tracción del hormigón, es necesario conocer la evolución del módulo de elasticidad del hormigón en función del tiempo para su utilización en el cálculo de la transmisión de cargas durante la construcción tal y como se ha observado en el apartado 2.3. Siguiendo con los aspectos marcados por la normativa europea es aquí donde se encuentran diferencias en el cálculo de este parámetro según las siguientes expresiones:

$$E_{cm,28} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,28}} \quad (\text{EHE-08}) \quad (2.55)$$

$$E_{cm,28} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm,28}}{10}\right)^{0.3} \quad (\text{EC-2}) \quad (2.56)$$

Conociendo los módulos de elasticidad a 28 días, se puede calcular la evolución del módulo según las siguientes expresiones:

$$E_{cm,j} = E_{cm,28} \cdot \left(\frac{f_{cm,j}}{f_{cm,28}}\right)^{0.3} \quad (\text{EHE-08 y EC-2}) \quad (2.57)$$

Así, de esta forma, según el método de la madurez ya se conocen todos los parámetros necesarios relativos a la evolución de las características del hormigón, necesarios tanto para establecer las condiciones de descimbrado como para la consideración en los modelos de cálculo. Cabe destacar que la evolución del módulo de elasticidad adoptada por el EC-2 es más rápida que la adoptada por la EHE-08, produciendo, por tanto, que en los modelos de cálculo se les esté proporcionando una mayor rigidez a los forjados en función del tiempo y, consecuentemente, éstos absorban una mayor cantidad de carga en detrimento de la carga absorbida por el sistema de apuntalamiento.

2.4.2.4 Método de Díaz (2008)

Díaz (2008) propone un método para obtener la edad de descimbrado de una pieza de hormigón armado en función de la sollicitación a la que está sometida. De esta forma genera unas curvas para sollicitaciones de flexión simple, compresión simple, esfuerzo a cortante, y anclaje de armaduras, que para diferentes temperaturas permiten establecer la edad de descimbrado.

Díaz (2008) resalta que la característica que marca el plazo de descimbrado es la resistencia a tracción y adherencia del hormigón, al igual que Calavera (1981), e igualmente resalta la necesidad de conocer las curvas de endurecimiento, a diferentes temperaturas, del hormigón empleado en obra.

La Figura 2.28 muestra para la relación $\frac{P'_d}{P_d}$ (siendo, P'_d la carga de cálculo actuante en el momento de descimbrado y P_d la carga de cálculo considerada en proyecto) la edad de descimbrado para un hormigón fabricado con cemento P 350 y curado a diferentes temperaturas (la curva de endurecimiento se corresponde con las curvas obtenidas por Fernández Gómez (1986), en relación a la evolución de la resistencia a tracción).

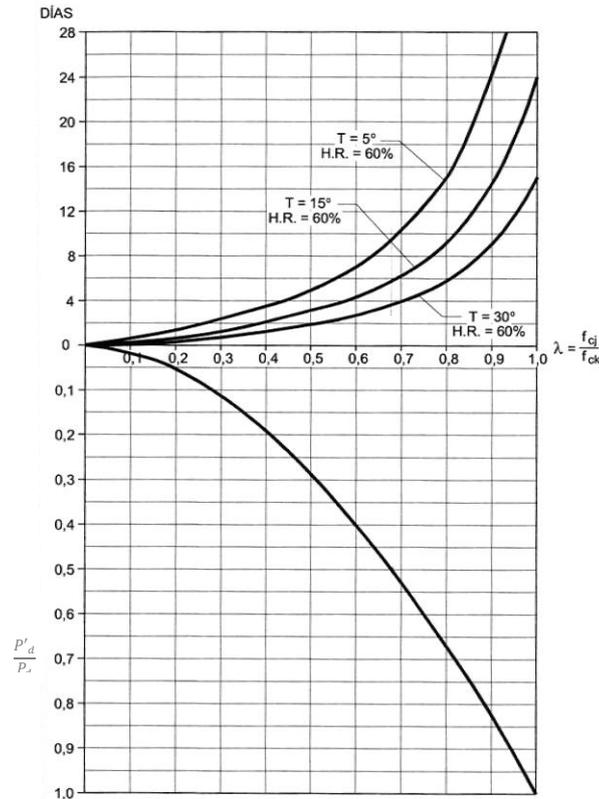


Fig. 2.28 Curva para estimar el plazo de descimbrado en función de la evolución de la resistencia a tracción Díaz (2008)

2.4.3 Recomendaciones de la normativa para estimar los plazos de descimbrado

Es de señalar que si bien los criterios generales sobre cómo y cuándo descimbrar son coincidentes en todas las normativas, no lo son tanto las recomendaciones prácticas a la hora de establecer los plazos de descimbrado. De igual modo no se definen métodos de cálculo para determinar las cargas sobre los puntales durante el proceso constructivo, siendo este uno de los resultados que más interesa a los fabricantes y que más afecta a los costes en edificación.

En el presente apartado se recogen los conceptos propuestos en diferentes normativas en lo referente a los procesos de cimbrado y descimbrado.

2.4.3.1 Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)

La instrucción española (EHE-08) contempla en su artículo 74 algunas condiciones para las operaciones de descimbrado, desencofrado y desmoldeo.

Dicho documento comenta que dichas operaciones no se realizarán hasta que el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para soportar, con suficiente seguridad y sin deformaciones excesivas, los esfuerzos a los que va a estar sometido durante y después del desencofrado, desmoldeo o descimbrado.

También recomienda que para obras de importancia y donde no se posea experiencia de casos análogos, se realicen ensayos para estimar la resistencia real del hormigón, como el ensayo de probetas cilíndricas curadas en condiciones de obra o estimando la resistencia del hormigón mediante ensayos destructivos o no destructivos directamente en la estructura.

Adicionalmente, se recomienda que para realizar el descimbrado se deben tener en cuenta por lo menos algunos de los siguientes puntos:

- ✓ El peso del hormigón, especialmente si representa la mayor parte de la carga total de proyecto.
- ✓ Las cargas impuestas como el cimbrado de elementos superiores, sobrecargas, etc.
- ✓ La secuencia de descimbrado y la posible actuación con gatos y soportes temporales.
- ✓ La necesidad de mantener determinados elementos para reducir las deformaciones dependientes del tiempo (por ejemplo, puntales intermedios) o para garantizar la estabilidad de la estructura (por ejemplo, refuerzos contra viento).
- ✓ Operaciones de tesado e inyección.
- ✓ Operaciones particulares de descimbrado, por ejemplo en las partes en ángulo entrante de los encofrados.
- ✓ Las condiciones ambientales a las que se va a ver sometido el hormigón una vez retirado el encofrado, sobre todo si éste actuaba como sistema de curado.
- ✓ Posibles exigencias de tratamientos superficiales posteriores.

De igual forma, para definir el plazo mínimo de descimbrado, es necesario verificar no solo la resistencia, sino también el módulo de deformación en los hormigones jóvenes. A título orientativo para estimar el plazo de descimbrado la EHE-08 propone la siguiente fórmula:

$$j = \frac{400}{\left(\frac{Q}{G} + 0.50\right) \cdot (T + 10)} \quad (2.58)$$

donde, j es el número de días, T la temperatura media en grados centígrados de las máximas y mínimas diarias durante los j días; G la carga que actúa sobre el elemento al descimbrar (incluido el peso propio) y Q la carga que actuará posteriormente.

Sin embargo la aplicación de esta fórmula se reduce para elementos de hormigón armado fabricados con cemento portland y en el supuesto de que el endurecimiento se haya llevado a cabo en condiciones ordinarias. Para casos donde no se dispongan suficientes datos y el cemento utilizado sea de endurecimiento normal, la EHE-08 propone los siguientes plazos dependiendo del tipo de elemento a descimbrar o desencofrar:

Tabla 2.15 Periodos mínimos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado según la EHE-08.

Temperatura superficial del hormigón (°C)	≥ 24°	16°	8°	2°
Encofrado Vertical	9 horas	12 horas	18 horas	30 horas
Losas				
Fondos de encofrado	2 días	3 días	5 días	8 días
Puntales	7 días	9 días	13 días	20 días
Vigas				

Fondos de encofrado	7 días	9 días	13 días	20 días
Puntales	10 días	13 días	18 días	28 días

2.4.3.2 Eurocódigo EC-2 (1992)

El Eurocódigo No. 2 (1992) en el apartado 6.3.2.4. (Retirada de encofrados y andamiajes), establece que los encofrados y cimbras deberán estar diseñados para resistir todas las acciones que se puedan presentar durante el proceso constructivo.

En cuanto al momento en el que se pueden retirar los encofrados y cimbras recomienda tener en cuenta los siguientes criterios:

- ✓ Tensiones que se originan en el hormigón cuando se retira el encofrado y las cimbras.
- ✓ Resistencia del hormigón en el momento de la retirada.
- ✓ Condiciones climatológicas y medidas adoptadas para proteger el hormigón una vez que el encofrado haya sido retirado.

La información general sobre el curado y retirada de encofrados se da en los apartados 10.6, 10.7 y 10.8 de la Norma ENV 206. Mencionando, en cuanto al momento de la retirada del encofrado, que el hormigón deberá haber alcanzado la suficiente resistencia para soportar las cargas a las cuales pueda verse sometido. Sin embargo, el Eurocódigo admite que la retirada del encofrado depende fundamentalmente del desarrollo de la resistencia del hormigón, y del tipo de encofrado utilizado. En ausencia de mayor precisión, recomienda los siguientes períodos mínimos:

- ✓ 2 días para las partes no cargadas en el encofrado (por ejemplo: encofrado vertical de vigas, pilares y muros).
- ✓ 5 días para el encofrado de losas hormigonadas in situ.
- ✓ 10 días para encofrados con cargas directas (por ejemplo Tablas de fondo de vigas o losas).

2.4.3.3 ACI 347 (American Concrete Institute, Guide to formwork for concrete) (2001)

El código ACI propone que, partiendo de un análisis racional, se deben considerar algunos factores para determinar el número de forjados cimbrados o recimbrados como resultado de la secuencia de construcción y también determinar las cargas transmitidas entre forjados y cimbras.

Se pueden considerar, entre otros factores, los siguientes:

- ✓ Análisis de las diferentes cargas y sobrecargas aplicadas en la estructura.
- ✓ Consideración de la carga permanente del hormigón y del sistema de encofrado.
- ✓ Sobrecargas de construcción incluyendo los trabajos que se realicen sobre el forjado y los acopios de material que se puedan presentar en éste.
- ✓ Resistencia de cálculo del hormigón.
- ✓ El ciclo de tiempo del hormigonado de los forjados sucesivos.

- ✓ Resistencia requerida del hormigón en el momento de apoyo de la cimbra para el hormigonado de forjados superiores.
- ✓ Distribución de las cargas en la estructura y en el sistema de cimbrado, en los momentos de hormigonado, descimbrado, recimbrado y desencofrado.
- ✓ Luces del forjado o de los miembros de la estructura que se encuentran cimbrados.
- ✓ Tipo del sistema de encofrado, dimensiones de los elementos de encofrado.
- ✓ Distribución individual de las cargas por puntal.
- ✓ Mínima edad del hormigón para resistir las cargas de construcción y de cimbras para el hormigonado de forjados superiores.

En cuanto al proceso de ejecución de los procesos de cimbrado y descimbrado hace un especial énfasis en las precauciones de seguridad, en el cimbrado y descimbrado de la estructura, y en el cimbrado y recimbrado de forjados consecutivos que pueden consultarse en la misma normativa.

Haciendo referencia a la transmisión de cargas durante el proceso constructivo, el código ACI propone el cimbrado y recimbrado como operaciones para la transmisión de cargas entre forjados recientemente hormigonados. Cada uno de los niveles de recimbrado solo recibe la carga del forjado recién hormigonado y las posibles cargas de construcción que se presenten. Algunas de las ventajas del recimbrado son:

- ✓ La totalidad del sistema de encofrado puede ser retirado en un pequeño período de tiempo y ser desplazado a otra área de trabajo.
- ✓ Los puntales solo asumen las cargas de construcción debido a que los forjados son capaces de asumir su peso propio.
- ✓ La combinación de sistemas de cimbrado y recimbrado suele dar como resultado un menor número de plantas apuntaladas lo que permite adelantos de trabajos en las plantas inferiores.

2.4.3.4 Código modelo CEB-FIP 1990 (1995)

Destaca que las cimbras y encofrados se mantendrán hasta que el hormigón posea la resistencia suficiente para soportar las tensiones y deformaciones a las que pueda estar sometido (con un margen aceptable de seguridad). Algunos aspectos a tener en cuenta según este código son:

- ✓ El peso de hormigón.
- ✓ Las cargas impuestas; por ejemplo, el cimbrado de plantas sucesivas.
- ✓ Secuencia de descimbrado, posible actuación temporal con gatos y soportes temporales.
- ✓ Necesidad de mantener determinados elementos para reducir las deformaciones dependientes del tiempo (por ejemplo, puntales auxiliares), o para garantizar la estabilidad de la estructura (por ejemplo, refuerzos contra viento)
- ✓ Operaciones de tesado e inyección.
- ✓ Operaciones particulares de descimbrado.
- ✓ Condiciones ambientales y posibles medidas para proteger el hormigón una vez retirado el encofrado.

En cuanto a la edad mínima de descimbrado, el código propone tener en cuenta varios factores, tales como la evolución de resistencias, el curado, la deformabilidad o la porción de carga permanente.

El código modelo recomienda, en caso de empleo de cemento de endurecimiento normal para estructuras de hormigón armado, los períodos de descimbrado de la Tabla 2.16.

Tabla 2.16 Períodos mínimos de descimbrado, recomendados por el Código modelo

Temperatura superficial del hormigón (°C)	≥ 24°	16°	8°	2°
Encofrado Vertical	9 horas	12 horas	18 horas	30 horas
Losas				
Fondos de encofrado	3 días	4 días	6 días	10 días
Puntales	7 días	10 días	15 días	25 días
Vigas				
Fondos de encofrado	7 días	10 días	15 días	25 días
Puntales	10 días	14 días	21 días	36 días

2.5 Técnicas de diseño óptimo habitualmente utilizadas en ingeniería

La metodología habitual del establecimiento del proceso constructivo de edificios en altura se basa, en gran medida, en la experiencia y la pericia que pueda tener el técnico autor del proyecto y en la aplicación, si cabe, de algunos de los métodos simplificados de cálculo apuntados anteriormente. Aún así, no todos los métodos simplificados de cálculo son sencillos de aplicar, sobre todo aquellos que aparecen a partir del modelo simplificado de Duan y Chen (1995) para los que es necesario emplear y programar el método en hojas de cálculo complejas y realizar hipótesis de cálculo adicionales a las consideradas en el propio método. Por todo ello, habitualmente se recurre a establecer un proceso constructivo de cimbrado/descimbrado basado en la experiencia y/o en métodos simplificados de cálculo más sencillos, y por lo tanto, menos precisos, como lo son el de Grundy y Kabaila (1963) o el de Mosallam y Chen (1991). Adicionalmente es necesario establecer alguno de los criterios de descimbrado para asegurar que las cargas calculadas a partir de los modelos simplificados no se ven superadas al realizar alguna de las operaciones constructivas, ya que el hormigón de los forjados es un material evolutivo en el tiempo. Por lo tanto, la experiencia del proyectista tiene una gran influencia en la calidad del resultado final y en el tiempo empleado para obtenerlo, al existir múltiples soluciones para un mismo problema.

Frente a la multiplicidad de soluciones, diversos autores en el campo de la ingeniería, y más concretamente en el campo de las estructuras, como Balling (1991), Tzan et al (2000), Ceracnic (2001), Camp et al (2003), Adeli et al (2006), Payá (2007) y Alcalá (2009), han planteado la obtención de una estructura óptima, entendiendo como tal aquella para la que una función - llamada **función objetivo** - adopta su valor más adecuado/óptimo. La función objetivo ha representado varios conceptos como pueden ser el peso de la estructura, el coste económico o el plazo de ejecución. Además, la sociedad demanda cada vez más que un diseño, además de la economía, considere aspectos como su sostenibilidad ambiental.

Para plantear un problema de optimización en la ingeniería estructural es necesario que, además de las funciones objetivo, se definan:

- 1) Unos **parámetros** o elementos de valor constante y que, por tanto, no varían a lo largo del proceso de optimización.
- 2) Unas **variables de diseño** o elementos cuyo valor es susceptible de ser modificado a lo largo del proceso de optimización. Los diferentes valores que pueden adoptar las variables de diseño para unos parámetros dados, definen un conjunto denominado **espacio de soluciones**.
- 3) Unas **restricciones** o **condiciones de comportamiento y de diseño** cuyo cumplimiento es imprescindible para que una solución del problema pueda considerarse realmente como tal porque:
 - a) Cumple las condiciones de seguridad, nivel de servicio y durabilidad que establece la normativa vigente.
 - b) Tiene un sentido físico o geométrico. El cumplimiento de las distintas condiciones de descimbrado, son ejemplos de restricciones del problema.Los diseños que cumplen todas las restricciones reciben el nombre de **soluciones factibles**.

Adicionalmente, el problema de optimización puede ser **monoobjetivo** cuando la función objetivo solo se centra en optimizar una única componente y **multiobjetivo** en caso contrario. En esta situación, las funciones objetivo suelen estar en conflicto unas con otras, por lo que el término “optimizar” quiere decir encontrar una solución de compromiso que proporcione los mejores valores de todos los objetivos, que hagan a la solución global la mejor de todas las posibles soluciones.

2.5.1 Técnicas de diseño óptimo

Las metodologías que pueden emplearse para resolver un problema de optimización pueden clasificarse en dos grandes grupos, Yepes (2002) y Payá (2007):

- **Técnicas exactas** o métodos que proporcionan la solución óptima del problema.
- **Técnicas heurísticas y metaheurísticas** o métodos aproximados que proporcionan una buena solución del problema aunque no tiene por qué ser la óptima. A este grupo pertenecen técnicas como los Algoritmos de Saltos Múltiples Aleatorios, los de Gradiente, la Cristalización Simulada o Aceptación por Umbrales, los Genéticos, la Búsqueda Tabú y las Colonias de Hormigas. Se trata de algoritmos sencillos e intuitivos, pero que requieren un gran esfuerzo computacional pues precisan que la función objetivo y las restricciones del problema sean evaluadas un gran número de veces. Sin embargo, la búsqueda de la solución óptima se realiza, en la mayoría de los algoritmos (salvo en el de saltos múltiples aleatorios) de forma eficiente. Estas estrategias, que son las habitualmente empleadas pero no las únicas, se describen brevemente a continuación.

2.5.2 Técnicas aproximadas empleadas en la optimización monoobjetivo

Una forma de resolver los problemas de optimización es realizar una búsqueda exhaustiva en el espacio de soluciones: se evalúa la función objetivo para todos los valores posibles de las variables de diseño y se elige posteriormente la solución factible con mejor valor de la función objetivo. Sin

embargo, este procedimiento es inviable a partir de un determinado número de posibles valores para las variables del problema, llegando a necesitar tiempos muy elevados (Payá, 2007) para la resolución de un problema. Como se verá en este trabajo final de máster, se planteará la resolución exhaustiva del espacio de soluciones observando el tiempo de computación y de la posibilidad de seguir este procedimiento exclusivamente para determinados casos en donde el número de variables es reducido.

Ante esta dificultad surgen estrategias de búsqueda de óptimos, las heurísticas y las metaheurísticas, que no precisan de la evaluación de todo el espacio de soluciones y proporcionan soluciones satisfactorias a los problemas de optimización dedicando un esfuerzo de cálculo razonable.

Las principales razones para emplear estas técnicas de optimización son:

- Pueden formar parte de procedimientos globales que garanticen la obtención del óptimo del problema, bien porque proporcionan una buena solución de partida a partir de la que el proyectista puede modificar reducidamente para encontrar el óptimo global, bien porque participan en un paso intermedio del algoritmo de búsqueda del óptimo global.
- Se tratan, en general, de métodos muy intuitivos y, por lo tanto, fáciles de comprender.
- Son más flexibles que los métodos exactos, permitiendo la incorporación de condiciones de difícil modelización.

Por el contrario, su principal limitación estriba en que normalmente no garantizan el hallazgo del óptimo global y, en algunos casos, tampoco proporcionan una medida de lo cerca que se encuentra una solución factible particular del óptimo global.

Yepes (2002) agrupó las técnicas metaheurísticas en tres grandes conjuntos: Búsqueda Secuencial por Entornos, Redes Neuronales y Algoritmos Evolutivos. Se describen, a continuación de forma sucinta, estos tres grupos. La explicación es de carácter general y no centrada en la ingeniería estructural. Por ello, no se hacen consideraciones respecto a la factibilidad de la solución que son de aplicación únicamente a los problemas de optimización con restricciones y en función de cada caso concreto. Estos aspectos se examinan con detalle en el documento cuando se aplican los algoritmos de optimización al problema concreto tratado. Además, se supone que se desea minimizar la función objetivo f , claro ejemplo de una función objetivo como puede ser el coste económico. En caso de buscar su maximización bastaría hacer el cambio $z=-f$.

2.5.2.1 Algoritmos que realizan la búsqueda de forma aleatoria

Una primera aproximación para resolver cualquier problema de optimización consiste en seleccionar aleatoriamente un conjunto más o menos extenso de soluciones eligiendo posteriormente la solución factible de menor coste o más óptimo en base a la función objetivo.

Esta estrategia, llamada Estrategia de Saltos Múltiples Aleatorios, presenta varios inconvenientes claros:

- 1) La obtención de una solución de calidad requiere la realización de un inventario exhaustivo del conjunto de soluciones, lo que, en general, resulta inaceptable por crecer exponencialmente el número de soluciones con la dimensión del problema.

- 2) Al obtenerse cada solución de forma totalmente independiente y aleatoria de las demás, no se aprovecha la información del espacio de soluciones generada durante el proceso, por lo que no se realiza una búsqueda inteligente de la solución.
- 3) En caso de no limitar los intervalos de variación de las variables y , en función de las características del problema, el número de soluciones factibles respecto del total planteadas puede llegar a ser muy reducido. Esto introduce una dificultad añadida en la obtención de soluciones de calidad.

A pesar de estos puntos débiles es interesante aplicar esta estrategia porque:

- 1) Proporciona diseños que se emplean como solución inicial en la aplicación de otras técnicas de optimización heurística o que pueden ser utilizados como punto de partida para ser mejorados por el calculista autor del proyecto.
- 2) Explora diferentes regiones del espacio de soluciones. Esto permite a las metaheurísticas que la emplean como método para conseguir soluciones iniciales a) aumentar su capacidad para encontrar soluciones iniciales diversas y b) valorar la dependencia del resultado de su aplicación de la solución inicial o del conjunto de soluciones iniciales.
- 3) Permite valorar el total de soluciones factibles respecto del número total exploradas.
- 4) Aunque probablemente sea muy difícil encontrar una solución más óptima que a través de la aplicación de otros algoritmos, siempre cabe la posibilidad que de forma totalmente aleatoria y con algo de fortuna, se encuentre el óptimo global al evaluar esta solución.

2.5.2.2 Algoritmos que realizan la búsqueda secuencial por entornos

Estos métodos parten de una solución inicial S_0 a partir de la cual se obtiene una nueva S_1 modificando en una pequeña magnitud el valor de una o varias de las variables que la definen. S_1 es evaluada y, si se cumple un criterio de aceptación, se adopta como nueva solución inicial (actualización de la solución). El mecanismo que permite transformar una solución en otra ligeramente diferente recibe el nombre de **movimiento**. Al conjunto de soluciones a las que se puede llegar aplicando un movimiento a una solución determinada se le conoce como **entorno** de esa solución.

En estas técnicas es fundamental que los movimientos sean pequeños. De este modo no se pierden las características positivas de la solución de partida, sino que su calidad se mejora de forma gradual y progresiva. Estas heurísticas presentan dos debilidades: a) la obtención de un óptimo local se consigue tras un ajuste delicado de los parámetros que definen la búsqueda y b) precisan de un elevado esfuerzo computacional.

Se describen seguidamente las heurísticas de esta familia más empleadas en la optimización estructural.

Métodos que realizan una aceptación de la solución sin admitir peores soluciones

Una manera de explorar el espacio de soluciones consiste en buscar en el entorno de la solución de partida otra solución que la mejore. En caso de buscar mínimos, este proceso repetido sucesivas veces puede asimilarse a realizar un recorrido por el espacio de soluciones en trayectorias descendentes, es

decir, de gradiente negativo (como ilustra la Fig. 2.29). Por ello, a este tipo de técnicas se las denomina de búsqueda por **gradiente**.

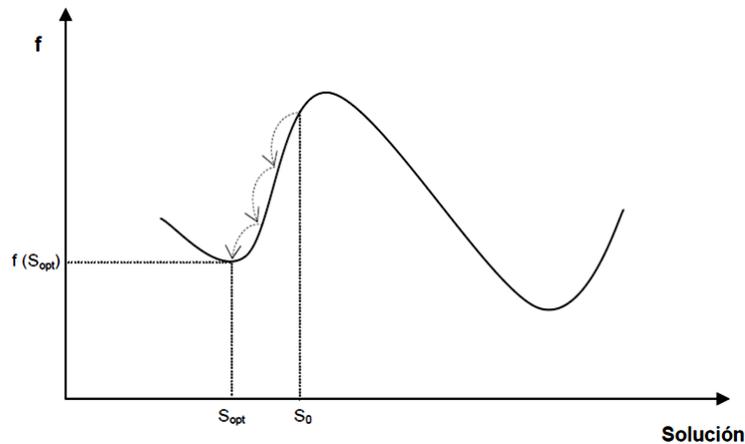


Fig. 2.29 Recorrido por el espacio de soluciones en una búsqueda por gradiente (Payá 2007)

En esta estrategia la solución inicial es mejorada a medida que avanza el proceso hasta que no es posible mejorarla más. El algoritmo se puede describir del modo siguiente:

- 1) Generar una solución inicial S_0 .
- 2) Mientras no se cumpla un criterio de parada:
 - a) Aplicar un movimiento a S_0 para obtener una nueva solución S_1 .
 - b) Si S_1 mejora a S_0 la reemplaza como solución actual: $S_0 = S_1$.
 - c) Volver al paso a).

Se plantean dos opciones posibles para elegir, a través de movimientos, una nueva solución:

- 1) El criterio del **“descenso aleatorio”**. En este caso se selecciona al azar una solución que mejora a la actual, pudiéndose elegir la primera mejora en la exploración del entorno (criterio First Best) o bien la mejor de un conjunto de soluciones.
- 2) El criterio del **“mayor descenso”** (criterio Global Best). La nueva solución en este caso es la que produce la mayor mejora de la solución actual tras una exploración exhaustiva de su entorno.

Algunas investigaciones muestran que el criterio "Global Best" no siempre conduce a las mejores soluciones finales, pues el proceso puede encajonarse en mínimos locales próximos a la solución inicial. En efecto, el ejemplo de la Fig. 2.30, muestra como, partiendo de una solución S_0 , un criterio de elección de soluciones del tipo "Global Best" puede conducir a soluciones de menor calidad que un criterio "First Best".

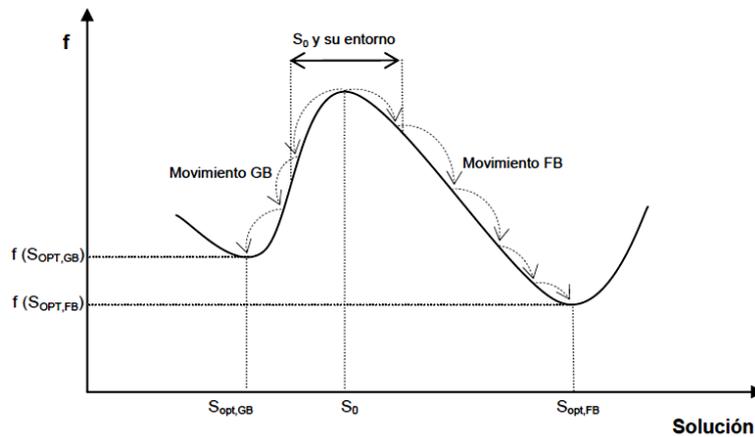


Fig. 2.30 Comparación entre los resultados obtenidos empleando un criterio "First Best" y uno "Global Best" en un espacio de soluciones (Payá 2007)

Métodos que realizan una aceptación de la solución admitiendo peores soluciones de forma acotada

Los métodos de gradiente anteriormente descritos aceptan una nueva solución sólo si mejora a la actual. Este criterio puede conducir al encajonamiento prematuro de una solución en un óptimo local (véase la Fig. 2.31). Para evitarlo, se han desarrollado otro grupo de heurísticas que permiten una degradación acotada de la solución, es decir, permiten que una nueva solución sustituya a la actual aunque la empeore. Para ello, un criterio de aceptación debe satisfacerse y sus características definen diferentes tipos de heurísticas. En la Cristalización Simulada o Simulated Annealing -SA- es de tipo probabilista y en la Aceptación por Umbrales o Threshold Accepting -TA- es determinista.

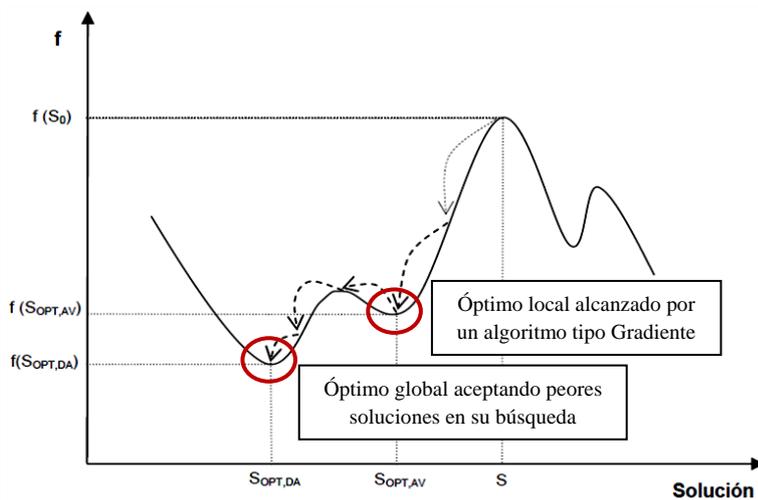


Fig. 2.31 Comparación entre la solución óptima alcanzable mediante una estrategia que no admite peores soluciones y una que sí lo hace (Payá 2007)

SA es una estrategia propuesta por Kirpatrick, Gelatt y Vecchi (1983) a partir de los trabajos de Mecánica Estadística de Metrópolis et al. (1953). Se basa en establecer una analogía entre la energía de un sistema termodinámico y la función objetivo f de un problema de optimización. En ambos casos se trata de evolucionar de un estado a otro de menor energía, o valor de f , a través de un parámetro

denominado temperatura (T). Lundy y Mees (1986) han demostrado que, con independencia de la solución inicial, el algoritmo converge estadísticamente a la solución óptima aunque puede precisar un tiempo infinito para ello.

El algoritmo SA sigue los pasos siguientes:

1. Genera una solución inicial S_0 y elige una temperatura inicial, $T > 0$.
2. Mientras no se cumpla un criterio de parada:
 - a) Aplicar un movimiento a S_0 para obtener una nueva solución S_1
 - b) Si S_1 mejora a S_0 , la reemplaza como solución actual ($S_0 = S_1$). En caso contrario, S_1 reemplaza a S_0 con una probabilidad que viene dada por el factor de Boltzmann:

$$p = \frac{1}{e^{\Delta/T}}, \text{ si } \Delta > 0 \quad \text{Donde: } \Delta = |f(S_1) - f(S_2)|$$

Para aplicar la probabilidad expresada por la ecuación, se genera un número aleatorio en el intervalo (0,1) con una distribución uniforme de probabilidad. Si el número generado es inferior al valor obtenido en la ecuación entonces la nueva solución es aceptada.

- c) Transcurrido un número predefinido de iteraciones, llamado Cadena de Markov, se reduce la Temperatura T .
- d) Volver al paso a).

Se destaca que la forma de la ecuación hace que la probabilidad de aceptar soluciones de menor calidad disminuye conforme avanza el proceso de optimización (véase la Fig. 2.32). En ella se observa como, por ejemplo, un empeoramiento de f de 2 unidades tiene una probabilidad de ser aceptado de 0.905 si la temperatura del proceso es de 20 y de tan sólo 0.018 si la temperatura es de 0.50.

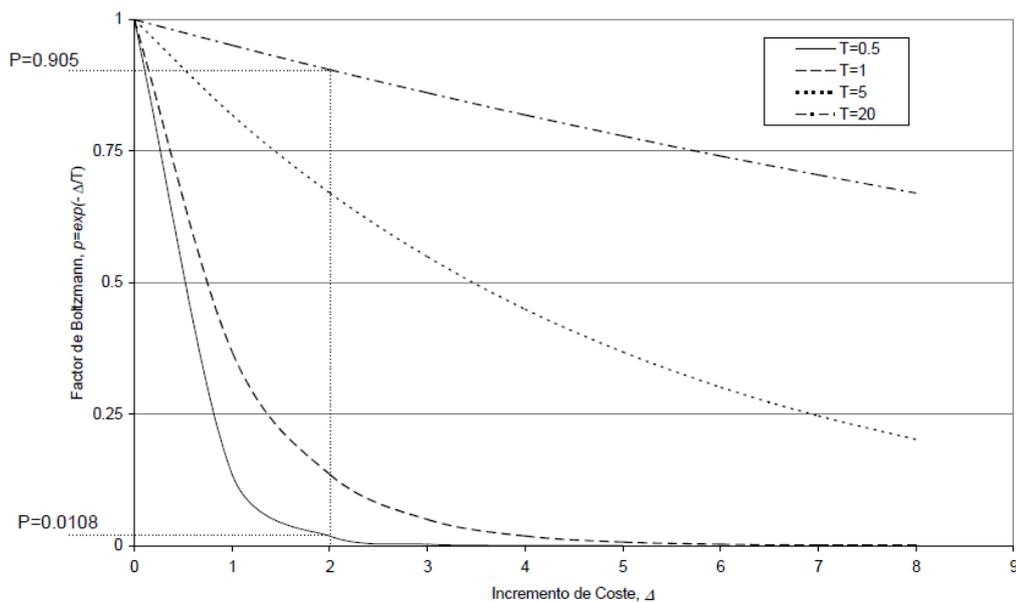


Fig. 2.32 Valor de la probabilidad "p" de aceptar una solución de mayor coste (factor de Boltzmann) en función de la temperatura T (Payá 2007)

Por otra parte, el algoritmo TA sigue el esquema siguiente:

- 1) Generar una solución inicial S_0 y elegir un umbral inicial, $U > 0$ (el umbral inicial es un parámetro del algoritmo TA).
- 2) Mientras no se cumpla un criterio de parada:
 - a) Aplicar un movimiento a S_0 para obtener una nueva solución S_1 .
 - b) Si S_1 mejora a S_0 , la reemplaza como solución actual. En caso contrario, S_1 reemplaza a S_0 si $f(S_1) - f(S_0) < U$.
 - c) Si no se consigue ninguna tras un cierto número de iteraciones, disminuir U .
 - d) Volver al paso a).

Tanto SA como TA pueden adoptar como solución actual una que empeore el valor de la función objetivo. Por ello es necesario almacenar en todo momento el mejor diseño encontrado o diseño "récord", pues la solución actual al final del proceso de optimización no tiene por qué coincidir con él.

Búsqueda tabú

La Búsqueda Tabú o Tabu Search (TS) fue propuesta por Glover en 1987 y se basa en guiar la búsqueda hacia zonas del espacio de soluciones que no han sido exploradas. Para ello, la Búsqueda Tabú clasifica como prohibidos un determinado número de los movimientos más recientes que no se pueden repetir durante un cierto número de iteraciones.

Optimización por Colonia de Hormigas.

La Optimización por Colonia de Hormigas o Ant Colony Optimization (ACO) fue propuesta originalmente por Dorigo et al. (1996). Se basa en el comportamiento colectivo de las hormigas en la búsqueda de alimento, que les permite encontrar el camino más corto entre su hormiguero y la fuente de comida. Inicialmente las hormigas exploran las cercanías de su hormiguero en busca de sustento de modo aleatorio. Una vez una de ellas ha encontrado alimento, evalúa su cantidad y calidad y toma una muestra con la que regresa al hormiguero. Por el camino, deja una señal odorífera al depositar una sustancia llamada feromona que permite que otras hormigas puedan seguir la misma trayectoria. Tras un tiempo, el camino hacia la comida se indicará por un rastro odoroso que crece con el número de hormigas que pasan por él y que va desapareciendo en caso contrario. El resultado final es la optimización del trabajo de todo el hormiguero en su búsqueda de comida.

Por analogía se puede establecer el comportamiento de los algoritmos de optimización de la siguiente forma:

- La búsqueda de alimento es equivalente a la exploración de las soluciones factibles en un problema de optimización.
- La cantidad de alimento es similar al valor de la función objetivo.
- El rastro de feromona es la memoria adaptativa del método.

2.5.2.3 Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos o Evolutionary Algorithms (EA) constituyen una familia de técnicas basadas en la idea de que una población de soluciones puede evolucionar hacia individuos de mayor calidad aplicando los mecanismos que rigen la evolución de las especies, Camp et al (2003) y Adeli et al (2006). Para ello, en primer lugar, se asigna a cada individuo una aptitud que normalmente es proporcional al valor de la función objetivo y, en segundo lugar, se emplean operadores que guían la búsqueda como la selección, la reproducción y la mutación.

El esquema general de un algoritmo evolutivo es el siguiente:

- 1) $NGen=1$ ($NGen$ es el número de la generación).
- 2) Crear una población inicial de soluciones $P(1)$ y evaluar la aptitud de los individuos de $P(1)$.
- 3) Mientras no se cumpla un criterio de parada:
 - a) Seleccionar individuos de $P(NGen)$ como padres de individuos de la generación $NGen+1$ (operador selección).
 - b) Combinar los padres seleccionados para crear nuevos individuos -hijos- (operador reproducción).
 - c) Modificar los hijos (operador mutación).
 - d) Evaluar la aptitud de los hijos.
 - e) $NGen=NGen+1$.
 - f) Crear la nueva población $P(NGen)$ seleccionando individuos entre los elementos de $P(NGen-1)$ y sus hijos modificados (operador selección). En este punto es donde pueden existir distintas estrategias de evolución en función del criterio adoptado de selección de individuos entre padres e hijos, todos los padres, todo los hijos o cualquier combinación adicional posible.

2.5.2.4 Redes neuronales

Las redes neuronales "Neural Networks" (NN) artificiales aparecieron al tratar de comprender el cerebro humano, considerándolo como un sistema de procesamiento de la información altamente compleja, no lineal y en paralelo. Su propiedad más interesante es su capacidad de aprendizaje, que hace que hayan sido aplicadas con éxito a problemas tan diversos como el reconocimiento de patrones, la optimización y la planificación.

Existen multitud de redes neuronales basadas fundamentalmente en conexiones existentes controladas a través de parámetros entre los datos de entrada (neuronas de la primera capa) y los resultados de salida (neuronas de la última capa). Además de los parámetros existentes de las diversas conexiones establecidas, aparecen neuronas en capas intermedias, llamadas capas ocultas, que procesan información y establecen criterios y ponderación de la información que a través de ellas pasa. Además, las redes neuronales pueden ser retroalimentadas o no en función de si la información corre a través de ellas en ambos sentidos (hacia delante y hacia atrás) o no.

En el campo de la ingeniería están siendo muy utilizadas como herramienta de predicción de resultados para problemas con un alto grado de no linealidad entre las variables de entrada y las

variables de salida. Para el correcto uso de la red es necesario calibrar o entrenar la red para que los distintos parámetros se ajusten a través de datos medidos experimentalmente. Una vez entrenada y validada una red para un problema concreto, esta herramienta permite predecir el resultado de dicho problema para cualquier valor de las variables de entrada. La calidad de los resultados obtenidos está sujeta a la calidad del entrenamiento realizado y a la predicción de resultados dentro del dominio fijado por las variables de entrada en su entrenamiento, es decir, los resultados tendrán una deficiente calidad siempre y cuando se tomen valores de las variables fuera del rango que se ha utilizado para entrenar a la red neuronal.

2.5.3 Técnicas aproximadas empleadas en la optimización multiobjetivo

De modo análogo a como sucede con la optimización monoobjetivo, los métodos de optimización multiobjetivo pueden ser divididos en dos grandes grupos: los métodos exactos (que son capaces de proporcionar un conjunto de soluciones óptimas) y los métodos heurísticos (que proporcionan un conjunto de soluciones del problema que no tienen por qué ser necesariamente las óptimas empleando tiempos de cálculo razonables). Estos últimos pueden ser clasificados en dos bloques, los que emplean estrategias que generalizan la búsqueda secuencial por entornos y los que se basan en los algoritmos evolutivos.

El conjunto de estas técnicas busca las soluciones óptimas desde varios puntos de vista u objetivos de tal forma que una solución debe satisfacer la condición de ser la mejor desde los múltiples objetivos establecidos, y por lo tanto, ser una solución de compromiso para cada uno de ellos. El método habitualmente empleado para realizar una optimización multiobjetivo es establecer como función objetivo global del problema, una combinación lineal con pesos de cada una de las funciones objetivo individualizadas.

En este trabajo final de máster no se van a tratar las funciones multiobjetivo siendo objeto de estudios que pudieran continuarse a raíz del realizado en este documento. Por ello y porque los algoritmos habitualmente empleados son similares, no se detalla en mayor profundidad este apartado.

2.6 Conclusiones relativas al estado del arte

Durante la construcción de edificios en altura se hace necesario apoyar la cimbra en forjados inferiores recientemente hormigonados. Estos forjados pueden estar sometidos a solicitaciones de carga superiores a las de servicio con resistencias del hormigón inferiores a sus características, haciendo evidente la necesidad de conocer como se transmiten las cargas entre los forjados y la cimbra.

Para resolver esta incertidumbre, se han desarrollado diversas investigaciones de carácter teórico explicadas al detalle en el apartado 2.3. En 1963 Grundy y Kabaila propusieron un método simplificado, que incluso actualmente es aplicado para determinar las cargas en puntales y forjados, gracias a su fácil aplicación y al estar, en la mayoría de situaciones, del lado de la seguridad.

Investigaciones posteriores de autores como Liu et al. (1985), Stivaros y Halvorsen (1990), Mosallam y Chen (1991), Moragues et al. (1996), Alvarado et al (2009) y Gasch et al (2012), coinciden en que el

método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) sobreestima las cargas en puntales, debido a que los considera como elementos infinitamente rígidos. Sin embargo, dichos modelos teóricos requieren de un software de cálculo especializado, lo cual los convierte en métodos de una compleja aplicación práctica. Así, autores como Duan y Chen (1995), Fang et al. (2001), y Calderón et al. (2011), entre otros, han desarrollado modelos teóricos simplificados que permiten estimar las cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo. Dichos modelos se basan, principalmente, en considerar a los puntales como elementos de rigidez finita y en considerar la ganancia de rigidez del forjado de hormigón con el tiempo.

En este punto es importante resaltar que la mayoría de investigaciones acerca de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, han estudiado el proceso de CD y el proceso de CRD, siendo Moragues et al. (1996), Alvarado et al. (2009) y Gasch et al. (2012) los únicos que hasta la fecha han estudiado el proceso de CCD. Sin embargo, dicho proceso es de uso habitual en España. En sus investigaciones se concluye que, al realizar el clareado, los forjados comienzan a soportar una fracción importante de la carga que actúa sobre éstos.

Establecer las solicitaciones de carga para los forjados, durante el proceso constructivo, obliga a comprobar la edad para la cual estos forjados tendrán la resistencia suficiente para asumir dichas cargas sin afectar negativamente su seguridad, funcionalidad y durabilidad. Así, autores como Calavera (1981), Fernández (1986) y Alvarado et al. (2006) adoptan metodologías basadas en la evolución de la resistencia a tracción y en la relación entre las cargas de construcción y las cargas de servicio para determinar la edad de descimbrado de un forjado. Otra metodología más rigurosa es la planteada por Marí (1995), que consiste en determinar, para cada uno de los estados límites, las características mecánicas que debe presentar el hormigón a fin de que dicho estado límite quede satisfecho, tanto en el momento de descimbrado como durante la vida útil de la estructura.

Llegado a este punto y tratados los temas relativos al cálculo del proceso de cimbrado/descimbrado así como los relativos al establecimiento de la condición de descimbrado, se han recopilado las distintas técnicas de diseño óptimo habitualmente utilizadas en ingeniería. Entre ellas, se ha tratado el diseño óptimo exacto, a través de la evaluación del campo de soluciones completo de forma que se pueda obtener con exactitud la solución más óptima, y el diseño óptimo aproximado a través de los algoritmos de optimización heurística que intentan encontrar de forma eficiente la solución óptima sin necesidad de evaluar todo el campo de soluciones.

Dentro de las técnicas aproximadas de optimización se han tratado los algoritmos que realizan la búsqueda de forma aleatoria, aquellos que la realizan de forma secuencial por entornos, los algoritmos evolutivos y las redes neuronales.

Visto todo lo concerniente a los objetivos perseguidos en este trabajo final de máster, se puede observar el volumen de trabajo necesario a realizar para calcular el proceso de cimbrado/descimbrado de un edificio, debiendo considerar un método simplificado de cálculo en el mejor de los casos y adoptando una condición de descimbrado con tal de comprobar si el proceso constructivo considerado cumple o no cumple con dicha condición. Por lo tanto, es interesante trasladar a la práctica una sencilla aplicación informática que permita al usuario calcular y comprobar un proceso de cimbrado/descimbrado de edificio de forma sencilla y muy rápida. Una vez la aplicación informática

esté funcionando, se puede aprovechar el trabajo realizado para estudiar la optimización de los procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, y encontrar de esta forma una solución óptima al problema del cimbrado/descimbrado de edificios. De esta forma, sin la necesidad de la experiencia del técnico autor del proyecto de cimbrado/descimbrado, se pueden conseguir procesos constructivos óptimos sin aportar ninguna solución inicial por parte del usuario. A partir de la solución que le proporcione la aplicación informática, el usuario podrá adoptarla para llevarla a la práctica o modificarla en función de sus intereses, pudiendo volver a comprobar su validez a través del módulo de comprobación. Todos estos aspectos irán desarrollándose en mayor profundidad a lo largo del documento.

CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DEL NUEVO MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO DESARROLLADO POR CALDERÓN ET AL (2011) EN UNA NUEVA APLICACIÓN INFORMÁTICA

Tras el análisis realizado en el Capítulo 2 "Antecedentes y Estado del arte", en este capítulo se empieza con el diseño de una nueva aplicación informática con la que se podrá, a partir de lo definido en este capítulo, calcular y comprobar distintos procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ. Cabe destacar que la aplicación informática se basa en abordar en cálculo de procesos de cimbrado/descimbrado de forma simplificada a partir del nuevo procedimiento simplificado por Calderón et al (2011) y de hipótesis ya contrastadas. Aunque ello no suponga una novedad pero si un trabajo de proporcionarle generalidad a la aplicación del método, es necesaria la aplicación informática, ya que la aportación original a realizar en este trabajo final de máster es aprovecharla para obtener procesos de cimbrado/descimbrado óptimos con la aplicación de técnicas diversas de optimización tal y como se desarrollará en posteriores capítulos.

Para ello, en primer lugar es necesario establecer el alcance que se quiere proporcionar a la nueva aplicación informática en función de los sistemas y procesos de cimbrado, tipos de forjados, número de plantas consecutivas cimbradas, número de plantas totales, etc. En este punto de partida se ha decidido no adoptar ninguna limitación a la aplicación proporcionando todas las variantes posibles. Por lo tanto, la nueva aplicación informática es capaz de considerar:

- Los tres tipos de sistemas de cimbrado/descimbrado utilizados en la práctica. Es decir, se consideran los sistemas Cimbrado/Descimbrado (En adelante, CD), Cimbrado/Clareado/Descimbrado (En adelante, CCD) y Cimbrado/Recimbrado/Descimbrado (En adelante, CRD). Además, para los sistemas CCD y CRD se considera la posibilidad de tener en cuenta distintos porcentajes de clareado o recimbrado respectivamente.
- Los tres tipos de forjados habitualmente proyectados en edificios, es decir, forjados tipo losa, forjados reticulares de casetón perdido y forjados reticulares de casetón recuperable. Además se consideran distintas condiciones de contorno para los mismos constituyendo vanos de esquina, de medianería e interiores.
- El número de plantas consecutivas cimbradas puede tomar valores entre 1 y 4. Se ha considerado que 4 plantas consecutivas cimbradas es un límite superior que no se ve superado en la práctica habitual.
- Se consideran procesos de cimbrado/descimbrado de edificios de hasta 30 plantas.

A partir del alcance que se le quiere proporcionar a la aplicación informática es necesario considerar un método simplificado de cálculo que pueda ser programado sin necesidad de utilizar software específico. Además, como comprobación de los procesos de cimbrado/descimbrado, también es necesario establecer las condiciones de descimbrado a considerar. Se ha decidido considerar como método simplificado de cálculo el nuevo método simplificado desarrollado y validado por Calderón et al (2011) y que también ha resultado validado por Gasch et al (2012) por comparación con sus estudios numéricos y experimentales. La hipótesis tomadas en el método simplificado de cálculo adoptado pueden consultarse en el capítulo 2 de este trabajo.

Además, como condición de descimbrado se considera la aplicación de la condición establecida por Calavera (1981) en la que se controla la resistencia a tracción del hormigón como parámetro más crítico, en comparación con la resistencia a tracción de cálculo a 28 días, las cargas de cálculo en servicio y las cargas en construcción. Se considera esta condición de descimbrado ya que supone una fácil aplicación y diversos autores han confirmado su validez a raíz de la propuesta realizada por Calavera (1981). Para más detalle, puede consultarse el capítulo 2 en su apartado 2.4.

Tras la consideración, por una parte del nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) que permitirá a la aplicación informática calcular la distribución de cargas entre forjados y puntales, y por otra, de la condición de descimbrado que comprobará la validez de un proceso de cimbrado/descimbrado en función de las cargas calculadas y de la edad del hormigón en la realización de cada operación constructiva, puede empezar a desarrollarse la aplicación. Para ello, según marca el método simplificado, es necesario establecer una secuencia de cálculo para cada una de las operaciones constructivas, comprobándose a su vez la validez del cálculo de dicha operación a través de la aplicación de la condición de descimbrado. En el siguiente diagrama de flujo (Fig. 3.1) se observa la secuencia a seguir por la aplicación informática.

Para la implementación del método así como la metodología desarrollada en este trabajo final de máster, se ha utilizado el lenguaje de programación FORTRAN con el que poder compilar la aplicación una vez desarrollada y poder ejecutarla sin la necesidad de ningún entorno informático específico, tan solo con la utilización de un ordenador.

Como se puede observar en el diagrama de flujo, en primer lugar es necesario proporcionarle a la aplicación una serie de datos conocidos del edificio y del proceso de cimbrado/descimbrado que se quiere calcular y comprobar. En las siguientes tablas se resumen los datos necesarios a proporcionar al programa para que este pueda alimentarse y proceder a la ejecución del cálculo y la comprobación.

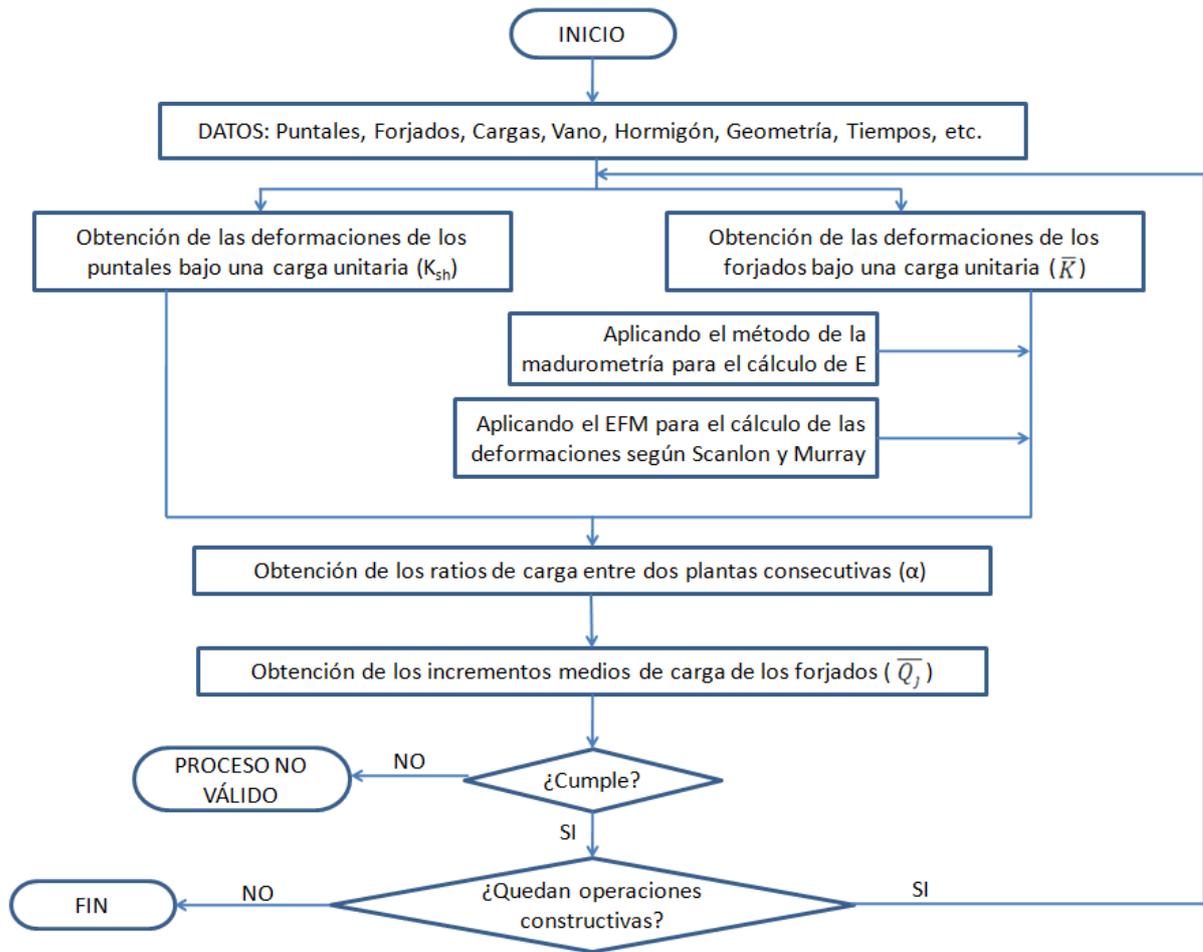


Fig. 3.1 Secuencia a seguir por la aplicación informática para evaluar un proceso de cimbrado/descimbrado.

Tabla 3.1 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (I).

Datos para cada una de las plantas	
Resistencia característica del hormigón [kPa]	$f_{ck} (i)$
Velocidad de endurecimiento del hormigón	$s (i)$
Tipo de forjado	forjado (i)
Ancho de los nervios [m]	$bnerv (i)$
Separación entre ejes de nervios [m]	$snerv (i)$
Espesor de la capa de compresión [m]	$c (i)$
Canto total de la sección [m]	canto (i)
Luz en dirección X del pórtico virtual 1x [m] (*)	luz1x (i)

Tabla 3.2 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (II).

Datos para cada una de las plantas	
Luz en dirección X del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	luz2x (i)
Luz en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	luz1y (i)
Luz en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	luz2y (i)
Luz del vano contiguo en dirección X del pórtico virtual 1x [m] ^(*)	luzc1x (i)
Luz del vano contiguo en dirección X del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	luzc2x (i)
Luz del vano contiguo en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	luzc1y (i)
Luz del vano contiguo en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	luzc2y (i)
Luz del vano contiguo A en dirección X del pórtico virtual 1x [m] ^(*)	luzc1xa (i)
Luz del vano contiguo B en dirección X del pórtico virtual 1x [m] ^(*)	luzc1xb (i)
Luz del vano contiguo A en dirección X del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	luzc2xa (i)
Luz del vano contiguo B en dirección X del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	luzc2xb (i)
Luz del vano contiguo A en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	luzc1ya (i)
Luz del vano contiguo B en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	luzc1yb (i)
Luz del vano contiguo A en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	luzc2ya (i)
Luz del vano contiguo B en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	luzc2yb (i)
Voladizo en dirección X del pórtico virtual 1x [m] ^(*)	vol1x (i)
Voladizo en dirección X del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	vol2x (i)
Voladizo en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	vol1y (i)
Voladizo en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	vol2y (i)
Voladizo en dirección X sentido A del pórtico virtual 1x [m] ^(*)	vol1xa (i)
Voladizo en dirección X sentido B del pórtico virtual 1x [m] ^(*)	vol1xb (i)
Voladizo en dirección X sentido A del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	vol2xa (i)
Voladizo en dirección X sentido B del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	vol2xb (i)

Tabla 3.3 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (III).

Datos para cada una de las plantas	
Voladizo en dirección Y sentido A del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	vol1ya (i)
Voladizo en dirección Y sentido B del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	vol1yb (i)
Voladizo en dirección Y sentido A del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	vol2ya (i)
Voladizo en dirección Y sentido B del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	vol2yb (i)
Altura libre entre plantas [m]	H (i)
Peso propio del forjado reticular [kN/m ²]	peso (i)
Sobrecarga [kN/m ²]	SC (i)
Carga permanente de proyecto [kN/m ²]	Pproy (i)
Sobrecarga de uso de proyecto [kN/m ²]	SCProy (i)
Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado	
Separación de sopandas [m]	ss (i)
Separación de puntales [m]	sp (i)
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado	toch (i)
Tiempo de la operación constructiva de clareado	tofc (i)
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado	tofr (i)
Datos generales para todo el edificio	
Peso específico del hormigón de los forjados	gammah
Temperatura ambiente considerada	tempamb
Tipo de vano ^(*)	vano
Continuidad del vano ^(*)	continuidad
Número de plantas	n
Módulo de elasticidad del acero de los puntales	Ep
Coefficiente de seguridad en construcción frente a cargas permanentes	gammacp

Tabla 3.4 Datos necesarios para alimentar al módulo de cálculo y comprobación de la aplicación informática (IV).

Datos generales para todo el edificio	
Coeficiente de seguridad en construcción frente a sobrecargas	gamma _{sc}
Coeficiente de seguridad de diseño frente a cargas permanentes	gamma _{adp}
Coeficiente de seguridad de diseño frente a sobrecargas	gamma _{adsc}
Tiempo necesario para que los trabajadores realicen la operación de descimbrado y recolocación de elementos en una nueva planta	t _{desc}
Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado	
Tipo de proceso de cimbrado/descimbrado [CD, CCD o CRD]	proceso
Porcentaje de clareado o recimbrado	porcentaje
Número de platas consecutivas cimbradas	npcc
Sección de acero de los puntales empleados	A _p

(*) Consúltense las Figs. 3.7 para completar la definición de cada uno de estos datos

A continuación, la aplicación procede de forma secuencial a la evaluación de todas las operaciones constructivas, comprobando de forma previa al cálculo de la siguiente operación constructiva, que la operación en cuestión cumple con la condición de descimbrado establecida para cada uno de los forjados, es decir, que cada uno de ellos sea capaz de resistir la carga a la que se ven solicitados.

Dentro de cada una de las operaciones constructivas, la aplicación realiza, en primer lugar, el cálculo de las deformaciones unitarias tanto de forjados (K) como de puntales (K_{sh}).

Para el cálculo de la deformación unitaria de los forjados es necesario la aplicación del método de madurez para la evaluación del módulo de elasticidad a la edad del hormigón de cada uno de los forjados de la operación constructiva. Conocido el módulo de elasticidad de cada uno de los forjados, se aplica, tal y como se ha explicado en el capítulo 2, el *EFM* ("*Equivalent Frame Method*") para el cálculo de las deformaciones unitarias de los forjados según Scanlon y Murray.

Para el cálculo de la deformación unitaria de los puntales tan solo es necesario disponer de los datos de altura de la planta considerada, el área de los puntales, la separación de puntales y sopandas y el módulo de elasticidad del acero de los puntales. Con estos datos, es inmediato el cálculo de la deformación de los puntales bajo carga unitaria.

El cálculo de las deformaciones unitarias se detalla en mayor profundidad en apartados posteriores. Una vez conocidas las deformaciones unitarias tanto de forjados como de puntales se procede al cálculo de los ratios de carga entre dos plantas consecutivas, así como a la obtención, seguidamente, de los incrementos medios de carga de los forjados tal y como ha quedado expuesto en el capítulo 2. Conocidos los incrementos medios de carga de los forjados debidos a la operación constructiva en

cuestión, se conocen, por adición a los calculados de la operación constructiva anterior, las cargas a las que se ven sometidos los forjados y, consecuentemente por equilibrio, se conocen las cargas a las que se ven sometidos los puntales. Como se ha comentado anteriormente, en este punto es donde interviene la condición de descimbrado (o condición de autosuficiencia de los forjados frente a las cargas que lo solicitan teniendo en cuenta la edad del hormigón). En el caso en el que la condición sea favorable, se sigue el proceso de cálculo y comprobación con la siguiente operación constructiva hasta finalizar el proceso de cimbrado/descimbrado. En el caso en el que la condición sea desfavorable, la aplicación de cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado se detiene resultando, por tanto, un proceso no válido.

Tal y como se ha visto y se ha desarrollado en mayor profundidad en el capítulo 2, la condición de descimbrado adoptada es la propuesta por Calavera (1981) y secundada por otros autores. Sin embargo, como se ha visto en la anterior tabla, en este trabajo se considera la posibilidad de considerar coeficientes de seguridad de acciones distintos para sobrecargas y cargas permanentes, tanto para fase de construcción como para fase de servicio. Por tanto, la condición de descimbrado finalmente adoptado se basa en la siguiente expresión:

$$\beta(i, t) = \frac{Q(i,t) \cdot \frac{\text{peso}(i)}{\text{peso}(i)+SC(i)} \cdot \text{gamma}cp + Q(i,t) \cdot \frac{SC(i)}{\text{peso}(i)+SC(i)} \cdot \text{gamma}csc}{P\text{Proy}(i) \cdot \text{gamma}dp + SC\text{Proy}(i) \cdot \text{gamma}dsc} \leq \frac{f_{ctk}(i,t)}{f_{ctk}(i,28)} \quad (3.1)$$

En donde, $Q(i,t)$ es la carga asumida por el forjado i correspondiente a un hormigón con una edad t . Esta condición de descimbrado, por tanto, se debe cumplir para cada operación constructiva y para cada uno de los forjados presentes dentro de cada una de las operaciones constructivas.

En los siguientes apartados se detalla en mayor profundidad el cálculo de las deformaciones unitarias de los forjados y puntales, la adecuación de la condición de descimbrado o condición de autosuficiencia de los forjados al caso concreto tratado en este trabajo, así como el desarrollo del cuerpo principal de la aplicación que gobierna el cálculo y comprobación de los procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ.

3.1 Desarrollo de la herramienta que permite calcular la deformación de los puntales bajo carga unitaria

Tal y como se ha comentado previamente, el cálculo de la deformación del conjunto de puntales bajo carga unitaria es inmediato a partir del conocimiento de la altura de las plantas (H), del módulo de elasticidad de los puntales (E_p), del área de acero de cada uno de los puntales (A_p) y de la separación de sopandas y puntales (ss y sp respectivamente). Conocidos estos parámetros, que son dato de entrada para el módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado, el cálculo de la deformación unitaria de los forjados (K_{sh}) se obtiene de la siguiente forma:

$$K_{sh} = \frac{\text{unit} \cdot H}{E_p \cdot \left[\frac{A_p}{(ss \cdot sp)} \right]} \quad (3.2)$$

En donde unit representa a una carga unitaria por unidad de superficie a partir de la que se obtiene la deformación unitaria de los puntales bajo carga unitaria.

3.2 Desarrollo de la herramienta que permite calcular la deformación de los forjados bajo carga unitaria

El cálculo de la deformación unitaria de los forjados bajo carga unitaria es menos inmediato que el realizado para los puntales. Tal y como ha quedado desarrollado en el capítulo 2, para el cálculo de la deformación de los forjados bajo carga unitaria se aplica el *EFM* ("*Equivalent Frame Method*") según Scanlon y Murray.

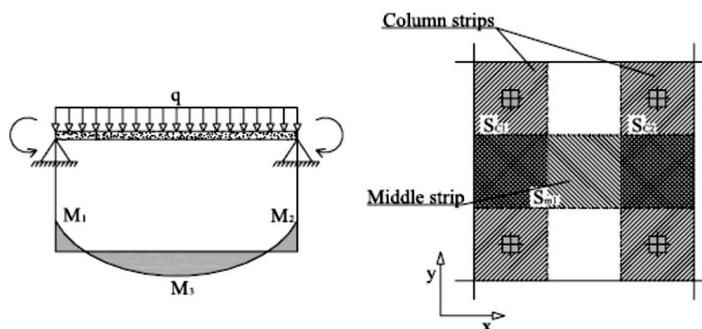


Fig. 3.2 Discretización de la estructura, EFM. Calderón et al. (2011).

La aplicación de este método implica, en primer lugar, el cálculo del diagrama de momentos flectores de las bandas central y de pilares para las direcciones x e y del vano considerado en el cálculo. Las condiciones de contorno del vano considerado, por tanto, influyen de manera significativa en el valor del diagrama de momentos de cada una de las bandas, considerando en este punto las distintas posibilidades contempladas en la aplicación informática:

- Vano de esquina. Se considera también la continuidad del vano de esquina en dos direcciones, en una o en ninguna.
- Vano de medianera. Se considera además la continuidad del vano en una o dos direcciones.
- Vano interior. Se considera la continuidad del vano en dos direcciones.

Para el cálculo de momentos se consideran dos opciones. La primera de ellas a través del cálculo matricial considerando esta opción como una opción más exacta pero a su vez compleja. La segunda a través de coeficientes de reparto del momento isostático (M_0) que aparece en cada una de las bandas.

$$\frac{q \cdot L^2}{8} = \frac{(M_1 + M_2)}{2} + M_3 = M_0 \quad (3.3)$$

En el presente trabajo se ha adoptado esta segunda metodología. Como coeficientes de reparto del momento isostático para las distintas bandas se ha adoptado el criterio utilizado por F. Regalado propuesto en su libro "Los forjados reticulares: diseño, análisis, construcción y patología". Toda la información relativa al cálculo del diagrama de momentos se ampliará posteriormente.

Una vez calculado el diagrama de momentos para cada una de las bandas, el desplazamiento medio para cada banda se calcula con la ecuación de la viga elástica:

$$\overline{\Delta}_s = \frac{q \cdot L^4}{120 \cdot E \cdot I} - \frac{(M_1 + M_2) \cdot L^2}{24 \cdot E \cdot I} \quad (3.4)$$

La obtención de la ecuación analítica del desplazamiento medio para cada banda se ha obtenido analíticamente según lo especificado en el Apéndice 1 a este documento.

Además, para conocer el valor del desplazamiento medio es necesario emplear el módulo de elasticidad del hormigón para la edad del mismo en la que se está calculando la deformación media. Posteriormente se expone de forma más detallada la aplicación del método de madurez para el cálculo del módulo de elasticidad a considerar en función de la edad del hormigón. También es necesario conocer el momento de inercia a aplicar para cada una de las bandas en función del tipo de forjado. De la misma forma, posteriormente se ampliará la información de los criterios considerados para el cálculo del momento de inercia.

Conocido el desplazamiento medio para cada una de las bandas, el desplazamiento medio para cada una de las direcciones x e y se obtiene de forma proporcional al calculado en las bandas de soportes y las bandas centrales según las siguientes expresiones:

$$\overline{\Delta}_y = \frac{\overline{\Delta}_{Sc1} + \overline{\Delta}_{Sc2}}{2} + \overline{\Delta}_{Sm1} \quad (3.5)$$

$$\overline{\Delta}_x = \frac{\overline{\Delta}_{Sc3} + \overline{\Delta}_{Sc4}}{2} + \overline{\Delta}_{Sm2} \quad (3.6)$$

Una vez obtenidos los desplazamientos medios en direcciones x e y, la obtención de la deformación de los forjados bajo carga unitaria se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$K = \frac{\overline{\Delta}_y + \overline{\Delta}_x}{2} \quad (3.7)$$

Así, de esta forma se finaliza el cálculo de la deformación de los forjados bajo carga unitaria. A continuación se detallan en mayor profundidad tanto la metodología adoptada para el cálculo de los diagramas de momentos de cada una de las bandas, como la metodología seguida en la aplicación del método de la madurez para la actualización del módulo de elasticidad de los forjados en función de la edad de los mismos.

3.2.1 Metodología adoptada para el cálculo de los diagramas de momentos de cada una de las bandas definidas por el EFM

Tal y como se ha comentado anteriormente, para el cálculo de los diagramas de momentos de cada una de las bandas definidas por el EFM se han adoptado los criterios establecidos por F. Regalado en su libro "Los forjados reticulares: diseño, análisis, construcción y patología" por los que a partir del momento isostático de la viga equivalente a una banda, se obtiene el diagrama de momentos repartiendo el momento isostático de cada una de las bandas, a través de la aplicación de unos coeficientes, entre las bandas centrales y las bandas de pilares. Cabe destacar que esta forma de actuar supone una forma simplificada de abordar el cálculo del diagrama de momentos, existiendo la

posibilidad de realizar dicho cálculo de forma más exacta y compleja a través de la aplicación del método matricial no considerado en este trabajo.

En primer lugar, se adopta el análisis de la estructura mediante pórticos virtuales en donde, como se puede observar en las siguientes figuras, aparecen tanto bandas centrales como bandas de soporte.

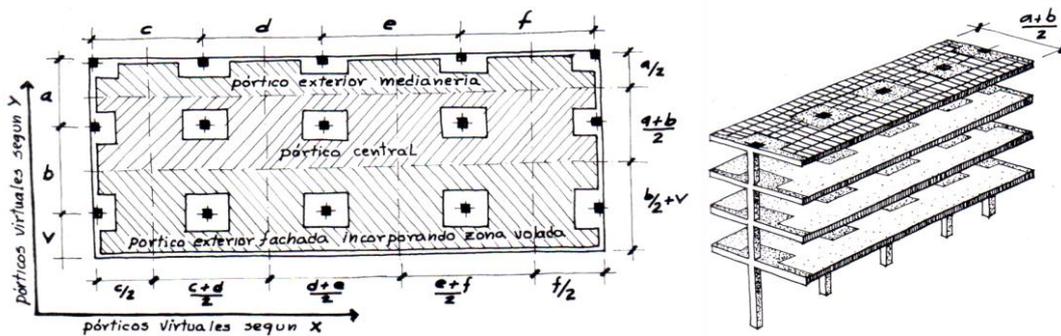


Fig. 3.3 Definición de los pórticos virtuales. F. Regalado (2003).

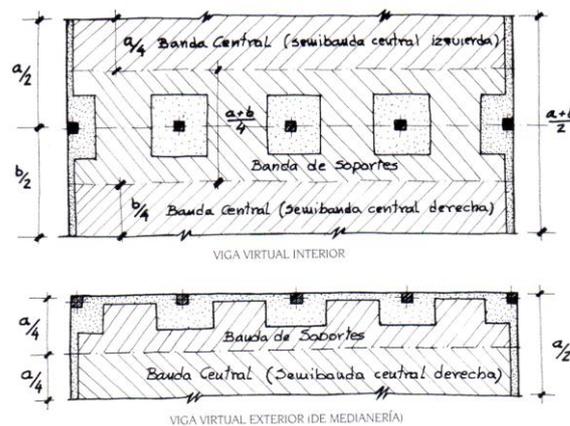


Fig. 3.4 Definición de las bandas de soporte y central en función del tipo de pórtico virtual. F. Regalado (2003).

A continuación, una vez conocidos los pórticos virtuales se puede repartir el momento isostático de cada uno de los pórticos según distintos criterios.

El primer criterio que F. Regalado (2003) apunta es el adoptado por el código ACI-318 para forjados tipo losa y forjados reticulares. Según F. Regalado (2003) "el código ACI-318 aporta los momentos a considerar en los dinteles abandonando falsos criterios de aparente exactitud que sólo complicaban innecesariamente y absurdamente el método propuesto".

Tabla 3.5 Propuesta de reparto de los momentos isostáticos en las vigas virtuales de los forjados de losas y reticulares. F. Regalado (2003).

Momentos de losa	Vano extremo			Vano interior	
	Exterior negativo	Positivo	Primera interior negativo	Positivo	Interior negativo
Momento total	$0.26 \cdot M_0$	$0.52 \cdot M_0$	$0.70 \cdot M_0$	$0.35 \cdot M_0$	$0.65 \cdot M_0$
Franja de columna	$0.26 \cdot M_0$	$0.31 \cdot M_0$	$0.53 \cdot M_0$	$0.21 \cdot M_0$	$0.49 \cdot M_0$
Franja intermedia	$0 \cdot M_0$	$0.21 \cdot M_0$	$0.17 \cdot M_0$	$0.14 \cdot M_0$	$0.16 \cdot M_0$

Como segundo criterio, F. Regalado (2003) cita el libro de J. Montoya-Meseguer-Morán que propone idénticos momentos que los del código ACI-318, tal y como se observan en la siguiente figura, operando con luces a cara de pilares.

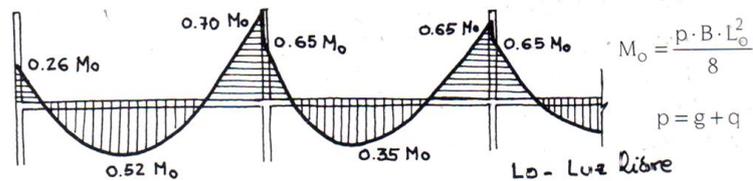


Fig. 3.5 Momentos directos propuestos por Montoya-Meseguer-Morán. F. Regalado (2003).

Como tercer y último criterio aparece el de la antigua norma EHE en el que se estiman los momentos partiendo de la luz a ejes de pilares según la siguiente tabla.

Tabla 3.6 Porcentajes del momento isostático asignados a las vigas virtuales según la EHE.

	Caso A	Caso B	Caso C
Momento negativo e apoyo exterior	30 %	0 %	65 %
Momento positivo en vano	52 %	63 %	35 %
Momento negativo en apoyo interior	70 %	75 %	65 %

Caso A: Placa elásticamente empotrada en los soportes de borde

Caso B: Placa apoyada en el borde.

Caso C: Placa perfectamente empotrada en los ambos bordes, o con continuidad en ambos apoyos (vano intermedio).

Vistos los criterios disponibles para la definición del diagrama de momentos en los pórticos virtuales, en este trabajo se ha adoptado el segundo criterio.

Una vez definido el diagrama de momentos en los pórticos virtuales, es necesario trasladar los momentos, mediante coeficientes de reparto a las bandas centrales y de soportes con tal de obtener

posteriormente la deformación de los forjados bajo carga unitaria tal y como se ha expuesto anteriormente.

Para ello, F. Regalado (2003) también considera distintos criterios de reparto. Entre los más importantes cabe destacar la distribución de momentos en bandas realizada por la anterior EHE y la distribución considerada por F. Regalado a lo largo de su trayectoria profesional que coincide prácticamente con los porcentajes de reparto de la EHE y proporciona más información sobre la influencia de las condiciones de contorno en la repartición.

Tabla 3.7 Reparto de momentos en bandas de soportes y centrales según la EHE. F. Regalado (2003).

Distribución de los momentos en las bandas (EHE)		
Momentos negativos	En soportes interiores	En soportes exteriores
Banda de soportes	75 %	100 %
Banda central	25 %	20 %
Momentos positivos	En vanos interiores	En vanos exteriores
Banda de soportes	60 %	40 %
Banda central	40 %	40 %

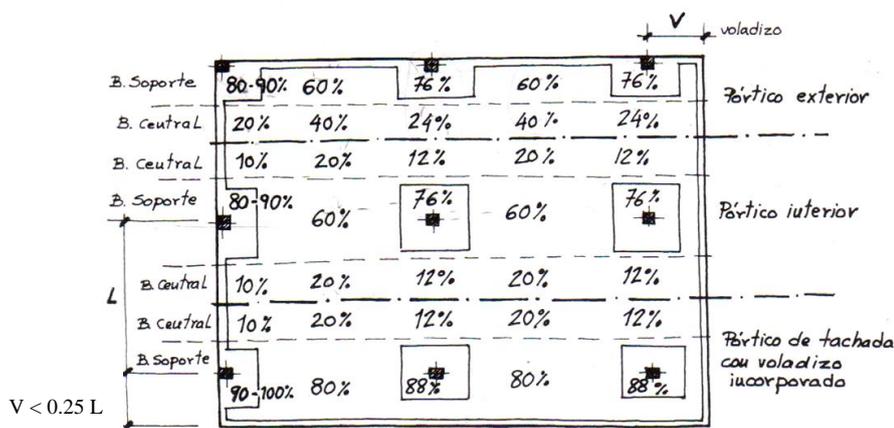


Fig. 3.6 Reparto de momentos en bandas centrales y de soportes según F. Regalado a partir de los valores propuestos por la EHE. F. Regalado (2003).

En este trabajo se adoptan los coeficientes de reparto de momentos en bandas centrales y de soportes propuesto por F. Regalado ya que proporcionan más información sobre la afección de las condiciones de contorno al cálculo de los diagramas de momentos. Como se puede observar en la anterior figura, los coeficientes de reparto que aparecen se corresponden con todas las opciones posibles consideradas, tratando tanto soportes exteriores, interiores o cercanos a voladizos, como vanos interiores, de esquina o de medianería. Cabe destacar la condición que aparece abajo a la izquierda de la figura anterior

sobre la longitud de los voladizos limitándola al 25 % de la luz entre pilares. En caso de sobrepasar dicha limitación, según considera F. Regalado, el pórtico se consideraría como un pórtico interior en lugar de como un pórtico de fachada.

Así, de esta forma, se calculan en la aplicación informática el diagrama de momentos de las bandas de soporte y centrales para el posterior cálculo de la deformación de los forjados bajo carga unitaria. Los distintos casos considerados para el cálculo del diagrama de momentos, que se corresponden con la totalidad de casos que pueden darse en la práctica, se pueden observar en la siguientes figura (Fig. 3.7) en donde además se proporciona el nombre de los datos de entrada a proporcionar a la aplicación tal y como se han definido en las Tablas 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4.

Limitaciones del método directo para el cálculo de los momentos en los pórticos virtuales

El método adoptado en este trabajo de cálculo de los diagramas de momentos a partir del reparto del momento isostático (método directo) requiere el cumplimiento de una serie de condiciones o limitaciones a considerar:

- Que exista un mínimo de tres vanos. Aunque en este trabajo se adopta como criterio que tenga al menos 3 vanos o, en su defecto, que los vanos tengan un voladizo que emule la continuidad de los forjados y por tanto, la supuesta consideración de un número mayor de vanos.
- El método no tiene en cuenta los empujes horizontales y sólo puede aplicarse para cargas gravitatorias, objeto exclusivo del presente trabajo.
- Las luces consecutivas no deben diferir entre sí más de un tercio de la mayor.
- Las desviaciones entre pilares serán menores que un 10 %.

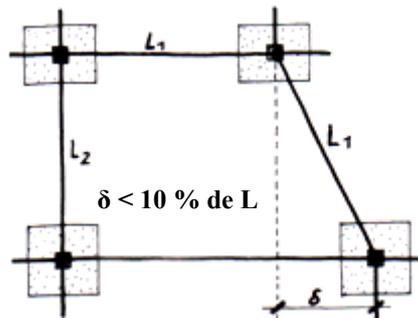


Fig. 3.7 Desviaciones límite permitidas para la aplicación de la metodología seguida. F. Regalado (2003)

- La sobrecarga de uso no debe duplicar la carga permanente, condición que se cumple prácticamente siempre.

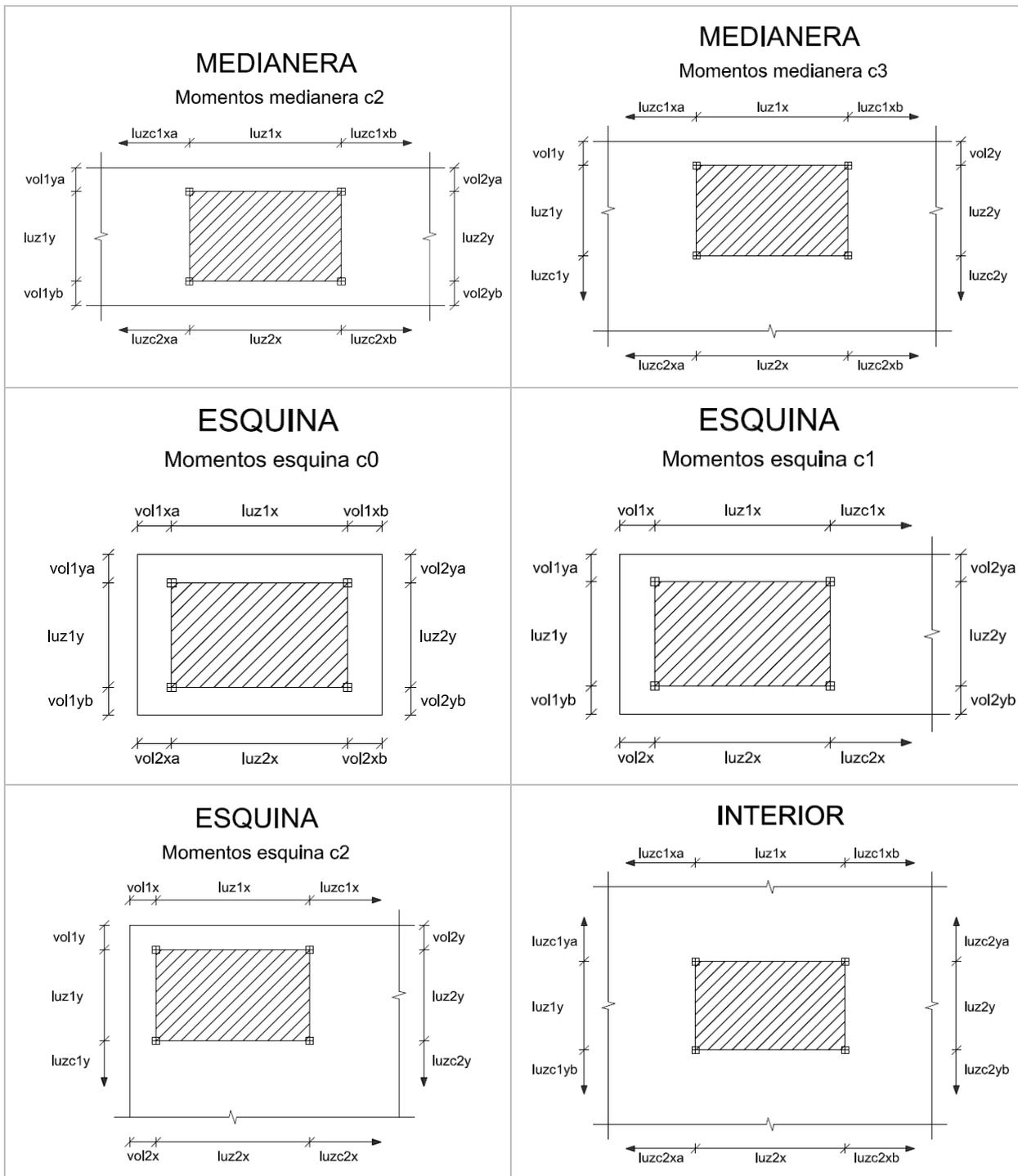


Fig. 3.8 Condiciones de contorno posibles para un vano y parámetros establecidos en función de las condiciones de contorno.

3.2.2 Criterios adoptados para el cálculo de la inercia de las bandas centrales y de soportes en función del tipo de forjado

Como se ha visto anteriormente, el cálculo de las inercias de los forjados para cada una de las bandas definidas es necesario para la obtención de la deformación del forjado bajo carga unitaria. Evidentemente el cálculo de la inercia depende del tipo de forjado, proponiendo distintas expresiones en función de si el forjado es de tipo losa o tipo reticular.

Para forjados tipo losa, el cálculo del momento de inercia es inmediato:

$$I = \frac{1}{12} * b * h^3 \tag{3.8}$$

En donde b representa el ancho de la banda considerada y h el canto del forjado.

Para el resto de forjados, forjados reticulares de casetón perdido y de casetón recuperable, el cálculo no es tan inmediato ya que existen zonas aligeradas propias de este tipo de forjados, y zonas macizadas alrededor de los pilares que conforman los ábacos. Para el cálculo de la inercia se han seguido los criterios expuestos en el libro de F. Regalado (2003) de cálculo de inercias frente a cargas verticales.

En primer lugar, tal y como expone el autor, según la antigua EHE, para la definición de la inercia de las vigas que representan el forjado reticular, se considerará la inercia bruta correspondiente al ancho total del pórtico teniendo en cuenta la variación de inercias existentes a lo largo de la misma. Esto supone operar con dos inercias distintas, introduciendo en el análisis del pórtico virtual dos nudos suplementarios, al margen de los nudos definidos por la unión entre pilares y forjados.

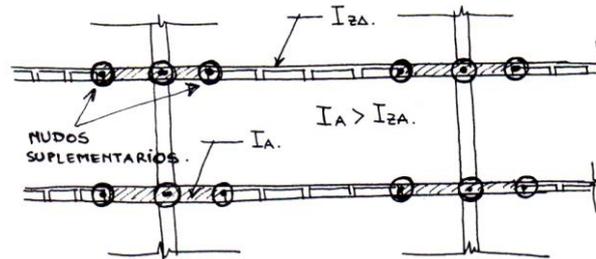


Fig. 3.9 Nudos suplementarios según EHE marcando los cambios de inercia en el dintel virtual. F. Regalado (2003)

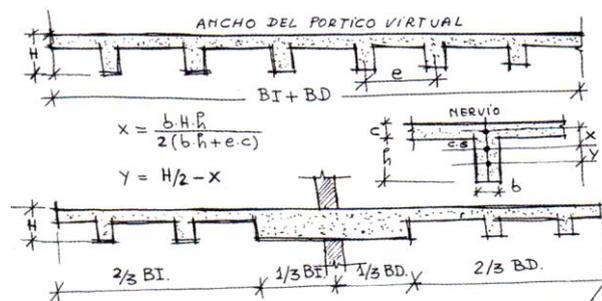


Fig. 3.10 Secciones para la zona aligerada y para la zona de ábacos. F. Regalado (2003)

Observando la figura anterior, las inercias que deben asignarse a las barras del pórtico virtual se obtienen con la aplicación de las siguientes expresiones:

- Inercia de un nervio:

$$I_n = \frac{1}{12} * b * h^3 + b * h * y^2 + \frac{1}{12} * e * c^3 + e * c * x^2 \quad (3.9)$$

- Inercia de la zona aligerada:

$$I_{ZA} = n^{\circ}nervios * I_n = \left(\frac{BI+ND}{e}\right) * I_n \quad (3.10)$$

- Inercia de la zona del ábaco:

$$I_A = \frac{1}{3} * (BI + BD) * \frac{H^3}{12} + \left(\frac{2*(BI+BD)}{3*e}\right) * I_n \quad (3.11)$$

Como se puede observar, el empleo de esta metodología necesitaría como dato de entrada las dimensiones exactas de los ábacos además de complicar proceso de cálculo de las inercias ya que en la metodología planteada en este documento, el cálculo de las inercias debería realizarse para cada una de las bandas. Adicionalmente, este criterio de consideración de las inercias del forjado obliga a considerar los nudos adicionales proporcionados al pórtico virtual para la consideración de la inercia equivalente de cada una de las bandas consideradas en el método adoptado en este trabajo.

Por toda la complejidad expuesta para su utilización en este trabajo, y por la complejidad que presente de forma general, F. Regalado (2003) considera que "*operar de esta forma resulta tedioso e innecesariamente complicado, sin un beneficio añadido digno de consideración*". Por ello, tras la exposición de la metodología que marcaban las normativas, en F. Regalado (2003) aparecen otros criterios de cálculo de la inercia con el objeto de simplificar el modo operativo en los pórticos y obviar la introducción de nudos suplementarios que marquen las diferentes rigideces que realmente existen en los forjados. Para ello, se propone operar con una inercia única para los dinteles según alguno de los siguientes criterios:

- Criterio adoptado por J. Montoya-Meseguer-Morán:

$$I_{Dintel} = 1'20 * I_{ZA} \quad (3.12)$$

- Criterio adoptado por F. Regalado:

$$I_{Dintel} = I_A \quad (3.13)$$

El primero de ellos consiste en incrementar la inercia de la zona aligerada por un factor de 1'20. En el segundo, se considera que la inercia del pórtico virtual es igual a la inercia de la sección de los ábacos.

Para el caso concreto manejado en este trabajo, aparecen bandas de soporte y bandas centrales. Habitualmente, en la mayoría de casos, el ábaco quedará acotado dentro de la zona de la banda de soportes. Por lo tanto, no se considera adecuado considerar que la inercia de la banda de soportes y/o de la banda central sea igual a la inercia en sección de ábacos ya que la intención es considerar una inercia equivalente de cada una de las bandas completas, observando que la banda de soportes tendrá secciones en ábacos y secciones en zonas aligeradas, y que las bandas centrales tendrán, probablemente, secciones exclusivamente en zonas aligeradas.

Por lo tanto, para el caso de forjados reticulares se consideran las siguientes inercias equivalentes en función del tipo de banda considerada:

- Banda de soportes:

$$I_{sc} = 1'20 * I_{ZA} \quad (3.14)$$

- Bandas centrales:

$$I_{sm} = 1'00 * I_{ZA} \quad (3.15)$$

3.2.3 Metodología adoptada en la aplicación del método de la madurez para la actualización de las características mecánicas de los forjados

El último paso para completar el cálculo de la deformación de los forjados bajo carga unitaria es el establecimiento de la evolución de las características mecánicas del hormigón en función del tiempo, en concreto, de su módulo de elasticidad. Aprovechando la discusión sobre la evolución del módulo de elasticidad, se aporta también en este apartado la evolución tanto de la resistencia característica a compresión como de la resistencia característica a tracción, parámetros que son utilizados, por ejemplo, en la aplicación de la condición de descimbrado (o de autosuficiencia de los forjados).

En primer lugar, para determinar la evolución en el tiempo de las características mecánicas del hormigón se emplea el método de madurez por el que a partir de la definición del tiempo equivalente se establece qué edad tiene el hormigón respecto a unas condiciones de temperatura estándar, habitualmente 20 °C.

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left(e^{\left(13.65 \cdot \frac{4000}{273+T_i} \right) \cdot \Delta t_i} \right) \quad (3.16)$$

En el capítulo 2 se encuentra desarrollado en mayor profundidad los aspectos más teóricos del método.

Por otra parte, en aplicación de las normas EHE-08 y EC-2 puede calcularse la resistencia característica a tracción para el tiempo equivalente. La resistencia característica a tracción (útil para ser utilizada en la condición de descimbrado) se calcula según las siguientes expresiones:

- Si $j < 28$ días:

$$f_{ctk} = 0.7 * f_{ctm,28} * e^{\left(s * \left(1 - (28/j)^{0.5} \right) \right)}$$

- Si $j \geq 28$ días:

$$f_{ctk} = 0.7 * f_{ctm,28} * \sqrt[3]{ \left[e^{\left(s * \left(1 - (28/j)^{0.5} \right) \right) } \right]^2 }$$

Además, puede calcularse la resistencia media a compresión de un hormigón en función del tiempo (tiempo equivalente en este caso) según la siguiente expresión:

$$f_{cm,j} = b_{cc} * f_{cm,28} = f_{cm,28} * e^{\left(s * \left(1 - (28/j)^{0.5} \right) \right)} \quad (3.17)$$

A partir de la resistencia media a compresión correspondiente tanto al tiempo equivalente como a 28 días, puede calcularse el módulo de elasticidad para el tiempo equivalente. En este caso, ambas

normativas difieren en cuanto al valor final y su evolución en función del tiempo siguiendo expresiones distintas para cada caso:

- Según la EHE-08:

$$E_{cm,28} = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{cm,28}} \quad (3.18)$$

- Según el EC-2:

$$E_{cm,28} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm,28}}{10}\right)^{0.3} \quad (3.19)$$

Analizando ambas expresiones se puede comprobar que la evolución del módulo de elasticidad según el EC-2 es más rápida que la especificada por la EHE-08, permitiendo a los forjados adoptar de una mayor rigidez de forma más rápida, y por tanto asumiendo más carga en detrimento de la carga asumida por los puntales. Por lo tanto, ante la disparidad de criterios seguidos por ambas normativas y las distintas distribuciones de cargas entre forjados y puntales obtenidas consecuentemente, en la aplicación informática está previsto que el usuario pueda elegir qué criterio utilizar, si el del EC-2 o el especificado por la EHE-08.

3.3 Desarrollo del cuerpo principal de la aplicación informática

Antes de describir cual ha sido el desarrollo del cuerpo principal de la aplicación informática que calculará y comprobará un proceso de cimbrado/descimbrado determinado proporcionado como dato de entrada, cabe destacar que en la aplicación informática se han considerado procesos de cimbrado/descimbrado habituales y coherentes, es decir, se ha fijado la secuencia de operaciones constructivas una vez conocido el tipo de proceso de cimbrado/descimbrado (CD, CCD o CRD), el número de plantas consecutivas cimbradas (npcc) y los tiempos de cada una de las operaciones constructivas. Así pues, en la siguiente tabla (Tabla 3.8), se expone a modo de ejemplo como se consideran las operaciones constructivas para un edificio de 3 plantas con 2 plantas consecutivas cimbradas.

El módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, comienza con la lectura de los datos desde archivos .txt. Una vez cargados los datos en el programa se calculan los diagramas de momentos de todas las bandas del edificio en función del tipo de vano y de la continuidad del mismo. Así, calculando en primer lugar los diagramas de momentos bajo carga unitaria, puesto que son valores contantes e independientes del instante de tiempo considerado, se aumenta el rendimiento del cálculo al no incorporar su cálculo con el resto del algoritmo.

A partir de los datos y del diagrama de momentos, la aplicación llama a una subrutina que se encarga de proceder al cálculo de la distribución de cargas entre forjados y puntales según el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) y a la realización de las comprobaciones oportunas según las condiciones de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados. Una vez situados dentro de esta subrutina, el cálculo se redirige en función del proceso considerado (CD, CCD o CRD) y del número de plantas consecutivas cimbradas de tal forma que la aplicación conoce ya la secuencia de las operaciones constructivas.

Tabla 3.8 Ejemplo de secuencia de operaciones constructivas seguida por la aplicación informática para el caso de un edificio de 3 plantas con 2 plantas consecutivas cimbradas

	Proceso CD	Proceso CCD	Proceso CRD
Hormigonado forjado 1	Operación 1	Operación 1	Operación 1
Operación flotante forjado 1 (Clareado o Recimbrado)		Operación 2	Operación 2
Hormigonado forjado 2	Operación 2	Operación 3	Operación 3
Operación flotante forjado 2 (Clareado o Recimbrado)		Operación 4	Operación 4
Descimbrado forjado 1	Operación 3	Operación 5	Operación 5
Hormigonado forjado 3	Operación 4	Operación 6	Operación 6
Operación flotante forjado 3 (Clareado o Recimbrado)		Operación 7	Operación 7
Descimbrado forjado 2	Operación 5	Operación 8	Operación 8
Descimbrado forjado 3	Operación 6	Operación 9	Operación 9

Conocida la secuencia y el tiempo entre cada una de las operaciones constructivas, la aplicación comienza, operación constructiva por operación constructiva, con el cálculo de las deformaciones de los distintos forjados y de los puntales situados en las distintas plantas bajo carga unitaria, para proceder al cálculo de las cargas asumidas por los forjados, y por equilibrio, aquellas asumidas por los puntales. Tras cada una de las distribuciones de cargas calculadas correspondientes a cada operación constructiva, se realizan las comprobaciones de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados con el objetivo de comprobar la validez de los resultados obtenidos. En caso de no cumplir con la condición, el proceso se detiene tratándose de un proceso de cimbrado/descimbrado no válido. En caso de cumplirla, el proceso continúa con la siguiente operación hasta terminar la construcción del edificio.

Calculado todo el proceso, si la comprobación ha resultado positiva, se guardan los resultados (cargas asumidas por los puntales y por los forjados en cada una de las operaciones constructivas, así como las comprobaciones realizadas) en un archivo .txt.

CAPÍTULO 4. EJEMPLO DE FUNCIONAMIENTO DE LA NUEVA APLICACIÓN INFORMÁTICA

4.1 Introducción

Con el objeto de estudiar el correcto funcionamiento de la nueva aplicación informática, se utilizará, en primer lugar, una estructura de un edificio experimental a escala real que se construyó en las instalaciones del ICITECH de la Universidad Politécnica de Valencia. En este caso la obra se adapta a las exigencias del ensayo y no al revés, alejándose de la gran complejidad que implica adaptar las exigencias de organización y control que requiere un ensayo experimental a los ritmos y procesos en obra. Esto permite aumentar el número y calidad de variables controladas y, hasta cierto punto, aislar los efectos de cada una de ellas. Con este edificio se comprobará el correcto funcionamiento de la aplicación informática, comparando los resultados obtenidos con aquellos obtenidos por Calderón et al (2011) para la validación del nuevo método simplificado, en los que se comparaban los resultados del nuevo método simplificado con los resultados experimentales, los del modelo de elementos finitos de Alvarado (2009), y los obtenidos por otros métodos simplificados, Duan y Chen (1995) y Fang et al (2001) (véanse las Fig. 2.9 a 2.12 del Capítulo 2). Así, de esta forma se validarán todas las hipótesis adoptadas para la aplicación del nuevo método simplificado de Calderón et al (2011) en la nueva aplicación informática, y podrá continuarse en posteriores capítulos con la optimización de los procesos de cimbrado/descimbrado de edificios.

Para ello, en primer lugar se realizará una descripción de la estructura, del proceso de constructivo seguido y del sistema de cimbrado utilizado para más tarde aprovechar todo lo expuesto como datos necesarios de entrada para la aplicación informática. Una vez obtenidos los resultados para este edificio en concreto, se compararán con los ya obtenidos por Calderón et al (2011), así como los obtenidos de forma experimental, por el modelo de elementos finitos y según los métodos simplificados por Duan y Chen (1995) y Fang et al (2001).

4.2 Descripción de la estructura

El edificio experimental consiste en 3 forjados resueltos mediante una losa de hormigón armado de 25 cm. de canto, siendo la luz entre ejes de pilar de 6.00 m. Los forjados se sostienen sobre cuatro pilares de sección rectangular y tienen un voladizo de 1.80 m. La altura entre plantas es de 3 m (2.88 libres). El proceso constructivo planteado se basa en mantener dos plantas consecutivas apuntaladas, y adicionalmente en el forjado 3 se aplicó una carga similar al peso propio de otro forjado, buscando simular tres plantas consecutivas apuntaladas.

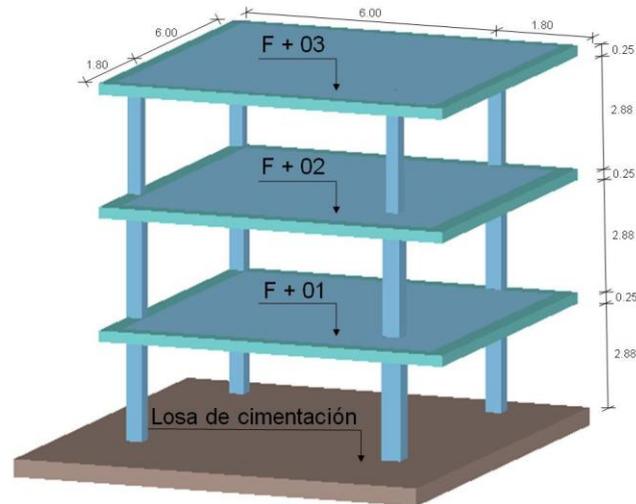


Fig. 4.1 Vista 3D del edificio

Los materiales empleados en la construcción del edificio fueron:

- ✓ El hormigón de los forjados y de la losa de cimentación: HA-25/B/20/I y presenta, por tanto, las siguientes características:
 - Resistencia característica a compresión: 25 MPa.
 - Consistencia: Blanda.
 - Tamaño máximo de árido: 20 mm.
 - Clase general de exposición: I (interior de edificios). Para la losa de cimentación, la clase general de exposición es IIa (elementos enterrados o sumergidos).
- ✓ Acero para armar: B-500-S.

4.3 Proceso constructivo

El proceso constructivo que se adoptó en la construcción de dicho edificio experimental fue el siguiente:

- ✓ Cimentación: construcción de una losa de cimentación, incluyendo cuatro soportes de hormigón armado.
- ✓ Día "0": una vez hormigonada la losa de cimentación y los pilares de la planta baja, se instaló el sistema de cimbrado y encofrado para el hormigonado del primer forjado (véase Fig. 4.2).

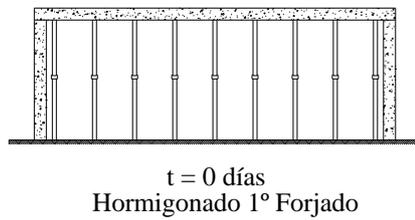


Fig. 4.2 Proceso constructivo día "0"

- ✓ Día "3": al cabo de tres días del hormigonado del primer forjado, se procedió a la retirada de fondos de encofrado y al clareado de puntales (véase Fig. 4.3). A partir del día "3", se inició la ejecución de los pilares de la primera planta y la instalación del sistema de encofrado y cimbrado del segundo forjado.

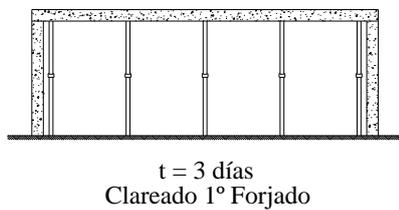


Fig. 4.3 Proceso constructivo día "3"

- ✓ Día "7": una vez preparado el sistema de encofrado y cimbrado de la segunda planta se ejecutó su hormigonado (véase Fig. 4.4).

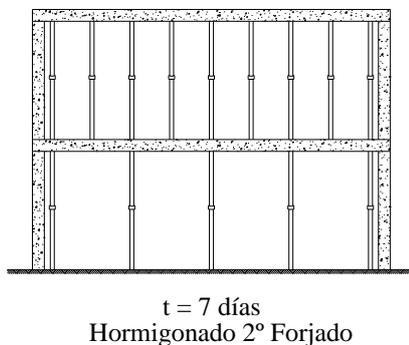


Fig. 4.4 Proceso constructivo día "7"

- ✓ Día “13”: transcurridos seis días del hormigonado del segundo forjado, se retiraron los fondos de encofrado y se realizó el clareado de puntales (véase Fig. 4.5).

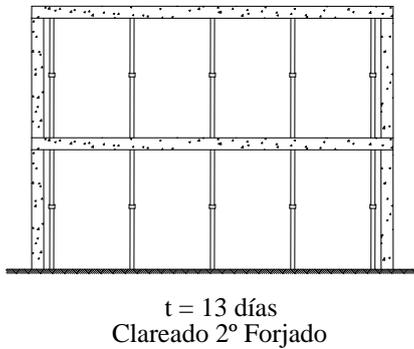


Fig. 4.5 Proceso constructivo día “13”

- ✓ Día “14”: en esta fase se procedió al descimbrado total de la primera planta (véase Fig. 4.6).



Fig. 4.6 Proceso constructivo día “14”

- ✓ Día “17”: una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procedió a hormigonar el tercer forjado (véase Fig. 4.7).

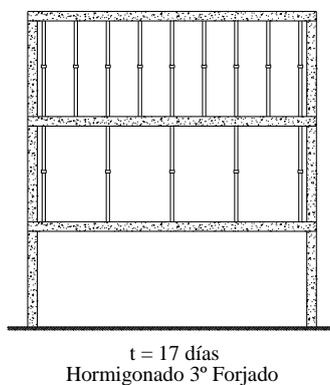


Fig. 4.7 Proceso constructivo día “17”

- ✓ Día “20”: en esta fase se procedió al clareado de puntales de la tercera planta (véase Fig. 4.8).

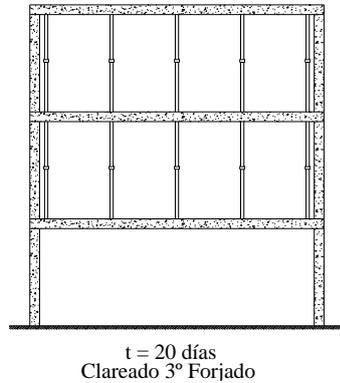


Fig. 4.8 Proceso constructivo día “20”

- ✓ Día “24”: con el fin de simular un ciclo de construcción con tres juegos de puntales, en la tercera planta se aplicó una carga correspondiente a unos 4.0 kN/m^2 , mediante el uso de balsas de agua (véase Fig. 4.9).

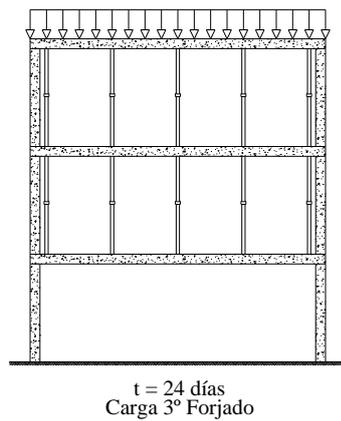


Fig. 4.9 Proceso constructivo día “24”

- ✓ Día “25”: se efectuó el descimbrado total de la segunda planta (véase Fig. 4.10).

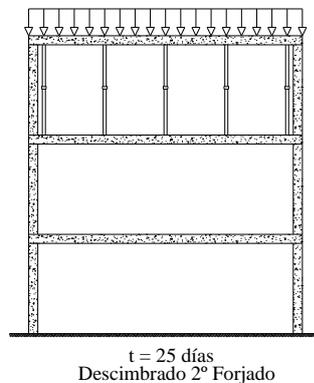


Fig. 4.10 Proceso constructivo día “25”

- ✓ Finalizado el ensayo, se retiraron las balsas de agua, y se procedió a la demolición de la estructura.

4.4 Descripción del sistema de cimbrado

Para el cimbrado de la estructura se empleó el sistema Alumecano suministrado por la empresa Encofrados J. Alsina S.A. El sistema Alumecano está formado por puntales, sopandas principales, sopandas secundarias, portasopandas y tableros de encofrado. Este sistema permite realizar la operación de clareado manteniendo siempre apuntalado el forjado. A continuación se describirán los componentes principales del sistema de cimbrado que se emplearon en la construcción del edificio experimental.

4.4.1 Puntales

Alsina dispone de puntales telescópicos con medidas comprendidas entre 1 y 6 m. El puntal empleado para el presente estudio fue el correspondiente a una altura máxima de 4 m. Este puntal está fabricado con un tubo de acero de alta calidad S275JR (ST-44). Las bases, la rosca y el pasador son también de acero, y el cuerpo y la caña del puntal están pintados con pintura de poliéster (véase Fig. 4.11). Las características geométricas y de resistencia del puntal empleado se muestran en las Tablas 4.1 y 4.2 respectivamente.

Tabla 4.1 Características geométricas del puntal empleado en el estudio experimental

Tipo de puntal	Longitud del cuerpo (m)	Diámetro del cuerpo (mm)	Espesor cuerpo (mm)	Diámetro caña (mm)	Espesor caña (mm)	Peso (Kg)
Puntal 4 m.	1.88	48	2	41	2.5	11.25

Tabla 4.2 Resistencia del puntal dependiendo de la altura de uso según datos del fabricante

Altura mínima 2.45 m.	Altura 3.20 m.	Altura máxima 4.00 m.
1750 Kg	1200 Kg	870 Kg

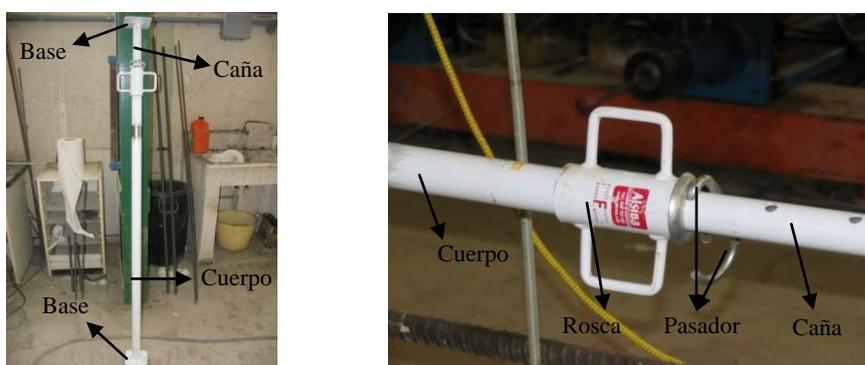


Fig. 4.11 Puntal empleado en el edificio experimental.

4.4.2 Sopandas principales

Las sopandas principales se componen de vigas de acero de sección prácticamente rectangular y de longitudes de 3 m, siendo necesario empalmar 3 sopandas debido a las dimensiones del forjado (véase Fig. 4.12). Los tableros de encofrado se apoyan sobre basculantes enganchados a la sopanda que permiten retirar dichos tableros, manteniendo así siempre el contacto entre sopandas y el forjado de hormigón. Las sopandas principales están distanciadas entre sí 2 metros (longitud del tablero) aunque se dispongan sopandas intermedias entre ellas. Su posición en los tres forjados es la indicada en la Figura 4.13.

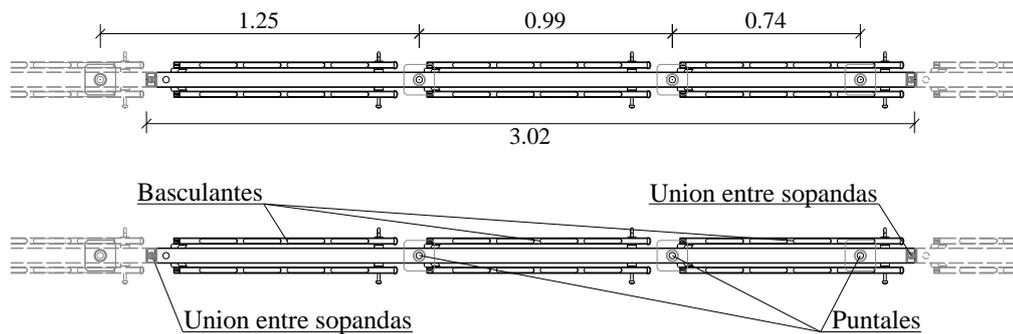


Fig. 4.12 Descripción de las sopandas principales

4.4.3 Sopandas intermedias

Su sección y dimensiones son iguales a la de las sopandas principales, pero los tableros apoyan sobre ellas de forma directa, sin ningún elemento intermedio como los basculantes. Su disposición en el forjado es la indicada en la Figura 4.13.

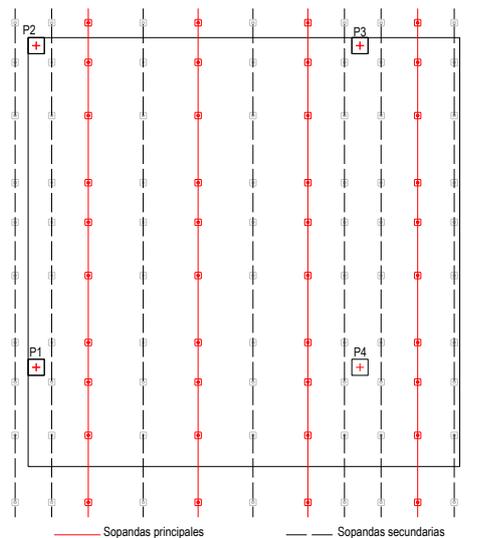


Fig. 4.13 Distribución de sopandas principales y secundarias en los forjados

4.4.4 Basculantes

Apoyan sobre las sopandas principales en dos puntos. El primero de los apoyos recae sobre un puntal mientras que el segundo se realiza mediante un pasador de acero situado cerca del siguiente puntal. Estos elementos son los que permiten la retirada de los tableros de fondo de encofrado manteniendo los puntales y las sopandas principales (véase Fig. 4.14). Están fabricados en aluminio, siendo su sección rectangular, de 2.5 x 5.0 cm.



Fig. 4.14 Extracción del basculante de las sopandas principales

4.5 Resultados del edificio experimental según la nueva aplicación informática

Antes de mostrar los resultados del cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado del edificio experimental considerado, se van a establecer una serie de consideraciones acerca del cálculo a efectuar así como exponer los datos de entrada finalmente considerados.

En primer lugar, tal y como se ha desarrollado en el apartado 3.3, en la aplicación informática se han considerado procesos de cimbrado/descimbrado habituales y coherentes, es decir, se ha fijado la secuencia de operaciones constructivas una vez conocido el tipo de proceso de cimbrado/descimbrado (CD, CCD o CRD), el número de plantas consecutivas cimbradas (npcc) y los tiempos de cada una de las operaciones constructivas. Por lo tanto, tal y como ocurre en el edificio experimental en el que a partir del clareado del forjado 3 se cambia de secuencia constructiva a una operación en la que aparecen 3 plantas consecutivas cimbradas, no se puede considerar este procedimiento como cálculo y comprobación mediante la aplicación informática. De esta forma, el proceso constructivo adoptado para el cálculo, comprobación y validación de la aplicación es un proceso idéntico al seguido en el edificio experimental hasta el día 20 (clareado del forjado 3), a partir del que se procede a descimbrar el forjado 2 y el forjado 3 como operaciones últimas para la construcción del edificio. Cabe destacar, que en el siguiente apartado, la validación de la aplicación se realizará, por tanto, para los resultados obtenidos hasta el día 20, que serán, como se ha obtenido, idénticos para todos los casos.

Tabla 4.3 Proceso de cimbrado/descimbrado introducido a la aplicación informática.

Tiempo	Operación Constructiva
t = 0 días	Hormigonado del Forjado 1
t = 3 días	Clareado del Forjado 1
t = 7 días	Hormigonado del Forjado 2
t = 13 días	Clareado del Forjado 2
t = 14 días	Descimbrado del Forjado 1
t = 17 días	Hormigonado del Forjado 3
t = 20 días	Clareado del Forjado 3
t = 24 días	Descimbrado del Forjado 2
t = 27 días	Descimbrado del Forjado 3

Conocido el proceso constructivo a calcular y comprobar, a continuación se especifican los datos de entrada a la aplicación informática considerados.

Tabla 4.4 Datos de entrada considerados (I).

Datos para cada una de las plantas		
Resistencia característica del hormigón [kPa]	Forjado 1	25000
	Forjado 2	25000
	Forjado 3	25000
Velocidad de endurecimiento del hormigón	Forjado 1	0.25
	Forjado 2	0.25
	Forjado 3	0.25
Tipo de forjado	Forjado 1	1 (losa)
	Forjado 2	1 (losa)
	Forjado 3	1 (losa)

Tabla 4.5 Datos de entrada considerados (II).

Datos para cada una de las plantas		
Canto total de la sección [m]	Forjado 1	0.25
	Forjado 2	0.25
	Forjado 3	0.25
Luz en dirección X del pórtico virtual 1x [m] (*)	Forjado 1	5.65
	Forjado 2	5.65
	Forjado 3	5.7
Luz en dirección X del pórtico virtual 2x [m] (*)	Forjado 1	5.6
	Forjado 2	5.625
	Forjado 3	5.7
Luz en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] (*)	Forjado 1	5.65
	Forjado 2	5.65
	Forjado 3	5.7
Luz en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] (*)	Forjado 1	5.6
	Forjado 2	5.625
	Forjado 3	5.7
Voladizo en dirección X sentido B del pórtico virtual 1x [m] (*)	Forjado 1	1.8
	Forjado 2	1.8
	Forjado 3	1.8
Voladizo en dirección X sentido B del pórtico virtual 2x [m] (*)	Forjado 1	1.8
	Forjado 2	1.8
	Forjado 3	1.8

Tabla 4.6 Datos de entrada considerados (III).

Datos para cada una de las plantas		
Voladizo en dirección Y sentido B del pórtico virtual 1y [m] (*)	Forjado 1	1.8
	Forjado 2	1.8
	Forjado 3	1.8
Voladizo en dirección Y sentido B del pórtico virtual 2y [m] (*)	Forjado 1	1.8
	Forjado 2	1.8
	Forjado 3	1.8
Altura libre entre plantas [m]	Forjado 1	2.88
	Forjado 2	2.88
	Forjado 3	2.88
Sobrecarga [kN/m ²]	Forjado 1	0.0
	Forjado 2	0.0
	Forjado 3	0.0
Carga permanente de proyecto [kN/m ²]	Forjado 1	7.0
	Forjado 2	7.0
	Forjado 3	7.0
Sobrecarga de uso de proyecto [kN/m ²]	Forjado 1	4.0
	Forjado 2	4.0
	Forjado 3	4.0
Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado		
Separación de sopandas [m]	Forjado 1	1.0
	Forjado 2	1.0
	Forjado 3	1.0

Tabla 4.7 Datos de entrada considerados (IV).

Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado		
Separación de puntales [m]	Forjado 1	1.2
	Forjado 2	1.2
	Forjado 3	1.2
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado	Forjado 1	0
	Forjado 2	7
	Forjado 3	10
Tiempo de la operación constructiva de clareado	Forjado 1	3
	Forjado 2	6
	Forjado 3	3
Datos generales para todo el edificio		
Peso específico del hormigón de los forjados		22.56
Temperatura ambiente considerada		20
Tipo de vano (*)		1 (esquina)
Continuidad del vano (*)		0 (Sin continuidad)
Número de plantas		3
Módulo de elasticidad del acero de los puntales		210000000
Coeficiente de seguridad en construcción frente a cargas permanentes		1.25
Coeficiente de seguridad en construcción frente a sobrecargas		1.25
Coeficiente de seguridad de diseño frente a cargas permanentes		1.35
Coeficiente de seguridad de diseño frente a sobrecargas		1.5
Tiempo necesario para que los trabajadores realicen la operación de descimbrado y recolocación de elementos en una nueva planta		3

Tabla 4.8 Datos de entrada considerados (V).

Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado	
Tipo de proceso de cimbrado/descimbrado [CD, CCD o CRD]	2 (CCD)
Porcentaje de clareado	50
Número de platas consecutivas cimbradas	2
Sección de acero de los puntales empleados	0.000289027

^(*) Consúltese la Fig. 3.7 para completar la definición de cada uno de estos datos

Tras la consideración de los datos expuestos en la anterior tabla es momento de decidir qué criterio utilizar para la evolución del módulo de elasticidad del hormigón en función del tiempo ya que, como se ha visto en el apartado 3.2.3, se pueden adoptar las expresiones marcadas por la EHE-08 o las marcadas por el EC-2. Adicionalmente, en la tesis doctoral de Alvarado (2009), se obtuvo la evolución exacta del módulo de elasticidad del hormigón a través de ensayos experimentales y en aplicación del método de la madurez. Para más detalle se puede consultar el apéndice 2. Por lo tanto, en este caso se usa dicha evolución del módulo de elasticidad para mayor exactitud de los cálculos realizados. También cabe destacar, que la evolución marcada por el EC-2 se acerca más a la obtenida experimentalmente que la marcada por la EHE-08 como se puede observar en la siguiente figura. Por ello, preferentemente, en el resto del documento se utilizará la evolución del módulo de elasticidad marcada por el EC-2.

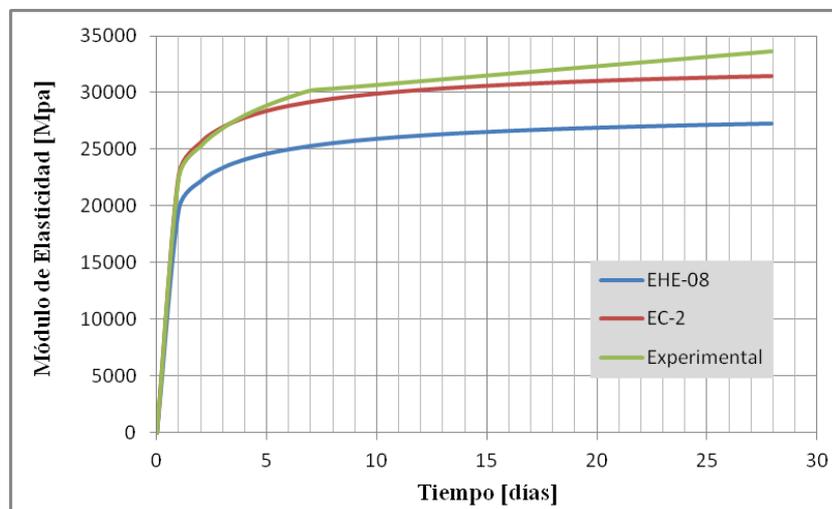


Fig. 4.15 Evolución del módulo de elasticidad experimental y según las distintas normativas.

Una vez establecidos todos los datos necesarios para la ejecución de la aplicación informática, en la siguiente tabla se presentan los resultados de la distribución de cargas entre forjados y puntales, así como las comprobaciones oportunas realizadas aplicando la condición de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados desarrollada en este documento. Los resultados se han obtenido a partir del archivo ".txt" creado por la aplicación informática al ejecutar el archivo ".exe" compilado.

Tabla 4.9 Resultados obtenidos del cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado del edificio experimental.

Operación	Forjado	Carga en forjados [kN/m ²]	Carga en puntales [kN/m ²]	Coefficiente de forjado	Coefficiente de puntales	β	$f_{ct,j}/f_{ct,28}$	$\beta \leq f_{ct,j}/f_{ct,28}$?
Hormigonado Forjado 1	1	0.00	5.64	0.00	1.00	-	-	-
Clareado Forjado 1	1	1.55	4.09	0.27	0.73	0.12	0.60	CUMPLE
Hormigonado Forjado 2	2	0.00	5.64	0.00	1.00	-	-	-
	1	3.23	8.05	0.57	1.43	0.25	0.78	CUMPLE
Clareado Forjado 2	2	2.32	3.32	0.41	0.59	0.18	0.75	CUMPLE
	1	2.56	6.40	0.45	1.13	0.20	0.89	CUMPLE
Descimbrado Forjado 1	2	4.89	0.75	0.87	0.13	0.38	0.78	CUMPLE
	1	6.39	-	1.13	-	0.50	0.90	CUMPLE
	3	0.00	5.64	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 3	2	8.16	3.12	1.45	0.55	0.63	0.84	CUMPLE
	1	8.76	-	1.55	-	0.68	0.93	CUMPLE
	3	2.56	3.08	0.45	0.55	0.20	0.60	CUMPLE
Clareado Forjado 3	2	6.68	2.04	1.18	0.36	0.52	0.89	CUMPLE
	1	7.68	-	1.36	-	0.60	0.96	CUMPLE
Descimbrado Forjado 2	3	3.36	2.28	0.60	0.40	0.26	0.78	CUMPLE
	2	7.92	-	1.40	-	0.61	0.93	CUMPLE
Descimbrado Forjado 3	3	5.64	-	1.00	-	0.44	0.93	CUMPLE

Como se puede observar, como resultados se han obtenido las cargas asumidas por los forjados y puntales para cada una de las operaciones, los coeficientes de forjado y de puntales que consisten en unos valores que expresan la proporción de carga asumida respecto a la carga de uno de los forjados (los coeficientes valen 1 cuando la carga asumida por los forjados o puntales coincide con la carga de 5.64 kN/m², igual al peso propio de uno de los forjados), y finalmente la verificación a través de la condición de descimbrado o de autosuficiencia de forjados de cada uno de los forjados para cada una de las operaciones.

Con los resultados obtenidos de la aplicación informática se ha podido calcular la distribución de cargas entre forjados y puntales así como comprobar que el proceso constructivo planteado cumple con la condición de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados. Por lo tanto, el proceso de cimbrado/descimbrado del edificio experimental planteado es válido según los cálculos llevados a cabo por la aplicación informática.

Llegados a este punto, aunque los resultados siguen una cierta lógica, lo cierto es que no se conoce si los resultados mostrados son correctos o no. Por lo tanto, en el siguiente apartado se realiza una comparación con los resultados obtenidos por Calderón et al (2011) para el edificio experimental estudiado.

4.6 Comparación de resultados y validación de la nueva aplicación informática

Como se ha comentado, para llevar a cabo una verificación del correcto funcionamiento de la aplicación informática es necesario establecer una comparación de los resultados obtenidos con los resultados que se consideran correctos. Para ello se han tomado como referencia los resultados obtenidos por Calderón et al (2011) en donde se obtienen los resultados para este mismo edificio aplicando las siguientes herramientas:

- De forma experimental según los resultados obtenidos por Alvarado (2009).
- Aplicando el método de los elementos finitos utilizado por Alvarado (2009).
- Con la aplicación del nuevo método simplificado propuesto por Calderón et al (2011) con la ayuda de una hoja de cálculo particularizada para este edificio concreto. La nueva aplicación informática utilizada en este trabajo, en cambio, pretende darle generalidad al método considerando una serie de hipótesis simplificadoras, para ser aplicado a cualquier edificio para cualquier proceso de cimbrado/descimbrado.
- Con la aplicación de método simplificado por Duan y Chen (1995).
- Con la aplicación del método simplificado por Fang et al (2001).

Si se toma como referencia la carga calculada para los puntales en las diversas operaciones constructivas hasta el día 20 (clareado del forjado 3) ya que, como se ha comentado, mediante la aplicación informática solo se puede tener en cuenta la secuencia de operaciones seguidas hasta este día, la comparación de resultados se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 4.10 Comparación de resultados de la carga asumida por los puntales en el edificio experimental estudiado según los distintos métodos de cálculo y las medidas experimentales realizadas.

Operación	Forjado	Carga en puntales [kN/m ²]					
		Nueva aplicación informática	Experimental	MEF	Calderón et al (2011)	Duan y Chen (1995)	Fang et al (2001)
Hormigonado Forjado 1	1	5.64	5.64	5.52	5.64	5.64	5.64
Clareado Forjado 1	1	4.09	3.07	3.41	4.23	4.51	4.62
Hormigonado Forjado 2	2	5.64	5.6	5.80	5.64	5.64	5.64
	1	8.05	4.48	6.60	8.36	8.91	8.97
Clareado Forjado 2	2	3.32	2.91	2.90	3.48	4.40	3.84
	1	6.40	3.86	5.33	6.47	7.90	7.5
Descimbrado Forjado 1	2	0.75	1.57	1.39	1.02	0.79	0.68
	1	-	-	-	-	-	-
Hormigonado Forjado 3	3	5.64	5.5	5.80	5.64	5.64	5.64
	2	3.12	3.07	3.04	3.12	3.33	3.21
Clareado Forjado 3	1	-	-	-	-	-	-
	3	3.08	3.12	2.77	3.08	3.27	3.27
	2	2.04	2.78	2.19	2.02	2.26	2.14
	1	-	-	-	-	-	-

Como se puede observar, el orden de magnitud de las cargas obtenidas para los puntales por la nueva aplicación informática, tras la adopción de todas las hipótesis consideradas en este documento, es correcto. Además, si se comparan los resultados con el resto de cálculos realizados se puede observar que la magnitud obtenida por la nueva aplicación es adecuada y muy cercana a los resultados predichos por otros métodos y a los resultados medidos experimentalmente.

De hecho, si ahora se realiza una comparación de todos los métodos de cálculo respecto a los valores experimentales (supuestos como valores objetivo), se puede observar el ajuste de los distintos métodos a las medidas experimentales. Para ello, tal y como Calderón et al (2011) realizan para validar su método simplificado, se considera el ajuste de cada uno de los métodos a las medidas experimentales a partir del parámetro [Valor experimental/Valor del método]. A partir de este valor para cada uno de los forjados y cada una de las operaciones constructivas, se pueden obtener los estadísticos característicos, como pueden ser el valor promedio y la desviación típica. Así, de esta forma se puede

obtener que aquel método que tenga un promedio más cercano a uno con una desviación típica más reducida, será un buen método ya que se ajusta a las medidas experimentales.

Además, en este trabajo se considera interesante considerar, adicionalmente, otro parámetro que evalúe la suma de errores en valor absoluto, cometidos por cada uno de los métodos respecto a las medidas experimentales, de tal forma que se obtenga un valor absoluto de la desviación de los resultados de cada uno de los métodos.

$$\text{Suma errores} = \sum_{i=0}^{i=n} |\text{Valor del método}(i) - \text{Valor experimental}(i)| \quad (4.1)$$

En donde el índice "i" indica la fila con valor de la tabla anterior y n es el número de filas con valor totales (el valor de n es 11).

De esta forma, los resultados del parámetro [Valor experimental/Valor del método] y de los estadísticos que caracterizan el ajuste de cada uno de los métodos a las medidas experimentales se observan en la siguiente tabla.

Tabla 4.11 Comparación de resultados y validación basada en parámetros estadísticos de la nueva aplicación informática.

		(Puntales Experimental) / (Puntales Método)				
Operación	Forjado	Nueva aplicación informática	MEF	Calderón et al (2011)	Duan y Chen (1995)	Fang et al (2001)
Hormigonado	Forjado 1	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00
Clareado	Forjado 1	0.75	0.90	0.73	0.68	0.66
Hormigonado	Forjado 2	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99
		0.56	0.68	0.54	0.50	0.50
Clareado	Forjado 2	0.88	1.00	0.84	0.66	0.76
		0.60	0.72	0.60	0.49	0.51
Descimbrado	Forjado 1	2.09	1.13	1.54	1.99	2.31
		-	-	-	-	-
Hormigonado	Forjado 3	0.98	0.95	0.98	0.98	0.98
		0.98	1.01	0.98	0.92	0.96
		-	-	-	-	-
Clareado	Forjado 3	1.01	1.13	1.01	0.95	0.95
		1.36	1.27	1.38	1.23	1.30
		-	-	-	-	-
PROMEDIO		1.02	0.98	0.96	0.95	0.99
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.42	0.17	0.30	0.42	0.50
SUMA ERRORES		9.36	5.71	9.80	13.29	12.61

En primer lugar, es evidente que mediante cálculos complejos, como lo son los cálculos realizados por el método de los elementos finitos, exista un ajuste a las medidas experimentales muy bueno con una desviación típica muy reducida. Sin embargo, si se establecen comparaciones con este tipo de cálculo no se compite con las mismas condiciones ya que el resto de métodos son métodos que afrontan el cálculo de forma simplificada y sin la utilización de software estructural específico. Por lo tanto, es interesante comparar los resultados entre los distintos métodos simplificados, dejando de lado los realizados por el método de los elementos finitos que, como se ha visto, proporcionan un excelente ajuste.

Respecto a la comparación entre los métodos simplificados por Calderón et al (2011), Duan y Chen (1995) y Fang et al (2001), se puede observar que el ajuste es muy bueno en los tres casos. Sin embargo, la significativa menor desviación típica que presenta el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011), hace que este método sea mejor que los otros dos, siendo el método elegido para su consideración en la nueva aplicación informática.

Respecto a la comparación incluyendo los resultados obtenidos por la nueva aplicación informática, en primer lugar, observando el promedio y la desviación típica obtenida para cada uno de los métodos simplificados, se observa que en promedio, la nueva aplicación informática obtiene unos resultados igual o mejor que el resto de métodos simplificados. Respecto a la desviación típica obtenida por la aplicación, aunque es mayor que la del nuevo método simplificado por Calderón et al (2011), está por debajo de la desviación típica del método simplificado de Fang et al (2001) y es del mismo valor que la del método simplificado por Duan y Chen (1995), aunque respecto a este último presenta mejor valor promedio. Es evidente que el valor promedio y la desviación típica dan una idea acertada del grado de ajuste de los resultados obtenidos con respecto a las medidas experimentales, sin embargo no se considera el error absoluto cometido en cada una de las operaciones que pueda llegar a ser menor o mayor que en el resto de métodos.

Por ello, el siguiente parámetro analizado en este documento es la suma de errores cometidos por cada uno de los métodos tal y como se ha definido anteriormente. Así, de esta forma, salvo el error más pequeño constatado por el método de los elementos finitos, en la nueva aplicación informática se constata unos errores menores en comparación con el resto de métodos simplificados. Incluso cabe destacar, que aunque por el resto de estadísticos utilizados (promedio y desviación típica) se podría afirmar que el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) comete menor error, comprobando el valor absoluto se observa que el menor error constatado para un método simplificado de cálculo lo presenta la nueva aplicación informática. También es notable la significativa diferencia que tienen tanto los errores calculados para la nueva aplicación informática como para el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011), con respecto a los mayores errores constatados por el resto de métodos simplificados utilizados en la comparación, Fang et al (2001) y Duan y Chen (1995).

Por lo tanto, cabe destacar las deficiencias que tiene considerar el grado de ajuste de un método a partir simplemente del promedio y la desviación típica obtenida, ya que podría darse el caso de que cometiendo graves errores con valores muy por encima y muy por debajo de uno, el valor promedio fuera un valor cercano a uno, y valores con desviación típica "reducida" que no aciertan en ninguna operación constructiva cometiendo errores en todas ellas, no significarían por tanto el buen ajuste de los resultados. Por lo tanto, aunque es evidente que estos dos estadísticos son buenos indicadores, añadir el error absoluto cometido proporciona más información como se ha podido comprobar.

Por lo tanto, teniendo en cuenta esta última consideración y observando un buen promedio (1.02), una aceptable desviación típica (0.42) y una suma de errores muy reducida (9.36) por debajo del resto de métodos simplificados considerado, se puede afirmar que la nueva aplicación informática funciona correctamente, por lo que queda validado su correcto funcionamiento para continuar con el trabajo a desarrollar en el presente trabajo final de máster. Adicionalmente, la aplicación informática está basada en el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) que presenta un muy buen

promedio, una desviación típica y suma de errores reducidas en comparación con el resto de métodos simplificados considerados, desarrollados y planteados por Duan y Chen (1995) y Fang et al (2001).

CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL MEJOR PROCESO DE CIMBRADO/DESCIMBRADO DE EDIFICIOS EN ALTURA HORMIGONADOS IN SITU

A partir de la validación de la nueva aplicación informática para el cálculo de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, en este capítulo se presenta la opción que se va a incorporar a la aplicación a partir de la que se obtendrán procesos óptimos sin la necesidad de plantear un proceso de cimbrado/descimbrado por parte del usuario que, para ello, necesitaría de cierta experiencia para plantear un proceso más o menos óptimo.

Para ello, en primer lugar se define el problema de la optimización planteando los parámetros o datos a considerar, las variables de diseño, las restricciones y la función objetivo. Seguidamente se empezará con la implementación de la optimización en la nueva aplicación informática para la que se considerará la evaluación de todo el campo de soluciones y se obtendrán los resultados correspondientes al edificio experimental planteado en el anterior capítulo. A continuación se plantearán diversos métodos de optimización heurística como lo son los algoritmos de saltos múltiples aleatorios, gradiente o cristalización simulada. Finalmente, con los resultados de cada uno de los algoritmos se establecerá una comparación de resultados y una estimación de los tiempos de cálculo de cada uno de ellos con los que poder obtener conclusiones acerca de ellos.

El objetivo que se quiere conseguir es que la nueva aplicación informática, además de seguir el diagrama de flujo considerado en la Fig. 3.1 , sea capaz de ir buscando y evaluando soluciones cada vez más óptimas hasta encontrar la solución más óptima o una cercana a ésta.

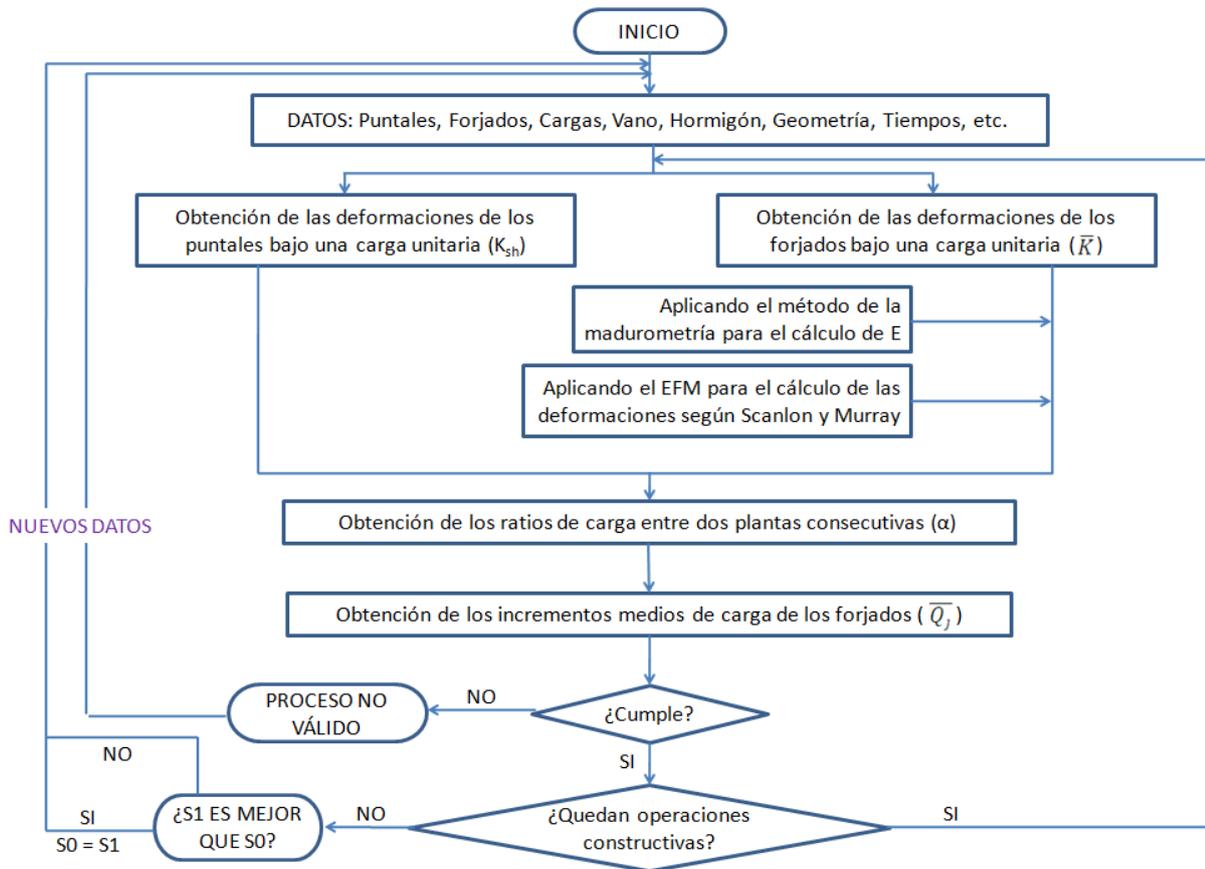


Fig. 5.1 Diagrama de flujo establecido para la búsqueda de soluciones óptimas.

5.1 Definición del problema de optimización

Un problema de optimización se puede dividir en 4 bloques:

- Parámetros o datos del problema.
- Variables a considerar y valores establecidos para cada una de las variables.
- Restricciones a cumplir.
- Función objetivo.

Además, si se presta atención a cómo son los procesos de cimbrado/descimbrado de edificios, se podrá observar que los procesos pueden ser CD, CCD o CRD. Adicionalmente, el usuario de la aplicación puede tener preferencia por un tipo de proceso o por otro. Por lo tanto, se incorpora una opción a la nueva aplicación informática por la que se decide qué tipos de procesos se consideran en la optimización.

5.1.1 Parámetros o datos del problema

Tal y como ha quedado reflejado en el capítulo anterior, los parámetros del problema que deben considerarse para alimentar a la nueva aplicación informática son los reflejados en las tablas 4.4 a 4.8. De esta tabla habría que descartar aquellos correspondientes al proceso de cimbrado/descimbrado ya que constituirán las variables a considerar en el proceso de optimización. Tanto estas variables como los valores posibles a adoptar para cada una de las variables se mostrarán en apartados posteriores.

Adicionalmente, como se ha comentado en el anterior apartado se incorpora una opción que debe ser aportada como dato de entrada en donde el usuario puede escoger qué tipo de procesos se consideran en la optimización:

- optCD: 1 si se considera este proceso y 0 si no se considera.
- optCCD: 1 si se considera este proceso y 0 si no se considera.
- optCRD: 1 si se considera este proceso y 0 si no se considera.

5.1.2 Variables a considerar en la optimización

Como se ha comentado, las variables a considerar corresponden con las relativas al proceso de cimbrado/descimbrado de edificios. Adicionalmente, se deben establecer los distintos valores que pueden adoptar cada una de las variables con tal de que los algoritmos de optimización empiecen a probar distintos procesos de cimbrado/descimbrado. En la siguiente tabla (Tabla 5.1) se pueden observar tanto las variables consideradas como los valores que pueden adoptar cada una de ellas en la optimización.

Por lo tanto, como se puede observar aparecen $(5+4*n)$ variables distintas a las que se ha proporcionado distinto número de valores posibles. El número de soluciones totales combinando todas las posibles soluciones y expresándolo en función del proceso considerado se obtiene a partir de las siguientes expresiones:

- Soluciones totales CD: $4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)}$
- Soluciones totales CCD: $3 * 4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} * 6^n$
- Soluciones totales CRD: $2 * 4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} * 8^n$

Para obtener las expresiones anteriores se ha considerado:

- Que la separación de sopandas se mantiene para todas las plantas con tal de transmitir las cargas en vertical por la misma línea y no introducir esfuerzos de cortante en los forjados.
- Que el hormigonado del forjado 1 se produce en el día "0" y por tanto no es una variable que se introduzca en el proceso de optimización.

Tabla 5.1 Variables consideradas en el proceso de optimización.

Variables	Valores	Variables	Valores
Proceso [proceso]	1 (CD)	Tiempo de la operación constructiva de hormigonado desde el hormigonado del forjado anterior, para cada uno de los forjados [toch(i)]	5 (días)
	2 (CCD)		6 (días)
	3 (CRD)		7 (días)
Porcentajes de clareado [porcentaje]	50		8 (días)
	33		9 (días)
	66		10 (días)
Porcentajes de recimbrado [porcentaje]	100		11 (días)
	50		12 (días)
Número de plantas consecutivas cimbradas [npcc]	1		13 (días)
	2		14 (días)
	3		2 (días)
	4	3 (días)	
Separación de sopandas (Forjado tipo losa) [ss]	1 m	Tiempo de la operación constructiva de clareado desde el hormigonado del forjado en cuestión, para cada uno de los forjados [tocfc(i)]	4 (días)
	2 m		5 (días)
	3 m		6 (días)
Separación de sopandas (Forjado tipo reticular) [ss]	1*snerv (m)		7 (días)
	2*snerv (m)		2 (días)
	3*snerv (m)		3 (días)
Separación de puntales para cada uno de los forjados [sp(i)]	1 m	Tiempo de la operación constructiva de recimbrado desde el hormigonado del forjado en cuestión, para cada uno de los forjados [tocfr(i)]	4 (días)
	0.5 m		5 (días)
	2 m		6 (días)
Área de los puntales [Ap]	2.89 cm ²		7 (días)
			8 (días)
			9 (días)

5.1.3 Restricciones a cumplir

Como restricciones a cumplir se han introducido parte de ellas dentro de los posibles valores a adoptar para cada una de las variables, como por ejemplo que no se puede producir un clareado de un forjado antes de los 2 días o que no se pueden hormigonar dos forjados consecutivos sin el paso de al menos 5 días. Se han tomado estos criterios, en base a la experiencia y a las recomendaciones de tiempos mínimos establecidos en el capítulo 2, como medidas de seguridad para que la aplicación informática no adopte procesos constructivos que podrían no ser del todo indicados en la realidad.

Por otra parte, tal y como ha quedado desarrollado hasta el momento, aparecen en el cálculo del método simplificado utilizado por la aplicación informática, las distintas comprobaciones realizadas de los procesos a partir de la condición de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados. Esta condición también supone una restricción a la solución puesto que de no cumplirse para algún forjado de alguna de las operaciones constructivas, el proceso de optimización no debería considerar este proceso como posible solución.

Con estos dos paquetes de restricciones son con las que operan los procesos de optimización de la nueva aplicación informática.

5.1.4 Función objetivo

Como función objetivo se pueden adoptar cualquier tipo de función que evalúe alguna o varias de las características de los edificios y que permita establecer a partir de los resultados de dicha función, un objetivo claramente definido que puede ser maximizar o minimizar el resultado de dicha función.

Como funciones objetivo se pueden establecer las siguientes:

- Coste económico del proceso de cimbrado/descimbrado.
- El plazo constructivo del edificio.
- La sostenibilidad.
- La facilidad constructiva.
- La seguridad estructural del proceso constructivo.
- Una combinación de varias de las funciones anteriores.

Para el desarrollo del presente trabajo final de máster se ha considerado únicamente como función objetivo el coste económico de las soluciones adoptadas por los algoritmos de optimización. Para la evaluación de los costes de los distintos procesos de cimbrado/descimbrado evaluados, se ha tenido en cuenta el precio de amortización o de alquiler (en este caso alquiler) de los elementos del sistema de apuntalamiento. Se estima el precio de cada uno de los elementos según los siguientes valores:

- Alquiler de los puntales: $\text{costep} = 0'07 \text{ €/}(\text{puntal} \cdot \text{día})$ [Buitrago (2012) a partir de la consulta a empresas de alquiler]
- Alquiler de los fondos de encofrado: $\text{costee} = 0'05 \text{ €/}(\text{m}^2 \cdot \text{día})$ [Estimación realizada en función de la vida útil considerada y de la consulta a la base de precios del IVE].

- Alquiler de las sopandas: $\text{costes} = 0'01 \text{ €/m}^2 \text{ de edificio} \cdot \text{día}$ [Estimación realizada en función de la vida útil considerada y de la consulta a la base de precios del IVE]

No se considera, en este trabajo final de máster, el precio de la mano de obra necesaria, en parte porque es proporcional al número de elementos a instalar y la optimización, aunque trabajando con valores más altos de costes, se dirigiría a la obtención de las mismas soluciones. Para considerar los posibles costes diferenciadores en cuanto a mano de obra que podría ocasionar el sistema de recimbrado al necesitar realizar el descimbrado del forjado y volver a ubicar los mismos puntales otra vez en el mismo forjado, se ha considerado una imputación de costes para este sistema (CRD) que consiste en imputar el coste de reinstalación de los puntales en cada una de las plantas. Para ello, la subrutina que evalúa el coste, calcula el número de puntales reinstalados por m^2 de edificio en función del porcentaje de recimbrado de la solución. A través de la consideración de un coste asociado a la reinstalación de un puntal en un sistema de recimbrado, puede calcularse el incremento de coste por metro cuadrado de edificio que se le debería imputar a un edificio construido a través de un sistema CRD. El coste de la mano de obra para la reinstalación de un puntal se ha estimado en 0'50 € (considerando que un operario con un sueldo de 20 €/hora (Base de precios del IVE) puede reinstalar 40 puntales en una operación de recimbrado en una hora).

A través de considerar el precio de la forma con la que se ha realizado, se está considerando a su vez las dimensiones del edificio así como el plazo constructivo del edificio y la sostenibilidad, ya que cuanto menor sea el plazo y menor sea el número de recursos utilizados, menor será el coste económico asociado al proceso de cimbrado/descimbrado.

Además, una vez comprobado que el proceso de cimbrado/descimbrado considerado es válido, se conoce consecuentemente la duración del proceso constructivo, la disposición de puntales necesarios para cada una de las operaciones (y por tanto, el número de juegos de puntales necesarios), las necesidades de sopandas y de fondos de encofrado y las dimensiones del edificio (dato de entrada). Con estos datos de entrada, la subrutina encargada de calcular el coste de las distintas soluciones obtiene el coste total del proceso de cimbrado/descimbrado expresado en €. Sin embargo, puesto que tanto el usuario como la nueva aplicación informática utilizan datos de tan solo un vano del edificio, el coste total expresado en € se escala a coste en € por m^2 de edificio con tal de poder extrapolar, a partir de este valor, el coste total en euros de todo el edificio. En los casos que se procesarán en apartados posteriores se expresará en todo momento el coste en €/m² de edificio con tal de comparar los resultados obtenidos por los distintos algoritmos y la optimización que se puede alcanzar con el empleo de la nueva aplicación informática.

Como ejemplo, se cita el edificio experimental calculado y comprobado en el capítulo 4 para el que el coste por metro cuadrado de edificio según la subrutina programada es de **4'12 €/m²**.

5.1.5 Problema estudiado

En los apartados posteriores se van a implementar los distintos algoritmos de optimización considerados: optimización completa evaluando todo el campo de soluciones y optimización heurística con los algoritmos de saltos múltiples aleatorios, gradiente y cristalización simulada. Además de la

pequeña explicación sobre el funcionamiento de cada uno de los algoritmos, se procederá al cálculo tomando como ejemplo el edificio experimental que ha servido como base de comprobación y validación de la nueva aplicación informática utilizado en el capítulo 4. Para los cálculos se ha utilizado un ordenador con las siguientes características principales: CPU Intel i7, con 4 núcleos de procesamiento (2 hilos por núcleo) a 3.3 GHz, y una RAM de 8 Gb.

5.2 Optimización completa evaluando todo el campo de soluciones

La optimización completa evaluando todo el campo de soluciones proporciona y asegura la localización del proceso de cimbrado/descimbrado más óptimo ya que comprueba todas las posibles soluciones que puedan existir según las variables y los valores de cada una de las variables proporcionados. A primera vista aparenta ser un método idóneo pero sin embargo, el esfuerzo computacional para la evaluación de todas las posibles soluciones lo convierte en un proceso de optimización lento y para algunos casos imposible de realizar por el excesivo tiempo de cálculo.

Para implementar el algoritmo de optimización completa en la nueva aplicación informática tan solo es necesario programar un generador de soluciones que vaya recorriendo todas las soluciones posibles, comprobando la adecuación de cada uno de los procesos de cimbrado/descimbrado, y guardando las soluciones cada vez que vaya encontrando una solución mejor, según la función objetivo (en este caso el coste económico), hasta terminar de evaluar todo el campo completo de soluciones. En este momento, la aplicación informática guarda en disco la mejor de las soluciones encontradas y con ella se puede entonces evaluar el proceso de cimbrado/descimbrado según las pautas seguidas en el capítulo 4, para conocer la distribución de cargas entre forjados y puntales y los valores de las comprobaciones de descimbrado o autosuficiencia de los forjados.

Para el caso concreto que se quiere estudiar, edificio de 3 plantas, el número de soluciones totales en función del proceso de cimbrado/descimbrado es el siguiente:

- Soluciones totales CD: $4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} = 10.800 \text{ soluciones}$
- Soluciones totales CCD: $3 * 4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} * 6^n = 20995200 \text{ soluciones}$
- Soluciones totales CRD: $2 * 4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} * 8^n = 33177600 \text{ soluciones}$

Si se considera un valor intermedio de cálculo de 45000 soluciones por segundo, el tiempo de cálculo necesario para cada uno de los procesos es:

- Soluciones totales CD: 0'24 segundos
- Soluciones totales CCD: 466'56 segundos = 7'78 minutos
- Soluciones totales CRD: 737'28 segundos = 12'29 minutos

Tal y como se ha evaluado, para este caso concreto es factible evaluar todo el campo de soluciones completo ya que costaría aproximadamente 20 minutos en procesarlo. Sin embargo, si se observan las expresiones en función del número de plantas, se observa que el tiempo de cálculo es claramente exponencial con el número de plantas. De hecho, a continuación se muestran los tiempos de cálculo para una solución de 30 plantas:

- Soluciones totales CD (30 plantas): 2'47E+044 segundos
- Soluciones totales CCD (30 plantas): 1'64E+068 segundos
- Soluciones totales CRD (30 plantas): 6'12E+071 segundos

En total serían necesarios aproximadamente 2E+062 siglos para evaluar todo el campo de soluciones. Por lo tanto, esto evidencia la necesidad de plantear los algoritmos de optimización heurística tal y como se desarrollará en posteriores apartados.

Volviendo al edificio experimental estudiado y aplicando, ya que se ha visto que es posible, la evaluación del campo completo de soluciones evaluando las soluciones de los procesos CD, CCD y CRD, se obtendrá cual es la solución más óptima, desde el punto de vista económico, de todas las soluciones posibles considerando los tres sistemas de cimbrado considerados.

Para indicarle a la aplicación informática que se quiere procesar este caso, hay que introducirle, además de los datos de entrada especificados en el capítulo 4 para el cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado, las variables y los valores posibles de cada una de las variables según el apartado 5.1.2, e indicarle los siguientes parámetros para que procese el caso considerado:

- $opt = 1$ [1: optimización completa; 2: Saltos múltiples aleatorios; 3: Gradiente; 4: Cristalización simulada].
- $optCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCRD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].

Tras la alimentación a la nueva aplicación informática de todos los datos necesarios, se han obtenido las siguientes soluciones (Fig. 5.2) como óptimas en función del sistema de cimbrado utilizado.

El tiempo finalmente empleado para el cálculo de las soluciones óptimas de la anterior tabla ha sido de 15'85 minutos, obteniendo por tanto una velocidad media de comprobación de soluciones de aproximadamente 57000 soluciones/segundo.

Como se puede observar, el proceso de cimbrado/descimbrado más económico para el edificio experimental considerado es el correspondiente al indicado en la anterior tabla para un sistema CCD. Lo que sí es evidente, es que un sistema CRD, aunque el número de operaciones puedan llegar a ser las mismas que en un sistema CCD, el hecho de tener que reinstalar los puntales en el mismo forjado supone unos incrementos de coste en mano de obra que penalizan mucho el coste final de las soluciones. Por ello, el coste de la solución más óptima del sistema CRD es más elevado que el coste de la solución más óptima del sistema CCD. También se aprecia que el sistema menos óptimo para este caso es el sistema CD que aunque el plazo total de construcción del edificio sería el mismo que el obtenido para un sistema CCD, el hecho de no poder aprovechar los fondos de encofrado, sopandas y puntales de las plantas clareadas para su instalación en plantas superiores, se penaliza el coste económico final.

Tabla 5.2 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos evaluando el campo completo de soluciones.

	Sistema de cimbrado / descimbrado		
	CD	CCD	CRD
Porcentaje de clareado o recimbrado	0	66	50
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	2	3
Separación de sopandas [m]	3	3	3
Separación de puntales planta 1 [m]	2	2	2
Separación de puntales planta 2 [m]	2	2	1
Separación de puntales planta 3 [m]	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 2 [días]	5	5	6
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 3 [días]	5	5	5
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 1 [días]	0	2	0
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 2 [días]	0	2	0
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 3 [días]	0	2	0
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 1 [días]	0	0	2
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 2 [días]	0	0	2
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 3 [días]	0	0	2
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	1.43	1.19	1.33

Si recordamos ahora el precio estimado en el apartado 5.1.4, el coste asociado al edificio experimental tal y como ha sido concebido en la realidad y como ha sido procesado en el capítulo 4 es de 4'12 €/m². Por lo tanto, tras la consideración de la nueva aplicación informática y la optimización comprobando el campo completo de soluciones se ha obtenido el siguiente porcentaje de ahorro manteniendo el mismo sistema que el utilizado realmente.

$$\text{Reducción de costes} = \frac{4.12 - 1.19}{4.12} \cdot 100 = 71.12 \%$$

Porcentaje de reducción de costes muy alto con el que se puede obtener beneficios reales importantes en la construcción de edificios en altura hormigonados in situ.

Realizada esta discusión, a continuación se comenta cada una de las soluciones obtenidas como óptimas para cada uno de los sistemas y se comentarán las posibles peculiaridades a tener en cuenta. En primer lugar, respecto a la solución óptima obtenida para el sistema CD, se observa que tanto la separación de las sopandas como la separación de los puntales toman los valores máximos posibles proporcionados de tal forma que se utilizan los mínimos recursos posibles para reducir el coste final del proceso. También se puede observar como el ciclo constructivo es el mínimo posible (hormigonado de un forjado cada 5 días) de tal forma que el plazo de construcción se disminuye al máximo reduciendo por tanto el coste económico asociado. Sin embargo, respecto al número de plantas consecutivas cimbradas, que en este caso podría haber tomado el valor 1, 2 o 3, el valor que más reduce el coste económico del proceso de cimbrado/descimbrado es el caso en el que se consideran dos plantas consecutivas cimbradas tal y como se consideró en el edificio real. Tras estas

conclusiones, también cabe apuntar que la solución es una solución factible y cumple todas las condiciones de descimbrado o de autosuficiencia de forjados evaluados, ya que de lo contrario la aplicación informática no hubiera tenido en cuenta esta solución, obteniendo por tanto otra que si lo fuera.

En segundo lugar, respecto a la solución óptima obtenida para el sistema CCD, se observa, tal y como ocurría para el sistema CD, que la separación de sopandas, de puntales y los tiempos de las operaciones de hormigonado y clareado toman los valores más óptimos proporcionados a la aplicación y aún así se cumple con las condiciones de descimbrado o autosuficiencia de los forjados. Además, el porcentaje de clareado es el más elevado posible de entre los ofrecidos a la aplicación (33, 50 y 66 %) que implica que en cada una de las operaciones de clareado se prescinde de 2 de cada 3 sopandas instaladas. Puesto que la separación de sopandas para un forjado recién hormigonado se ha obtenido igual a 3 metros teniendo luces de 6 metros, esto implica que en el vano aparecerán 3 sopandas instaladas y que tras la operación de clareado solo se quedaría la sopanda central ubicada aproximadamente en el centro del vano.

En tercer lugar, respecto a la solución óptima obtenida para el sistema CRD, se puede extraer conclusiones similares sobre los valores adoptados por las variables correspondientes a la separación de puntales, de sopandas y a los tiempos en los que se realizan las diversas operaciones. Sin embargo, como se puede observar, la separación de puntales de la planta 2 y el tiempo necesario para hormigonar el forjado 2 desde el hormigonado del 1, no adoptan los valores inferiores posibles de los que se han proporcionado a la aplicación, probablemente porque unas soluciones con estos valores no cumplirían algunas de las condiciones de descimbrado o autosuficiencia de los forjados. Además, contrariamente a lo que ocurre en los sistemas CD y CCD, el sistema CRD más óptimo es el que utiliza un sistema con 3 plantas consecutivas cimbradas en lugar de los otros posibles valores (1 o 2). Cabe destacar en este caso el porcentaje de recimbrado que toma un valor del 50 %, es decir, que tras la operación de recimbrado en un forjado, se vuelven a colocar la mitad de los puntales de la planta para contribuir con los nuevos incrementos de carga que aparezcan. De esta forma se puede aprovechar el otro 50 % para su instalación en plantas superiores y por tanto reducir la cantidad de material necesario. En cambio, si se hubiera considerado un porcentaje de recimbrado del 100 %, se hubieran vuelto a colocar en el forjado el 100 % de los puntales suponiendo una solución evidentemente de mayor coste.

Tras todas estas consideraciones, por último es necesario apuntar que tras la búsqueda de las soluciones más óptimas evaluando todo el campo de soluciones (posible porque el edificio es de tan solo 3 plantas), no es posible encontrar soluciones más óptimas, desde el punto de vista económico, que las ya obtenidas. Por lo tanto, en los próximos apartados en donde se aplicarán algoritmos de optimización heurística para realizar una búsqueda inteligente y rápida de la solución óptima, no se van a obtener soluciones con menor coste, incluso cabe la posibilidad que las soluciones a las que se llegue no sean las más óptimas aunque se aproximen a éstas. Aunque por ello parece que los algoritmos heurísticos perjudiquen el proceso de optimización, no es así ya que encontrarán soluciones muy buenas, o incluso las más óptimas en un intervalo de tiempo muy reducido. Además, en algunos casos, como aquellos en los que el edificio sea mayor a 3 plantas, la aplicación de estos algoritmos de optimización heurística es la única opción debido al excesivo tiempo de cálculo que sería necesario

para la evaluación completa del campo de soluciones. Por lo tanto, aplicar los algoritmos de optimización heurística para el edificio experimental de 3 plantas no tiene excesivo sentido práctico, aunque es de especial relevancia dentro de este trabajo final de máster ya que permitirá observar el correcto y eficiente funcionamiento de los algoritmos heurísticos respecto a la evaluación del campo completo de soluciones. Así, de esta forma, con la seguridad del correcto funcionamiento de los distintos algoritmos de optimización heurística a considerar, en el siguiente capítulo se realizará una aplicación práctica a un edificio que tenga mayor número de plantas.

5.3 Optimización heurística aplicando el algoritmo de saltos múltiples aleatorios [Random Walk]

5.3.1 Introducción

Una primera aproximación para resolver cualquier problema de optimización consiste en seleccionar aleatoriamente un conjunto más o menos extenso de soluciones eligiendo posteriormente la solución factible de menor coste de entre todas las soluciones aleatorias seleccionadas.

Este algoritmo de optimización presenta varios inconvenientes significativos:

- 1) La obtención de una solución de calidad requiere la realización de una comprobación exhaustiva del conjunto de soluciones, lo que, en general, resulta inaceptable por crecer exponencialmente el número de soluciones con la dimensión del problema, en este caso con el número de plantas del edificio.
- 2) Al obtenerse cada solución de forma totalmente aleatoria e independiente de las demás, no se aprovecha la información del espacio de soluciones generada durante el proceso. De hecho, el algoritmo no tiene memoria sobre qué soluciones ha comprobado ya pudiendo considerar soluciones que ya ha considerado anteriormente.

A pesar de estos puntos débiles es interesante aplicar esta estrategia porque:

- 1) Proporciona diseños que se emplean como solución inicial en la aplicación de otras técnicas de optimización heurística. También pueden ser empleados como solución inicial para cualquier usuario de la aplicación informática con tal de utilizar la solución directamente o como punto de partida para la mejora de la misma con su correspondiente posterior cálculo y comprobación.
- 2) Permite valorar el total de soluciones factibles respecto del número total de soluciones exploradas.

5.3.2 Consideraciones preliminares

Antes de mostrar los resultados obtenidos aplicando al proceso de cimbrado/descimbrado de edificios el algoritmo de saltos múltiples aleatorios, es necesario en primer lugar definir cuantas soluciones aleatorias debe considerar, qué se entiende por solución aleatoria y qué datos se deben proporcionar a

la aplicación informática para que procese el cálculo de las soluciones óptimas a través de este algoritmo.

Como se ha visto en el anterior apartado, la aplicación informática es capaz de evaluar aproximadamente unas 57000 soluciones por segundo. La obtención de las soluciones óptimas evaluando todo el campo de soluciones ha necesitado de más de 15 minutos de cálculo por parte de la nueva aplicación informática. En este caso, por ser ambiciosos y querer que el cálculo tarde aproximadamente unos 5 segundos, el número de soluciones que se le debe indicar al programa que evalúe es de 285000.

Para la obtención de una solución aleatoria, la aplicación informática utiliza números totalmente aleatorios entre 0 y 1 extraídos de la base de datos de números aleatorios de FORTRAN, que se utilizan para definir el valor de cada una de las variables. A esta base de datos aleatorios se puede acceder llamando a la función "random_number()". Además, esta base de datos es fija, es decir, los números que existen en ella son concretos y no cambian, aunque de forma externa, al no conocer estos números, se consideran aleatorios igualmente. Sin embargo, el programa tiene la opción de acceder a la citada base a partir de cualquier posición a través de la función "random_seed(put=...)" para la que el valor del "put" indica la posición del número aleatorio a considerar. Por lo tanto, ya que las soluciones aleatorias se consideran a partir de esta base de datos, y los números aleatorios dependen de la posición inicial de entrada a la base de datos, así como las soluciones óptimas y el proceso de optimización dependen de la solución inicial, se considerarán hasta 5 casos distintos en los que se cambiará el valor del "put" de la función "random_seed".

Por último, para que la aplicación informática considere este algoritmo de optimización para la búsqueda del proceso más óptimo considerando cualquiera de los sistemas se le debe proporcionar los siguientes datos de entrada, adicionalmente a los ya considerados para el edificio experimental:

- $opt = 2$ [1: optimización completa; 2: Saltos múltiples aleatorios; 3: Gradiente; 4: Cristalización simulada].
- $optCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCRD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].

5.3.3 Resultados y conclusiones obtenidas

Ejecutando la aplicación informática para 5 casos distintos proporcionando un valor de la variable "put" distinto para cada uno de ellos, en la siguiente tabla se muestran los procesos de cimbrado/descimbrado más óptimos que el algoritmo de saltos múltiples aleatorios ha sido capaz de obtener tras la comprobación de 285000 soluciones totalmente aleatorias en cada uno de los casos.

Tabla 5.3 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de saltos múltiples aleatorios.

	Soluciones				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 9999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	2	2	2	2
Porcentaje de clareado o recimbrado	50	66	66	66	50
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	2	2	2	2
Separación de sopandas [m]	3	2	2	3	3
Separación de puntales planta 1 [m]	2	2	1	2	2
Separación de puntales planta 2 [m]	1	2	2	1	2
Separación de puntales planta 3 [m]	2	2	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 2 [días]	5	5	5	6	5
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 3 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 1 [días]	2	2	2	3	2
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 2 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 3 [días]	5	3	2	7	2
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	1.33	1.30	1.39	1.33	1.24
Duración de la búsqueda (s)	5.38	5.46	5.42	5.45	5.39

Tras los resultados obtenidos para los 5 casos distintos en función de los valores aleatorios adoptados, se puede observar que tras evaluar 285000 soluciones, la solución óptima a la que converge la aplicación informática es distinta en función del caso, siendo realmente complicado buscar un valor del parámetro "put" que obtenga la solución más óptima obtenida evaluando el campo de soluciones completo. De hecho, el coste económico medio de los casos procesados es de 1.32 €/m², frente al del proceso más óptimo, que se conoce gracias a la evaluación completa del campo de soluciones, de 1.19 €/m². Además, el mejor de los casos procesados presenta un coste económico de 1.24 €/m², más cercano al óptimo absoluto y que perjudica el coste económico según el siguiente porcentaje:

$$\Delta\text{coste} = \frac{1.24 - 1.19}{1.19} \cdot 100 = 4.2 \%$$

Sin embargo, el tiempo de cálculo empleado ha sido de 5.39 segundos, muy inferior al empleado para la obtención de la solución óptima absoluta, 15.85 minutos, evaluando el campo de soluciones completo. Por lo tanto, aunque el coste es ligeramente superior, el tiempo de cálculo necesario es claramente inferior, obteniendo además una solución óptima, que si se compara con la solución

adoptada en la realidad, en lugar de tener un ahorro económico del 71.12 %, se tiene un ahorro económico según la siguiente expresión:

$$\text{Reducción de costes} = \frac{4.12 - 1.24}{4.12} \cdot 100 = 69.90 \%$$

Por lo tanto, con el empleo de un reducido tiempo de cálculo (tan solo 5 segundos) se ha obtenido una solución muy buena, casi tan buena como el óptimo absoluto, suponiendo una reducción de costes respecto al proceso de cimbrado/descimbrado real muy significativo y cercano al obtenido para el óptimo absoluto.

Respecto a la solución más óptima obtenida, se puede observar que los valores adoptados por las variables correspondientes a la separación de puntales, de sopandas y a los tiempos en los que se realizan las diversas operaciones como la del clareado o la del hormigonado, adoptan los valores límite de cada una de las variables que hacen la solución más óptima. También se ha obtenido un proceso con dos plantas consecutivas cimbradas de la misma forma que se obtuvo en la evaluación del campo de soluciones completo. En cambio, la diferencia fundamental con la solución que representa el óptimo absoluto recae en el porcentaje de clareado, establecido en este caso en el 50 %, mientras que en el óptimo absoluto ha sido fijado en el 66 %. Esta diferencia es la que produce la variación en el coste económico de los dos procesos de cimbrado/descimbrado. El usuario de la nueva aplicación informática que decidiera tomar este algoritmo de optimización como pre-dimensionamiento, puede, a partir del proceso de cimbrado/descimbrado obtenido, mejorarlo en términos económicos con los criterios que se han ido comentando, y acceder posteriormente al módulo de cálculo y comprobación de procesos, para poder observar si el proceso planteado es o no factible. Por ejemplo, en este caso, al observar la solución del caso 5 con 1.24 €/m² y conocer que los algoritmos de optimización heurística no tienen porqué obtener el óptimo absoluto de la función objetivo, el usuario podría pensar que una solución más económica sería establecer un 66 % de clareado, y por tanto, ir al módulo de cálculo y comprobación de procesos para observar la factibilidad de esta consideración. De esta forma, podría llegarse también al óptimo absoluto.

Por último, se puede observar que en todos los casos procesados aparece el sistema CCD como solución más óptima, aún siendo, por ejemplo en el caso 3, una solución más cara que el óptimo absoluto del sistema CRD (1.33 €/m²). Evidentemente, que bajo estos resultados, si se hubieran comprobado soluciones con otros valores del parámetro "put", podrían haber resultados con el sistema CRD como el más óptimo, aunque como se ha visto, y puesto que el coste del sistema CCD es menor en general, es menos probable obtener soluciones de este tipo. Las soluciones óptimas del tipo CD son aún más improbables al tener un óptimo absoluto de 1.43 €/m², coste económico incluso superior que todos los obtenidos para los 5 casos.

5.4 Optimización heurística aplicando el algoritmo gradiente en su versión *First Best*

5.4.1 Introducción

Otra forma de abordar la resolución del problema de optimización planteado, es modificar sucesivamente las variables que definen el proceso de cimbrado/descimbrado a optimizar con tal de obtener cada vez soluciones más óptimas, en este caso, soluciones de un menor coste económico.

Estas heurísticas, conocidas como estrategias de búsqueda secuencial por entornos, se basan en los conceptos de:

- 1) Movimiento o regla que permite transformar una solución en otra. Es decir, un pequeño cambio de valor en alguna de las variables que produzca una solución distinta a la de partida.
- 2) Entorno de una solución o conjunto de soluciones generables alterando esa solución con un movimiento. Con movimientos distintos se pueden alcanzar soluciones distintas, que según la definición, forman parte de ese entorno de una solución.

De las diferentes estrategias que generalizan la búsqueda secuencial por entornos, se aplica en este apartado el algoritmo de búsqueda local por gradiente, cuyo funcionamiento general se explicó en el capítulo 2 para sus dos variantes FB (First Best) y GB (Global Best). Por ser los tiempos de computación empleados por GB superiores a los del FB, se ha empleado en este trabajo una versión de esta última heurística.

El método requiere de una solución factible de partida S_0 que se obtiene de forma totalmente aleatorio, de la misma forma que se obtenían para la estrategia de saltos múltiples aleatorios. A partir de esta solución se aplican movimientos a los valores de las variables para obtener una nueva solución S_1 . Esta solución es evaluada y, si mejora el coste de S_0 , se comprueba su factibilidad. Si es factible se adopta como nueva solución de partida. El proceso es repetido hasta que no se produce ninguna mejora de la solución en un número de iteraciones fijado de antemano.

Aplicar un movimiento a una solución consiste en modificar un número de variables elegidas de forma aleatoria dentro de pequeños intervalos, pudiendo ser tanto el número de las variables como la amplitud del intervalo del movimiento constante o cambiante a lo largo del proceso. Por ello, caracterizar los movimientos implica decidir:

- Los intervalos de variación de cada una de las variables.
- El número de variables que se modifican en cada movimiento.
- Qué variables se modifican en cada movimiento.

5.4.2 Consideraciones preliminares

En este trabajo se ha considerado:

- Los intervalos de variación de cada una de las variables se han fijado según los valores proporcionados en el apartado 5.1.2 para cada una de las variables.
- Se han programado dos subrutinas que consideran en cada movimiento la modificación de una o dos variables, respectivamente.
- Las variables que se modifican se establece a partir de una decisión totalmente aleatoria. Además, el movimiento que se realiza dentro de cada una de las variables es un movimiento muy pequeño, es decir, dentro de los valores de cada una de las variables se modifica el valor inicial a un valor inmediatamente superior o inmediatamente inferior en función de los valores proporcionados en el apartado 5.1.2. La adopción de un valor inmediatamente superior o inmediatamente inferior se realiza con una probabilidad del 50 % de subir o bajar de nivel.
- El número máximo de iteraciones que la aplicación sigue buscando una solución más óptima sin encontrarla, se establece en este trabajo mediante ensayos numéricos para acotar el tiempo de búsqueda de soluciones óptimas en 200000.

Por último, para que la aplicación informática considere este algoritmo de optimización para la búsqueda local por gradiente del proceso más óptimo considerando cualquiera de los sistemas, se le debe proporcionar los siguientes datos de entrada, adicionalmente a los ya considerados para el edificio experimental:

- $opt = 3$ [1: optimización completa; 2: Saltos múltiples aleatorios; 3: Gradiente; 4: Cristalización simulada].
- $optCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCRD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].

5.4.3 Resultados y conclusiones obtenidas

Tal y como ha quedado explícito tanto en los apartados precedentes como en el capítulo 2 de este documento, la calidad del resultado empleando la búsqueda local por gradiente depende en gran medida de la solución inicial de partida a partir de la que la búsqueda de la solución óptima puede llegar hasta una solución óptima del entorno que puede constituir una solución óptima absoluta o una solución óptima local. Por ello, ejecutando la aplicación informática para 5 casos distintos proporcionando un valor de la variable "put" distinto para cada uno de ellos (tal y como se hacía en la estrategia de saltos múltiples aleatorios), en las siguientes tablas (Tablas 5.4 y 5.5) se muestran los procesos de cimbrado/descimbrado más óptimos que el algoritmo de búsqueda local por gradiente ha sido capaz de obtener. Las tablas se corresponden para los casos en los que se decide realizar tan solo un movimiento (cambio del valor de una sola variable en cada solución distinta) y para los casos en los que se decide realizar dos movimientos (cambio del valor de dos variables en cada solución distinta).

Tabla 5.4 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por búsqueda local por gradiente aplicando 1 movimiento.

	Soluciones con 1 movimiento				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	1	3	3	1
Porcentaje de clareado o recimbrado	50	0	50	50	0
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	1	2	2	2
Separación de sopandas [m]	3	3	3	3	3
Separación de puntales planta 1 [m]	2	0.5	1	1	2
Separación de puntales planta 2 [m]	1	0.5	2	1	1
Separación de puntales planta 3 [m]	1	2	1	1	1
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 2 [días]	6	12	7	11	5
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 3 [días]	5	12	8	6	5
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 1 [días]	3	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 2 [días]	2	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 3 [días]	7	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	4	8	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	5	3	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	4	6	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	1.60	2.56	1.88	2.15	1.67
Duración de la búsqueda (s)	7.12	3.28	4.49	4.51	5.14

La primera conclusión que puede observarse tras la obtención de los resultados es que la solución óptima obtenida por la aplicación aplicando búsqueda local por gradiente depende en gran medida de la solución inicial de partida. Esta clara dependencia hace necesario tener que comprobar muchos casos con distinta solución inicial si se quiere obtener una solución que se acerque al óptimo absoluto. Aún así, es necesario acertar con una solución inicial que por gradiente converja a una muy buena solución cercana a su entorno. En caso contrario, la aplicación converge a la solución más óptima de su entorno quedándose estancada en un óptimo local que, como se ha visto, no tiene el porqué acercarse a la solución óptima absoluta. De hecho, como soluciones óptimas se han obtenido tanto los sistemas CCD y CRD como el sistema CD, ya que son las soluciones óptimas encontradas en el entorno de la solución inicial.

Si se comparan las soluciones aquí obtenidas con las obtenidas aplicando la estrategia de saltos múltiples aleatorios, se puede observar como el coste económico es superior para las soluciones óptimas obtenidas por la búsqueda local por gradiente, debido, sobre todo, al no acierto en una correcta solución inicial. Una posible solución a este problema será establecer como soluciones iniciales aquellas obtenidas por la estrategia de saltos múltiples aleatorios. Así, de esta forma, se aseguraría que, al menos, las soluciones obtenidas serían idénticas a las de esta estrategia, pudiendo mejorarlas aplicando la estrategia de búsqueda local por gradiente. Esta sería la única forma de asegurar una mejor solución empleando la búsqueda local por gradiente que empleando la estrategia de saltos múltiples aleatorios, además de asegurar una menor dependencia de la solución inicial.

Tabla 5.5 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por búsqueda local por gradiente aplicando 2 movimientos.

	Soluciones con 2 movimientos				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	1	1	1	1
Porcentaje de clareado o recimbrado	50	0	0	0	0
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	1	1	1	2
Separación de sopandas [m]	3	3	3	3	3
Separación de puntales planta 1 [m]	1	0.5	1	1	2
Separación de puntales planta 2 [m]	1	2	1	1	1
Separación de puntales planta 3 [m]	1	1	1	1	2
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 2 [días]	5	12	12	12	5
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 3 [días]	5	12	12	12	5
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 1 [días]	2	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 2 [días]	2	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 3 [días]	6	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	1.50	2.00	2.00	2.00	1.55
Duración de la búsqueda (s)	6.77	3.39	3.37	3.38	4.86

Otra de las conclusiones que puede obtenerse es que, para este caso concreto, se han obtenido en general (menos en uno de los casos) mejores soluciones aplicando variaciones en los valores de dos de las variables (2 movimientos) respecto a la variación en los valores de una, en cada solución distinta comprobada.

Centrándonos ahora en la mejor de las soluciones obtenidas, correspondiente al caso en el que el "put" es 1 y se realizan dos movimientos en cada solución distinta comprobada, se puede observar que el coste obtenido es de 1.50 €/m². La solución se basa en un sistema CCD con dos plantas consecutivas cimbradas, con un porcentaje de clareado del 50 %, con una separación de sopandas de 3 m y ciclos de construcción de cada uno de los forjados de 5 días. Las variables correspondientes a la separación de puntales (1 m) y el tiempo al que cada uno de los forjados es clareado (2, 2 y 6 días para los forjados 1, 2 y 3 respectivamente), no suponen a combinación de valores óptima para este tipo de variables. Por ello la solución se distancia del óptimo absoluto obtenido en el apartado 5.2 con un coste económico asociado de 1.19 €/m². La solución óptima (óptimo local) obtenida en este apartado supone un incremento del coste definido tal y como se establece en el apartado 5.1.4 de:

$$\Delta \text{coste} = \frac{1.50 - 1.19}{1.19} \cdot 100 = 26.1 \%$$

Sin embargo, el tiempo de cálculo empleado ha sido de 6.77 segundos, muy inferior a los 15.85 minutos evaluando el campo de soluciones completo. Por lo tanto, aunque el coste es superior al obtenido evaluando el campo de soluciones completo y al obtenido siguiendo la estrategia de saltos

múltiples aleatorios, el tiempo de cálculo necesario es claramente inferior a la comprobación del campo de soluciones completo, obteniendo además una solución óptima, que si se compara con la solución adoptada en la realidad, en lugar de tener un ahorro económico del 71.12 %, se tiene un ahorro económico según la siguiente expresión:

$$\text{Reducción de costes} = \frac{4.12 - 1.50}{4.12} \cdot 100 = 63.59 \%$$

5.5 Optimización heurística aplicando el algoritmo de cristalización simulada [Simulated Annealing]

5.5.1 Introducción

Como se ha podido observar, los métodos que realizan una aceptación de nuevas soluciones por entornos sin permitir la degradación de la función objetivo, como la búsqueda local por gradiente en sus variantes First Best (FB) o Global Best (GB), corren el riesgo de quedar prematuramente atrapados en un óptimo local como ha ocurrido en el anterior apartado. Para evitar este problema, se han desarrollado estrategias que permiten una degradación acotada de la solución actual como Cristalización Simulada (Simulated Annealing) o Aceptación por Umbrales (Threshold Accepting). Su funcionamiento más detallado se ha realizado en el capítulo 2 de este documento.

La versión implementada en este trabajo de Cristalización Simulada (En adelante, SA) parte de una solución inicial factible S_0 obtenida de forma totalmente aleatoria de la que se evalúa su coste económico. Es en este punto donde también cabría la posibilidad de partir de una solución "óptima" obtenida a partir de la estrategia de saltos múltiples aleatorios en lugar de partir de una solución cualquiera factible totalmente aleatoria. Partiendo de la solución inicial obtenida por cualquiera de las opciones (en este trabajo a partir de una solución factible totalmente aleatoria) y, adoptada una temperatura inicial $T = T_0$, comienza el proceso iterativo siguiente:

- 1) Se aplica un movimiento a S_0 para obtener una nueva solución S_1 de forma análoga a lo explicado en el anterior apartado. Es en este punto donde vuelven a estar las dos opciones planteadas, es decir, la opción de realizar un cambio o movimiento en tan solo una de las variables o en dos para formar la nueva solución S_1 .
- 2) Si se comprueba la factibilidad de S_1 se establece el siguiente criterio:
 - a) Si su coste es inferior al de la solución factible más económica encontrada hasta ese momento (Solución record), la sustituye como solución óptima, si no, se establece un criterio de aceptación probabilista.
- 3) Se contabiliza el número de iteraciones realizadas para la temperatura T . Si es igual a un valor fijado de antemano (longitud de la Cadena de Markov), entonces se disminuye T . Si el número de iteraciones es inferior, el algoritmo vuelve al punto 1). Con este parámetro de temperatura se controla la aceptación probabilista de soluciones degradadas, siendo cada menor (en función de la reducción de temperatura) la probabilidad de aceptar una solución peor que la ya adoptada.
- 4) Se evalúa el criterio de parada.

- a) Si no se satisface, el proceso iterativo comienza de nuevo en el punto 1) con una temperatura más baja.
- b) Si se satisface, la solución record es la solución localmente óptima.

Para aplicar esta heurística es necesario definir:

- 1) Las características de los movimientos a aplicar.
- 2) El valor de la temperatura inicial.
- 3) La longitud de la cadena de Markov y la velocidad de enfriamiento.
- 4) El criterio de parada.

Movimientos a aplicar

Como se ha comentado anteriormente, en este trabajo el número de variables modificadas en cada movimiento se ha considerado en un caso igual a 1 y en otro igual a 2. Se procesarán los resultados en función del caso adoptado y se compararán los resultados. Las variables a cambiar se han escogido aleatoriamente. Los valores cambiados dentro de cada una de las variables son valores cercanos a las soluciones de partida con el objetivo de evaluar siempre los entornos más cercanos a la solución inicial, en los que se establece con una probabilidad del 50 % que el nuevo valor de la o las variables sea superior o inferior al inicialmente adoptado.

Valor de la temperatura inicial

El valor de T_0 puede tener influencia en el resultado del proceso de optimización. Una temperatura inicial alta hace que la búsqueda sea muy aleatoria y poco inteligente al principio, pasando por regiones muy diferentes del espacio de soluciones, al ser muy fácil aceptar soluciones de mayor coste que la solución de partida. Al contrario, si la temperatura inicial es demasiado baja, la búsqueda se centra únicamente en una parte muy restringida del espacio de soluciones. Por ello, es deseable establecer criterios analíticos aceptados y útiles que sean capaces de decidir por sí mismos el valor de la temperatura inicial. En este trabajo se ha optado por emplear el algoritmo propuesto por Medina (2001) tal y como se describe a continuación:

- 1) Se selecciona una temperatura inicial T_0 de forma arbitraria.
- 2) Se aplica el algoritmo para una longitud de la cadena de Markov (un número determinado de soluciones) y se contabiliza el número de soluciones aceptadas, respecto al número total de soluciones planteadas.

$$A(\%) = \frac{\text{Número de soluciones aceptadas}}{\text{Número de soluciones totales}} * 100$$

- 3) Si A está comprendido entre dos límites fijados de antemano se acepta el valor de T_0 como temperatura inicial. En este trabajo se ha adoptado un límite inferior del 20 % y uno superior del 40 %. Los mismos valores han sido empleados por otros autores en la optimización de estructuras de hormigón armado con SA (Alcalá et al. (2005) y Payá (2007)).
- 4) Si $A >$ límite superior, el número de soluciones aceptadas es demasiado alto y por tanto se repite el proceso adoptando un nuevo valor de temperatura inicial igual a la mitad del T_0 seleccionado en el punto 1).

- 5) Si $A < \text{límite inferior}$, el número de soluciones aceptadas es demasiado reducido y por tanto se repite el proceso adoptando un nuevo valor de temperatura inicial igual al doble del T_0 seleccionado en el punto 1).

Longitud de la cadena de Markov y la velocidad de enfriamiento

El parámetro T se reduce a lo largo del proceso para disminuir progresivamente la probabilidad de elegir peores soluciones. Para cada temperatura se ensayan un número de movimientos igual a la longitud de la cadena de Markov elegida. Cadenas largas y velocidades de enfriamiento lentas conducen con mayor probabilidad a soluciones mejores ya que se comprueban un número mayor de soluciones, pero los tiempos de cálculo se incrementan. Por tanto, una adecuada elección de la longitud de la cadena de Markov y del esquema de enfriamiento es de gran importancia, ya que se busca un equilibrio entre la obtención de soluciones óptimas y del tiempo de cálculo.

Siguiendo las recomendaciones de Dowsland (1993), se ha adoptado una velocidad geométrica de decrecimiento de T según el esquema siguiente:

$$T_{i+1} = r \cdot T_i \quad \text{con } r \in [0.8, 0.99] \quad (5.1)$$

La elección de los valores de longitud de la cadena de Markov y del coeficiente de enfriamiento (r), se realiza mediante ensayos numéricos como se muestra en el siguiente apartado.

Algunos autores, además, han propuesto incrementar T cuando se alcanza un óptimo local (ver Yepes, 2002) para intentar escapar de él. Esta estrategia, conocida como “recalentamiento”, no ha sido aplicada en este trabajo.

Criterio de parada

Existen dos posibilidades para determinar cuándo debe detenerse la ejecución del algoritmo:

- 1) Un criterio basado en la temperatura final.

En teoría, el proceso se detendría cuando la temperatura final fuera nula. Sin embargo, mucho antes de llegar a este valor de temperatura, la probabilidad de encontrar una solución mejor es prácticamente nula, por lo que suele optarse por detener el proceso cuando la temperatura final sea un porcentaje prefijado de la temperatura inicial. En este trabajo se ha adoptado una temperatura límite inferior de 10^{-5} .

- 2) Un criterio basado en la no existencia de mejoras de la solución optimizada después de un determinado número de cadenas de Markov.

El primer criterio tiene el inconveniente de fijar de antemano el número de iteraciones totales, lo que no resulta muy consistente y puede ser que en la cadena de markov con la temperatura límite inferior marcada se sigan encontrando soluciones mejores. Por lo tanto, en este trabajo se ha optado por establecer además de la mínima temperatura, que en la cadena de markov correspondiente a esta temperatura no se hayan aceptado soluciones mejores. Por lo tanto, el criterio de parada se ejecuta

cuando la temperatura es igual o inferior a la temperatura límite inferior fijada y además en esa cadena de markov no se hayan aceptado nuevas soluciones a través del criterio de aceptación.

5.5.2 Consideraciones preliminares

Tras la exposición realizada en el apartado anterior, los únicos parámetros que necesitan de calibración a partir de ensayos numéricos son los correspondientes a la longitud de la cadena de markov y el coeficiente de enfriamiento para los que es necesario establecer un solución de compromiso entre la obtención de soluciones óptimas y el tiempo de cálculo. Para ello se ha utilizado el edificio experimental y se han probado distintos valores de ambos parámetros comparando el coste económico de las soluciones óptimas obtenidas con el tiempo de cálculo necesario para conseguirlas.

Los valores adoptados para realizar las pruebas son los siguientes:

Longitud de la cadena de Markov: [500 1000 5000 10000]

Factor de enfriamiento: [0.8 0.9 0.95]

Así pues los resultados de las distintas pruebas se presentan en la siguiente tabla (Tabla 5.6).

Como se puede observar a medida que se aumenta el coeficiente de enfriamiento y la longitud de Markov, el tiempo de cálculo necesario aumenta a la vez que aumenta la calidad de la solución óptima encontrada. Aunque es verdad que la solución inicial (en menor medida que en el resto de estrategias) y la cantidad de movimientos realizadas en cada una de las nuevas soluciones planteadas (1 o 2 según apartado anterior) puedan afectar a los resultados, se puede observar que a partir de longitudes de la cadena de Markov de 1000, se encuentra la solución óptima absoluta que se obtuvo evaluando todo el campo de soluciones. Sin embargo, para el siguiente apartado, en previsión del cambio de condiciones (solución inicial y/o cantidad de movimientos a realizar) y del tiempo de cálculo empleado, se adoptan como longitud de la cadena de Markov un valor de 5000 y como coeficiente de enfriamiento un valor de 0.95.

Por último, para que la aplicación informática considere este algoritmo de optimización para la búsqueda por entornos utilizando SA, se le debe proporcionar los siguientes datos de entrada, adicionalmente a los ya considerados para el edificio experimental:

- $opt = 4$ [1: optimización completa; 2: Saltos múltiples aleatorios; 3: Gradiente; 4: Cristalización simulada].
- $optCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCCD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].
- $optCRD = 1$ [1: se activa la optimización para este sistema; 0: no se considera este sistema].

Tabla 5.6 Calibración de los parámetros correspondientes al coeficiente de enfriamiento y a la longitud de la cadena de markov.

Prueba	Coefficiente de enfriamiento	Longitud de la cadena de Markov	Coste económico [€/m ²]	Tiempo de cálculo [s]
1	0.8	500	1.42	0.98
2	0.8	1000	1.34	1.52
3	0.8	5000	1.19 [óptima]	7.57
4	0.8	10000	1.19 [óptima]	18.84
5	0.9	500	1.32	1.53
6	0.9	1000	1.19 [óptima]	3.65
7	0.9	5000	1.19 [óptima]	18.93
8	0.9	10000	1.19 [óptima]	23.26
9	0.95	500	1.43	2.95
10	0.95	1000	1.19 [óptima]	5.73
11	0.95	5000	1.19 [óptima]	37.07
12	0.95	10000	1.19 [óptima]	78.50

5.5.3 Resultados y conclusiones obtenidas

Tal y como ha quedado explícito en los apartados precedentes, la calidad del resultado empleando la búsqueda por entornos empleando SA puede depender, aunque con una baja probabilidad, de la solución inicial de partida. Por ello, ejecutando la aplicación informática para 5 casos distintos proporcionando un valor de la variable "put" distinto para cada uno de ellos (tal y como se hacía en la estrategia de saltos múltiples aleatorios), en las siguientes tablas se muestran los procesos de cimbrado/descimbrado más óptimos que el algoritmo de búsqueda por entornos SA ha sido capaz de obtener. Las tablas se corresponden para los casos en los que se decide realizar tan solo un movimiento (cambio del valor de una sola variable en cada solución distinta) y para los casos en los que se decide realizar dos movimientos (cambio del valor de dos variables en cada solución distinta).

Tabla 5.7 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por SA aplicando 1 movimiento.

	Soluciones con 1 movimiento				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	1	1	1	1
Porcentaje de clareado o recimbrado	66	0	0	0	0
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	2	2	2	2
Separación de sopandas [m]	3	3	3	3	3
Separación de puntales planta 1 [m]	2	2	2	2	2
Separación de puntales planta 2 [m]	2	2	2	2	2
Separación de puntales planta 3 [m]	2	2	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 2 [días]	6	5	5	5	5
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 3 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 1 [días]	3	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 2 [días]	2	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 3 [días]	4	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	1.26	1.43	1.43	1.43	1.43
Duración de la búsqueda (s)	52.07	37.43	31.58	39.83	38.04

Tabla 5.8 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por SA aplicando 2 movimientos.

	Soluciones con 2 movimientos				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	2	2	2	2
Porcentaje de clareado o recimbrado	66	66	66	66	66
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	2	2	2	2
Separación de sopandas [m]	3	3	3	3	3
Separación de puntales planta 1 [m]	2	2	2	2	2
Separación de puntales planta 2 [m]	2	2	2	2	2
Separación de puntales planta 3 [m]	2	2	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 2 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado de la planta 3 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 1 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 2 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la operación constructiva de clareado de la planta 3 [días]	3	3	3	2	3
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la operación constructiva de recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
Duración de la búsqueda (s)	37.01	36.94	27.02	37.34	21.74

Como se puede observar, la solución final en función de los parámetros de calibración elegidos sí depende de la solución inicialmente empleada aunque en menor medida en comparación con las estrategias adoptadas en apartados precedentes. Esta diferencia es notable en el caso en el que se realiza tan solo un movimiento para la obtención de una nueva solución, siendo despreciables para el caso en el que se realizan dos movimientos.

Además, como se puede observar, en el caso en el que se realizan dos movimientos, las soluciones óptimas que se alcanzan son las soluciones óptimas absolutas del problema planteado conocidas debido a la evaluación del campo completo de soluciones realizado en el apartado 5.2. Por contra, en el caso en el que se realiza tan solo un movimiento, se puede observar que no se alcanza en ninguno de los casos planteados el óptimo absoluto del problema. En primer lugar, cabe pensar que no se han comprobado suficientes soluciones como para encontrar el óptimo absoluto y por tanto se propone realizar modificaciones de los parámetros de calibración, que fueron adoptados para el caso de dos movimientos, adoptando ahora 10000 iteraciones como longitud de la cadena de Markov y un coeficiente de enfriamiento de 0'98. Tras el cálculo se observa que no se consigue mejora en los resultados obtenidos, empleando tiempos de cálculo de 4,17 minutos. Por lo tanto, para los problemas de optimización de procesos de cimbrado/descimbrado, y sobre todo para este caso concreto, es mejor utilizar dos movimientos en la búsqueda de nuevas soluciones que utilizar tan solo 1, probablemente porque el tipo de problema planteado necesite de mayor variación de las nuevas soluciones planteadas para encontrar soluciones más óptimas.

Centrándonos en los resultados correspondientes a aplicar dos movimientos en la búsqueda de nuevas soluciones más óptimas, se puede observar que los procesos resultantes son los óptimos absolutos obtenidos ya en el apartado 5.2. Sin embargo, en alguno de los casos, el tiempo al que se realiza el clareado del forjado de la planta 3 cambia ligeramente, del teórico óptimo de 2 días a los 3 días. Sin embargo esto no tiene influencia en el precio porque, como se intuye, no importa realizar el clareado un día o al siguiente siempre que el plazo de construcción sea el mismo para ambos casos.

Adoptando esta última estrategia de optimización heurística de búsqueda por entornos aceptando la degradación de la función objetivo se consigue, para este problema en concreto, encontrar los óptimos absolutos con unos tiempos, en este caso, de aproximadamente 30-40 segundos, en comparación con los 15.85 minutos que se necesitaba para evaluar el campo completo de soluciones. Por lo tanto, esta estrategia es la mejor de las planteadas en este trabajo y realiza una búsqueda eficiente e inteligente de las soluciones óptimas al problema planteado.

5.6 Comprobación de la validez de la solución más óptima al problema planteado

Una vez obtenida la solución más óptima al problema planteado, es evidente que esta solución es factible porque de lo contrario la aplicación informática la hubiera descartado directamente. Sin embargo, en la siguiente tabla se presentan los resultados de este proceso de cimbrado/descimbrado para observar el cumplimiento del proceso y la distribución de cargas entre forjados y puntales calculada.

Tabla 5.9 Cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado más óptimo.

Operación	Forjado	Carga en forjados [kN/m ²]	Carga en puntales [kN/m ²]	Coefficiente de forjado	Coefficiente de puntales	β	$f_{ct,j}/f_{ct,28}$	$\beta \leq f_{ct,j}/f_{ct,28}$?
Hormigonado Forjado 1	1	0.00	5.64	0.00	1.00	-	-	-
Clareado Forjado 1	1	4.08	1.56	0.72	0.28	0.32	0.50	CUMPLE
Hormigonado Forjado 2	2	0.00	5.64	0.00	1.00	-	-	-
	1	8.31	2.97	1.47	0.53	0.64	0.71	CUMPLE
Clareado Forjado 2	2	4.30	1.34	0.76	0.24	0.33	0.50	CUMPLE
	1	5.10	1.88	0.90	0.33	0.39	0.78	CUMPLE
Descimbrado Forjado 1	2	4.66	0.98	0.83	0.17	0.36	0.50	CUMPLE
	1	6.62	-	1.17	-	0.51	0.78	CUMPLE
	3	0.00	5.64	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 3	2	9.14	2.14	1.62	0.38	0.71	0.71	CUMPLE
	1	7.78	-	1.38	-	0.60	0.84	CUMPLE
	3	4.26	1.38	0.76	0.24	0.33	0.50	CUMPLE
Clareado Forjado 3	2	5.76	1.26	1.02	0.22	0.45	0.78	CUMPLE
	1	6.90	-	1.22	-	0.53	0.88	CUMPLE
Descimbrado Forjado 2	3	4.50	1.14	0.80	0.20	0.35	0.50	CUMPLE
	2	6.78	-	1.20	-	0.53	0.78	CUMPLE
Descimbrado Forjado 3	3	5.64	-	1.00	-	0.44	0.78	CUMPLE

Como se puede observar el proceso de cimbrado/descimbrado más óptimo cumple con todas las condiciones de descimbrado o autosuficiencia de los forjados, destacando que en el hormigonado del forjado 3, el forjado 2 es el más restrictivo en cuanto al cumplimiento de esta condición. Además coincide que este forjado en esta operación constructiva es el forjado que más carga asume, 9'14 kN/m², un factor de 1.62 veces su peso propio. En cambio, en cuanto a los puntales, la carga media que estos asumen no supera a la carga del peso propio de un forjado en el momento de su hormigonado.

5.7 Conclusiones relativas a la implementación de algoritmos de optimización.

Se ha implementado el módulo de optimización de procesos de cimbrado/descimbrado utilizando como ejemplo de cálculo para cada una de las estrategias consideradas, el edificio experimental tratado en la comprobación y validación del correcto funcionamiento de la nueva aplicación informática. Los resultados obtenidos de la función objetivo para las distintas estrategias de optimización utilizadas, junto con el porcentaje de ahorro económico obtenido, se definen en la tabla 5.10.

Como se puede observar, tras la aplicación de las distintas técnicas de optimización, el ahorro económico que se puede producir, según la función objetivo definida en el apartado 5.1.4, es muy alto considerando un proceso de cimbrado/descimbrado óptimo en lugar del que pudiera plantear un proyectista sin la utilización de esta aplicación. Además, aplicando distintas estrategias de optimización heurística, para las que es posible no alcanzar el óptimo absoluto por el muestreo que realizan del campo de soluciones completo, se alcanzan porcentajes de ahorro similares a la solución óptima absoluta, conocida al ser posible la evaluación completa del campo de soluciones. Como se preveía, debido a la mayor eficiencia e inteligencia en la búsqueda de soluciones más óptimas que

tiene de forma intrínseca la estrategia de cristalización simulada, esta estrategia consigue los mejores resultados, obteniendo en un pequeño intervalo de tiempo la solución óptima absoluta.

Tabla 5.10 Comparación de resultados obtenidos a través de las distintas estrategias de optimización consideradas para el edificio experimental.

	Edificio real	Optimización completa	Salto múltiples aleatorios	Gradiente	Cristalización Simulada
Coste (€/m²) según función objetivo (apartado 5.1.4)	4.12	1.19	1.24	1.50	1.19
Tiempo de cálculo	-	15.85 minutos	5.39 segundos	6.77 segundos	21.74 segundos
% ahorro económico	-	71.12 %	69.90 %	63.59 %	71.12 %

CAPÍTULO 6. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA NUEVA APLICACIÓN INFORMÁTICA AL EDIFICIO DE BELLAS ARTES DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Una vez implementados tanto el módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado, como el módulo de optimización y búsqueda de la solución óptima del proceso de cimbrado/descimbrado mediante técnicas heurísticas, en este capítulo se realiza una aplicación práctica a un edificio real de todo lo implementado en la nueva aplicación informática de tal forma que suponga un claro ejemplo de su utilidad.

El edificio real al que se le va a hacer la aplicación práctica es el edificio de bellas artes de la Universidad Politécnica de Valencia. Para ello, en primer lugar, se realizará una descripción del edificio y de los datos necesarios para su utilización en la nueva aplicación informática. Seguidamente se realizará un cálculo y comprobación del proceso constructivo según el cronograma real seguido para su construcción, evaluando además el coste económico según la función objetivo desarrollada en el apartado 5.1.4 de este documento. Por último, se procederá a realizar las consideraciones oportunas acerca de la búsqueda de la solución óptima para dicho problema, y se ejecutarán las distintas estrategias adoptadas en el capítulo 5 para la obtención de la solución óptima.

6.1 Descripción de la estructura

El edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia consistió en 7 forjados reticulares de casetón recuperable de hormigón armado de 35 + 5 cm. de canto, 0'15 m. de ancho de nervio y 0'83 m. de separación intereje, siendo la luz entre pilares de 5.50 m en dirección longitudinal y 8'00 o 8'70 m. en dirección transversal. Los forjados se sostienen sobre una serie de pilares apantallados de sección rectangular de 0'70 x 0'35 m². Además en la planta de sótano se proyectaron muros de sótano de 40 cm. de espesor. La altura entre plantas es variable siendo de 2.9 m. para la planta de sótano, 4 m. para la planta baja y 3,60 m para las superiores. El proceso constructivo planteado se basa en mantener dos plantas consecutivas apuntaladas, y seguir un ciclo habitual de Cimbrado-Clareado-Descimbrado ejecutando una planta por semana y clareando a los 3 días.

Los materiales empleados en la construcción del edificio se describen a continuación:

- ✓ El hormigón de los forjados y de la losa de cimentación es HA-30/B/20/I y presentará, por tanto, las siguientes características:
 - Resistencia característica a compresión: 30 MPa.

- Consistencia: Blanda.
 - Tamaño máximo de árido: 20 mm.
 - Clase general de exposición: I (interiores de edificios). Para las cimentaciones la clase de exposición es IIa (elementos enterrados o sumergidos).
- ✓ Acero para armar: B-500-S.

En la siguiente figura se muestra la planta tipo del edificio con el vano sombreado para el que se va a realizar la aplicación práctica.

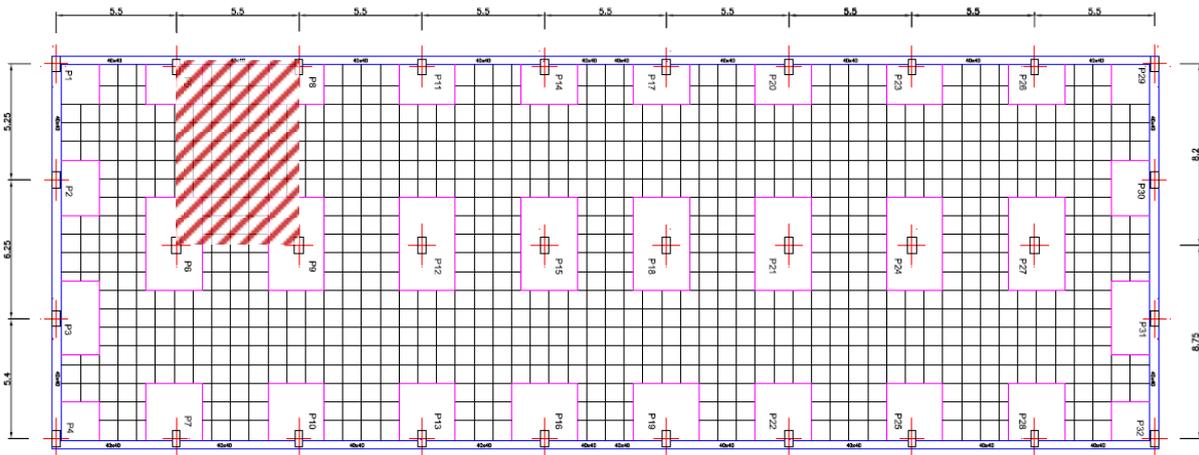


Fig. 6.1 Planta del edificio y vano de estudio considerado para la aplicación práctica.

6.2 Proceso constructivo

El proceso constructivo que se ha adoptado en el presente proyecto es el siguiente:

- ✓ Ejecución de las cimentaciones, pilares y muros de sótano.
- ✓ Día “0”: una vez hormigonadas las cimentaciones, los pilares y los muros de la planta de sótano, se instala el sistema de cimbrado y encofrado para el hormigonado del primer forjado (véase Fig. 6.2).

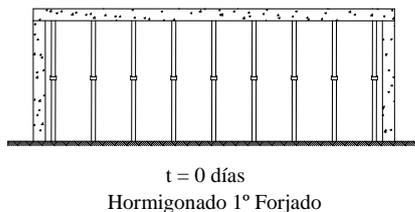


Fig. 6.2 Proceso constructivo día “0”

- ✓ Día “3”: al cabo de tres días del hormigonado del primer forjado, se procede a la retirada de fondos de encofrado y al clareado de puntales (véase Fig. 6.3). A partir del día “3”, se inicia la ejecución de los pilares de la primera planta y la instalación del sistema de encofrado y cimbrado del segundo forjado.

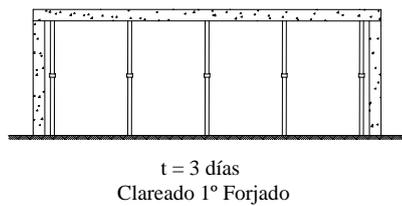


Fig. 6.3 Proceso constructivo día “3”

- ✓ Día “7”: una vez preparado el sistema de encofrado y cimbrado de la segunda planta se ejecutó su hormigonado (véase Fig. 6.4).

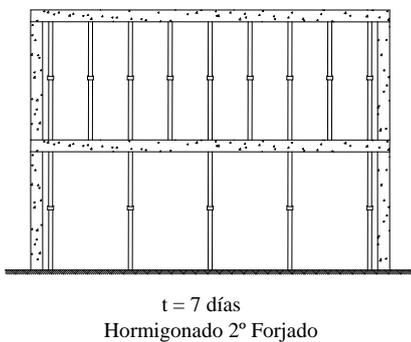


Fig. 6.4 Proceso constructivo día “7”

- ✓ Día “10”: transcurridos tres días del hormigonado del segundo forjado, se retiran los fondos de encofrado y se realiza el clareado de puntales (véase Fig. 6.5).

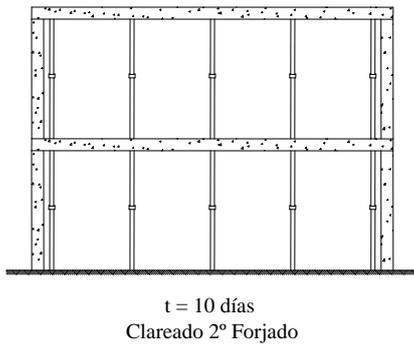


Fig. 6.5 Proceso constructivo día "10"

- ✓ Día "11": en esta fase se procede al descimbrado total de la primera planta (véase Fig. 6.6).

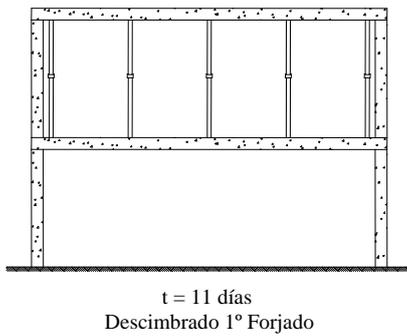


Fig. 6.6 Proceso constructivo día "11"

- ✓ Día "14": una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procede a hormigonar el tercer forjado (véase Fig. 6.7).

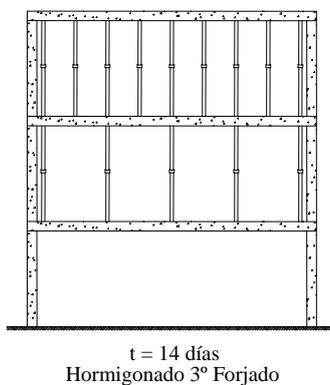


Fig. 6.7 Proceso constructivo día "14"

- ✓ Día “17”: en esta fase se procede al clareado de puntales de la tercera planta (véase Fig. 6.8).

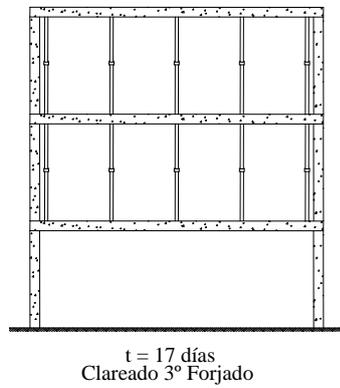


Fig. 6.8 Proceso constructivo día “17”

- ✓ Día “18”: se efectúa el descimbrado total de la segunda planta (véase Fig. 6.9).

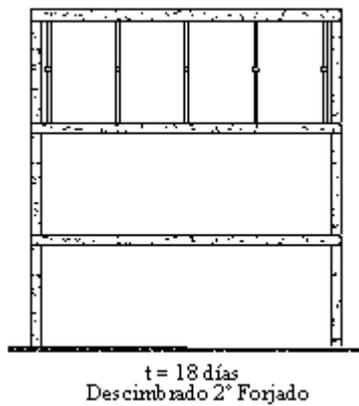


Fig. 6.9 Proceso constructivo día “18”

- ✓ Día “21”: una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procede a hormigonar el cuarto forjado (véase Fig. 6.10).

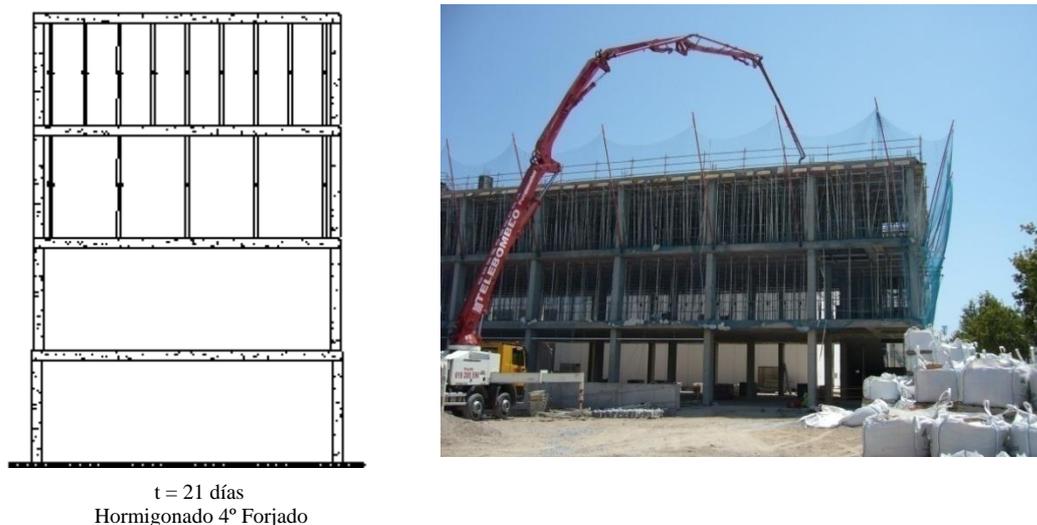


Fig. 6.10 Proceso constructivo día "21"

- ✓ De la misma forma seguirían los pasos de carga hasta llegar a descimbrar el forjado 7 (Paso de carga 21).

6.3 Descripción del sistema de cimbrado

Debido a que el sistema de cimbrado es muy similar entre los forjados de losa y los forjados reticulares, los elementos utilizados son los mismos que los descritos para el edificio experimental (apartado 4.4. del presente Trabajo Final de Máster). Además, se puede incluir también como sistema de cimbrado el casetón recuperable utilizado en este edificio. El casetón es un elemento que sirve para aligerar el forjado y que se dispone embebido en el hormigón. Como ocurre en este caso, si resulta que es un casetón recuperable, una vez fraguado el hormigón se procede a retirarlo. Para este caso, se han utilizado casetones recuperables tales que creen un intereje de 83 cm.

6.4 Comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado real y estimación del coste

El edificio tratado en este capítulo fue motivo de investigación en la tesis doctoral de Gasch (2012), en la que se instrumentó el vano propuesto de estudio para obtener la transmisión de cargas entre forjados y puntales, además de calcular esta transmisión de cargas por el método de los elementos finitos y por varios de los métodos simplificados, entre ellos el nuevo método simplificado propuesto por Calderón et al (2011). Por lo tanto, antes de pasar a la comprobación del proceso constructivo por parte de la aplicación informática y a la estimación posteriormente del coste económico, en primer lugar se establecerá una comparación de los resultados de la transmisión de cargas obtenidos por la nueva aplicación informática con las medidas experimentales, los resultados del método de los elementos finitos y la aplicación del nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) que aparecen en la

tesis doctoral desarrollada por Gasch (2012). También se comparará con los resultados que presenta Gasch (2012) de la aplicación de los métodos simplificados por Duan y Chen (1995) y Fang et al (2001). Así de esta forma se volverá a comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación informática con las hipótesis adoptadas en este documento para un problema totalmente distinto al evaluado en el capítulo 4.

En la citada tesis doctoral tan solo se instrumentó y se modeló el edificio estudiado en este capítulo hasta el hormigonado del forjado 4, operación constructiva limitante en cuanto a que aparece en esta operación la máxima carga a absorber por cualquier de los forjados localizada en el forjado 2. Por lo tanto, las comparaciones a realizar a continuación se limitarán a las operaciones constructivas hasta el hormigonado del forjado 4.

Antes de empezar con la comparación de resultados, se muestra en las siguientes tablas todos aquellos datos necesarios para alimentar a la aplicación informática con tal de calcular y comprobar el proceso de cimbrado(descimbrado del edificio en cuestión).

Tabla 6.1 Datos de entrada considerados (I).

Datos para cada una de las plantas		
Resistencia característica del hormigón [kPa]	Forjado 1	30000
	Forjado 2	30000
	Forjado 3	30000
	Forjado 4	30000
	Forjado 5	30000
	Forjado 6	30000
	Forjado 7	30000
Velocidad de endurecimiento del hormigón	Forjado 1	0.25
	Forjado 2	0.25
	Forjado 3	0.25
	Forjado 4	0.25
	Forjado 5	0.25
	Forjado 6	0.25
	Forjado 7	0.25

Tabla 6.2 Datos de entrada considerados (II).

Datos para cada una de las plantas		
Tipo de forjado	Forjado 1	2
	Forjado 2	2
	Forjado 3	2
	Forjado 4	2
	Forjado 5	2
	Forjado 6	2
	Forjado 7	2
Ancho de nervio [m]	Forjado 1	0.15
	Forjado 2	0.15
	Forjado 3	0.15
	Forjado 4	0.15
	Forjado 5	0.15
	Forjado 6	0.15
	Forjado 7	0.15
Separación entre nervios [m]	Forjado 1	0.83
	Forjado 2	0.83
	Forjado 3	0.83
	Forjado 4	0.83
	Forjado 5	0.83
	Forjado 6	0.83
	Forjado 7	0.83

Tabla 6.3 Datos de entrada considerados (III).

Datos para cada una de las plantas		
Capa de compresión [m]	Forjado 1	0.05
	Forjado 2	0.05
	Forjado 3	0.05
	Forjado 4	0.05
	Forjado 5	0.05
	Forjado 6	0.05
	Forjado 7	0.05
Canto total de la sección [m]	Forjado 1	0.4
	Forjado 2	0.4
	Forjado 3	0.4
	Forjado 4	0.4
	Forjado 5	0.4
	Forjado 6	0.4
	Forjado 7	0.4
Luz en dirección X del pórtico virtual 1x [m] (*)	Forjado 1	5.5
	Forjado 2	5.5
	Forjado 3	5.5
	Forjado 4	5.5
	Forjado 5	5.5
	Forjado 6	5.5
	Forjado 7	5.5

Tabla 6.4 Datos de entrada considerados (IV).

Datos para cada una de las plantas		
Luz en dirección X del pórtico virtual 2x [m] (*)	Forjado 1	5.5
	Forjado 2	5.5
	Forjado 3	5.5
	Forjado 4	5.5
	Forjado 5	5.5
	Forjado 6	5.5
	Forjado 7	5.5
Luz en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] (*)	Forjado 1	8
	Forjado 2	8
	Forjado 3	8
	Forjado 4	8
	Forjado 5	8
	Forjado 6	8
	Forjado 7	8
Luz en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] (*)	Forjado 1	8
	Forjado 2	8
	Forjado 3	8
	Forjado 4	8
	Forjado 5	8
	Forjado 6	8
	Forjado 7	8

Tabla 6.5 Datos de entrada considerados (V).

Datos para cada una de las plantas		
Luz de continuidad en dirección X sentido A del pórtico virtual 1x [m] (*)	Forjado 1	5.5
	Forjado 2	5.5
	Forjado 3	5.5
	Forjado 4	5.5
	Forjado 5	5.5
	Forjado 6	5.5
	Forjado 7	5.5
Luz de continuidad en dirección X sentido B del pórtico virtual 1x [m] (*)	Forjado 1	5.5
	Forjado 2	5.5
	Forjado 3	5.5
	Forjado 4	5.5
	Forjado 5	5.5
	Forjado 6	5.5
	Forjado 7	5.5
Luz de continuidad en dirección X sentido A del pórtico virtual 2x [m] (*)	Forjado 1	5.5
	Forjado 2	5.5
	Forjado 3	5.5
	Forjado 4	5.5
	Forjado 5	5.5
	Forjado 6	5.5
	Forjado 7	5.5

Tabla 6.6 Datos de entrada considerados (VI).

Datos para cada una de las plantas		
Luz de continuidad en dirección X sentido B del pórtico virtual 2x [m] ^(*)	Forjado 1	5.5
	Forjado 2	5.5
	Forjado 3	5.5
	Forjado 4	5.5
	Forjado 5	5.5
	Forjado 6	5.5
	Forjado 7	5.5
Luz de continuidad en dirección Y del pórtico virtual 1y [m] ^(*)	Forjado 1	8.55
	Forjado 2	8.55
	Forjado 3	8.55
	Forjado 4	8.55
	Forjado 5	8.55
	Forjado 6	8.55
	Forjado 7	8.55
Luz de continuidad en dirección Y del pórtico virtual 2y [m] ^(*)	Forjado 1	8.55
	Forjado 2	8.55
	Forjado 3	8.55
	Forjado 4	8.55
	Forjado 5	8.55
	Forjado 6	8.55
	Forjado 7	8.55

Tabla 6.7 Datos de entrada considerados (VII).

Datos para cada una de las plantas		
Altura libre entre plantas [m]	Forjado 1	2.9
	Forjado 2	4
	Forjado 3	3.6
	Forjado 4	3.6
	Forjado 5	3.6
	Forjado 6	3.6
	Forjado 7	3.6
Peso propio del forjado reticular [kN/m ²]	Forjado 1	5.76
	Forjado 2	5.76
	Forjado 3	5.76
	Forjado 4	5.76
	Forjado 5	5.76
	Forjado 6	5.76
	Forjado 7	5.76
Sobrecarga de construcción [kN/m ²]	Forjado 1	0.0
	Forjado 2	0.0
	Forjado 3	0.0
	Forjado 4	0.0
	Forjado 5	0.0
	Forjado 6	0.0
	Forjado 7	0.0

Tabla 6.8 Datos de entrada considerados (VIII).

Datos para cada una de las plantas		
Carga permanente de proyecto [kN/m ²]	Forjado 1	7.5
	Forjado 2	7.5
	Forjado 3	7.5
	Forjado 4	7.5
	Forjado 5	7.5
	Forjado 6	7.5
	Forjado 7	7.5
Sobrecarga de uso de proyecto [kN/m ²]	Forjado 1	4.0
	Forjado 2	4.0
	Forjado 3	4.0
	Forjado 4	4.0
	Forjado 5	4.0
	Forjado 6	4.0
	Forjado 7	4.0
Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado		
Separación de sopandas [m]	Forjado 1	0.83
	Forjado 2	0.83
	Forjado 3	0.83
	Forjado 4	0.83
	Forjado 5	0.83
	Forjado 6	0.83
	Forjado 7	0.83

Tabla 6.9 Datos de entrada considerados (IX).

Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado		
Separación de puntales [m]	Forjado 1	1
	Forjado 2	1
	Forjado 3	1
	Forjado 4	1
	Forjado 5	1
	Forjado 6	1
	Forjado 7	1
Tiempo de la operación constructiva de hormigonado	Forjado 1	0
	Forjado 2	7
	Forjado 3	7
	Forjado 4	7
	Forjado 5	7
	Forjado 6	7
	Forjado 7	7
Tiempo de la operación constructiva de clareado	Forjado 1	3
	Forjado 2	3
	Forjado 3	3
	Forjado 4	3
	Forjado 5	3
	Forjado 6	3
	Forjado 7	3

Tabla 6.10 Datos de entrada considerados (X).

Datos generales para todo el edificio	
Temperatura ambiente considerada	20
Tipo de vano (*)	2 (medianera)
Continuidad del vano (*)	3 (Dirección X en dos sentidos más 1 sentido en dirección Y)
Número de plantas	7
Módulo de elasticidad del acero de los puntales	210000000
Coefficiente de seguridad en construcción frente a cargas permanentes	1.25
Coefficiente de seguridad en construcción frente a sobrecargas	1.25
Coefficiente de seguridad de diseño frente a cargas permanentes	1.35
Coefficiente de seguridad de diseño frente a sobrecargas	1.5
Tiempo necesario para que los trabajadores realicen la operación de descimbrado y recolocación de elementos en una nueva planta	3
Datos relativos al proceso de cimbrado/descimbrado	
Tipo de proceso de cimbrado/descimbrado [CD, CCD o CRD]	2 (CCD)
Porcentaje de clareado	50
Número de platas consecutivas cimbradas	2
Sección de acero de los puntales empleados	0.000289027

(*) Consúltese la Fig. 3.7 para completar la definición de cada uno de estos datos

Una vez alimentada la nueva aplicación informática con los datos necesarios, se calcula el proceso de cimbrado/descimbrado y se procede, a continuación a realizar la comparación con el resto de resultados obtenidos en la tesis doctoral de Gasch (2012) tal y como se había comentado.

Tabla 6.11 Comparación de resultados de la carga asumida por los puntales en el edificio estudiado según los distintos métodos de cálculo y las medidas experimentales realizadas.

Operación	Forjado	Carga en puntales [kN/m ²]					
		Nueva aplicación informática	Experimental	MEF	Calderón et al (2011)	Duan y Chen (1995)	Fang et al (2001)
Hormigonado Forjado 1	1	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76
Clareado Forjado 1	1	4.60	4.8384	4.55	4.3776	5.01	4.6656
Hormigonado Forjado 2	2	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76
	1	9.09	6.22	9.04	8.7552	10.02	9.6192
Clareado Forjado 2	2	3.73	Sin registro	4.55	3.8592	4.44	4.3776
	1	7.50	Sin registro	8.41	7.3152	8.87	8.4096
Descimbrado Forjado 1	2	0.73	1.3248	1.32	1.0368	0.52	0.6336
	1	-	-	-	-	-	-
Hormigonado Forjado 3	3	5.76	5.7	5.76	5.76	5.76	5.76
	2	3.18	4.032	4.15	3.744	3.17	3.3408
	1	-	-	-	-	-	-
Clareado Forjado 3	3	3.17	3.9744	3.74	3.168	3.46	2.3616
	2	2.08	3.456	3.23	2.5344	2.07	1.728
	1	-	-	-	-	-	-
	3	2.33	2.59	2.48	2.13	2.53	1.61
Descimbrado Forjado 2	2	-	-	-	-	-	-
	4	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76	5.76
Hormigonado Forjado 4	3	4.81	4.84	5.13	4.61	5.18	4.26
	2	-	-	-	-	-	-

Como se puede observar, el orden de magnitud de las cargas obtenidas para los puntales por la nueva aplicación informática, tras la adopción de todas las hipótesis consideradas en este documento, es correcto. Además, si se comparan los resultados con el resto de cálculos realizados se puede observar que la magnitud obtenida por la nueva aplicación es adecuada y muy cercana a los resultados predichos por otros métodos y a los resultados medidos experimentalmente.

De hecho, si ahora se realiza una comparación de todos los métodos de cálculo respecto a los valores experimentales (supuestos como valores objetivo), se puede observar el ajuste de los distintos métodos a las medidas experimentales. La comparación se realizará, de la misma forma que para el edificio experimental, comparando los resultados del parámetro [Valor experimental/Valor del método] y de los estadísticos que caracterizan el ajuste de cada uno de los métodos a las medidas experimentales. Así, de esta forma se puede obtener que aquel método que tenga un promedio más cercano a uno con una desviación típica más reducida y un error absoluto inferior, será un buen método ya que se ajusta a las medidas experimentales (Ver Tabla 6.12).

Como se puede observar, el método de los elementos finitos se acerca a los valores experimentales de forma excelente, aunque al tratarse de un método complejo que utiliza software estructural específico, no puede ser comparado directamente con los resultados de los métodos simplificados de cálculo. Tras este, el método simplificado que mejor se ajusta a las medidas experimentales es el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) ya que presenta un mejor promedio y una desviación típica y error absoluto de inferior magnitud. La nueva aplicación informática que se basa en el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) también presenta un buen ajuste tras las hipótesis de cálculo que se han ido adoptando en este documento, mejorando significativamente los resultados obtenidos por el resto de métodos simplificados en cuanto a promedio, desviación típica y error absoluto. Por lo tanto se considera correcto el funcionamiento y cálculo seguido en la nueva aplicación informática.

Tabla 6.12 Comparación de resultados y nueva validación de la nueva aplicación informática basada en parámetros estadísticos.

Operación	Forjado	(Puntales Experimental) / (Puntales Método)				
		Nueva aplicación informática	MEF	Calderón et al (2011)	Duan y Chen (1995)	Fang et al (2001)
Hormigonado Forjado 1	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Clareado Forjado 1	1	1.05	1.06	1.11	0.97	1.04
Hormigonado Forjado 2	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1	0.68	0.69	0.71	0.62	0.65
Clareado Forjado 2	2	-	-	-	-	-
	1	-	-	-	-	-
Descimbrado Forjado 1	2	1.81	1.00	1.28	2.56	2.09
	1	-	-	-	-	-
	3	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
Hormigonado Forjado 3	2	1.27	0.97	1.08	1.27	1.21
	1	-	-	-	-	-
	3	1.25	1.06	1.25	1.15	1.68
Clareado Forjado 3	2	1.66	1.07	1.36	1.67	2.00
	1	-	-	-	-	-
	3	1.11	1.05	1.22	1.02	1.61
Descimbrado Forjado 2	2	-	-	-	-	-
	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Hormigonado Forjado 4	3	1.01	0.94	1.05	0.93	1.14
	2	-	-	-	-	-
PROMEDIO		1.15	0.99	1.09	1.18	1.28
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0.31	0.10	0.17	0.50	0.45
SUMA ERRORES		7.09	4.15	6.05	8.01	9.91

Además, tanto en el edificio experimental como en este en concreto, el promedio obtenido es superior que el proporcionado por el nuevo método simplificado pro Calderón et al (2011), siendo en ambos casos mayor que 1. Un promedio mayor que 1 respecto a las medidas experimentales implica que el método está infravalorando la carga asumida por el sistema de apuntalamiento, estando del lado de la seguridad en cuanto a la carga que absorben los forjados. También es importante mencionar, que el criterio de dimensionamiento del sistema de apuntalamiento se realiza a partir del valor de la carga del puntal más cargado, no siendo el criterio utilizado por los métodos simplificados (carga media absorbida por el sistema de apuntalamiento completo) el criterio de elección del tipo de puntal necesario para resistir dichas cargas. Por lo tanto, además de que las cargas obtenidas para el sistema de apuntalamiento no condicionan la elección de los mismos y el valor de la carga calculada asumida por los forjados está del lado de la seguridad, un promedio mayor que 1 en este caso, aunque indica la desviación respecto a las cargas reales, está del lado de la seguridad.

Tras la doble validación de la aplicación informática que se ha realizado, tanto para el edificio experimental como para el tratado en este capítulo, se considera que la nueva aplicación informática funciona correctamente y puede ser utilizada para el cálculo de los procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ. De esta forma, a continuación, en la tabla 6.13 se calcula y

comprueba el proceso de Cimbrado/Descimbrado de edificios seguido en el edificio de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.

Tabla 6.13 Resultados obtenidos del cálculo y comprobación del proceso de cimbrado/descimbrado del edificio de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.

Operación	Forjado	Carga en forjados [kN/m ²]	Carga en puntales [kN/m ²]	Coefficiente de forjado	Coefficiente de puntales	β	$f_{ct,j}/f_{ct,28}$	$\beta \leq f_{ct,j}/f_{ct,28}?$
Hormigonado Forjado 1	1	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Clareado Forjado 1	1	1.16	4.60	0.20	0.80	0.09	0.60	CUMPLE
Hormigonado Forjado 2	2	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	1	2.43	9.09	0.42	1.58	0.19	0.78	CUMPLE
Clareado Forjado 2	2	2.03	3.73	0.35	0.65	0.16	0.60	CUMPLE
	1	1.99	7.50	0.35	1.30	0.15	0.84	CUMPLE
Descimbrado Forjado 1	2	5.03	0.73	0.87	0.13	0.39	0.66	CUMPLE
	1	6.49	-	1.13	-	0.50	0.86	CUMPLE
	3	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 3	2	8.34	3.18	1.45	0.55	0.65	0.78	CUMPLE
	1	8.94	-	1.55	-	0.69	0.90	CUMPLE
	3	2.59	3.17	0.45	0.55	0.20	0.60	CUMPLE
Clareado Forjado 3	2	6.85	2.08	1.19	0.36	0.53	0.84	CUMPLE
	1	7.84	-	1.36	-	0.61	0.93	CUMPLE
Descimbrado Forjado 2	3	3.43	2.33	0.60	0.40	0.27	0.66	CUMPLE
	2	8.09	-	1.40	-	0.63	0.86	CUMPLE
	4	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 4	3	6.71	4.81	1.16	0.84	0.52	0.78	CUMPLE
	2	10.57	-	1.84	-	0.82	0.90	CUMPLE
	4	2.58	3.18	0.45	0.55	0.20	0.60	CUMPLE
Clareado Forjado 4	3	5.24	3.70	0.91	0.64	0.41	0.84	CUMPLE
	2	9.46	-	1.64	-	0.73	0.93	CUMPLE
Descimbrado Forjado 3	4	4.08	1.68	0.71	0.29	0.32	0.66	CUMPLE
	3	7.44	-	1.29	-	0.58	0.86	CUMPLE
	5	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 5	4	7.35	4.17	1.28	0.72	0.57	0.78	CUMPLE
	3	9.93	-	1.72	-	0.77	0.90	CUMPLE
	5	2.58	3.18	0.45	0.55	0.20	0.60	CUMPLE
Clareado Forjado 5	4	5.89	3.05	1.02	0.53	0.46	0.84	CUMPLE
	3	8.81	-	1.53	-	0.68	0.93	CUMPLE
Descimbrado Forjado 4	5	3.82	1.94	0.66	0.34	0.30	0.66	CUMPLE
	4	7.70	-	1.34	-	0.60	0.86	CUMPLE
	6	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 6	5	7.09	4.43	1.23	0.77	0.55	0.78	CUMPLE
	4	10.19	-	1.77	-	0.79	0.90	CUMPLE
	6	2.58	3.18	0.45	0.55	0.20	0.60	CUMPLE
Clareado Forjado 6	5	5.63	3.31	0.98	0.57	0.44	0.84	CUMPLE
	4	9.07	-	1.57	-	0.70	0.93	CUMPLE
Descimbrado Forjado 5	6	3.93	1.83	0.68	0.32	0.30	0.66	CUMPLE
	5	7.59	-	1.32	-	0.59	0.86	CUMPLE
	7	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 7	6	7.20	4.32	1.25	0.75	0.56	0.78	CUMPLE
	5	10.08	-	1.75	-	0.78	0.90	CUMPLE
	7	2.58	3.18	0.45	0.55	0.20	0.60	CUMPLE
Clareado Forjado 7	6	5.74	3.20	1.00	0.56	0.44	0.84	CUMPLE
	5	8.96	-	1.56	-	0.69	0.93	CUMPLE
Descimbrado Forjado 6	7	3.88	1.88	0.67	0.33	0.30	0.66	CUMPLE
	6	7.64	-	1.33	-	0.59	0.86	CUMPLE
Descimbrado Forjado 7	7	5.76	-	1.00	-	0.45	0.86	CUMPLE

Como se puede observar, como resultados se han obtenido las cargas asumidas por los forjados y puntales para cada una de las operaciones, los coeficientes de forjado y de puntales que consisten en unos valores que expresan la proporción de carga asumida respecto a la carga de uno de los forjados (los coeficientes valen 1 cuando la carga asumida por los forjados o puntales coincide con la carga de 5.76 kN/m^2 , igual al peso propio de uno de los forjados), y finalmente la verificación a través de la condición de descimbrado o de autosuficiencia de forjados de cada uno de los forjados para cada una de las operaciones.

Con los resultados obtenidos de la aplicación informática se ha podido calcular la distribución de cargas entre forjados y puntales así como comprobar que el proceso constructivo planteado cumple con la condición de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados. Por lo tanto, el proceso de cimbrado/descimbrado del edificio planteado es válido según los cálculos llevados a cabo por la aplicación informática. En cuanto a la carga de los forjados, como se había comentado, el forjado que registra un máximo es el último cimbrado con conexión hasta la cimentación cuando por encima de este tiene el número de plantas consecutivas cimbradas, es decir, esta situación se corresponde con el forjado 2 cuando se hormigona el 4. Se corrobora que esta hipótesis es verdadera asumiendo una carga de 10.57 kN/m^2 que se corresponde con un coeficiente de forjado de 1.84, es decir, absorbe una carga de 1.84 veces su peso propio. Por otra parte, el sistema de apuntalamiento siempre presenta su máxima carga en el primer forjado cuando aparece todas las plantas consecutivas cimbradas hasta la cimentación, es decir, en este caso en el forjado 1 cuando se hormigona el forjado 2. Se corrobora que esta hipótesis es verdadera asumiendo una carga de 9.09 kN/m^2 que se corresponde con un coeficiente de puntales de 1.58, es decir, absorbe una carga de 1.58 veces el peso propio de un forjado.

Una vez calculado y comprobado el proceso de cimbrado/descimbrado adoptado para el edificio en cuestión, se ha evaluado el coste económico según la función objetivo considerada en el apartado 5.1.4 con tal de obtener un valor de referencia del coste económico de este proceso para poderlo comparar en el proceso de optimización que se abordará en posteriores apartados. De esta forma, el coste económico estimado asciende **9.38 €/m²**.

6.5 Consideraciones relativas a la búsqueda de una solución óptima

Tanto en el capítulo 2 como en el capítulo 5 se han desarrollado en profundidad todos los aspectos relacionados con el proceso de optimización y las estrategias consideradas en este trabajo final de máster. Por lo tanto, de aquí en adelante, la exposición seguida es una exposición concisa y directa a la obtención de resultados de procesos de cimbrado/descimbrado "óptimos", realizando las consideraciones oportunas que sean aplicables y concretas del caso considerado.

En primer lugar, la primera de las estrategias seguida para la obtención de las soluciones óptimas al proceso de cimbrado/descimbrado de edificios, es evaluar todo el campo de soluciones definido por la totalidad de valores adoptados para cada una de las variables. Los valores y variables consideradas se consideran las mismas que las adoptadas en el apartado 5.1.2. Como se ha comentado, seguir esta estrategia supone un gran coste computacional y tiempo de cálculo que en ocasiones puede ser desmesurado y no factible. Por lo tanto, antes de seguir esta estrategia de optimización evaluando todo

el campo de soluciones, se estima a continuación el tiempo que tardaría en evaluar el campo de soluciones completo.

- Soluciones totales CD: $4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} = 2.6E + 10$ soluciones
- Soluciones totales CCD: $3 * 4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} * 6^n = 2.2E + 16$ soluciones
- Soluciones totales CRD: $2 * 4 * 3 * 3^n * 10^{(n-1)} * 8^n = 1.1E + 17$ soluciones

Por lo tanto, el número total de soluciones que debería comprobar la nueva aplicación informática para comprobar todo el campo de soluciones es de $1.32E+17$. Tal y como se ha valorado anteriormente, si la nueva aplicación informática es capaz de comprobar aproximadamente 57000 soluciones por segundo, sería necesario un tiempo de cálculo de aproximadamente 734.75 siglos. Evidentemente esta no es una opción factible necesitando obligatoriamente recurrir a las estrategias de optimización heurística para la obtención de procesos de cimbrado/descimbrado óptimos para el edificio en cuestión.

6.6 Búsqueda de la solución óptima aplicando técnicas de optimización heurística

Tal y como se ha demostrado en el apartado precedente, la aplicación de estrategias de optimización heurística para la obtención de procesos de cimbrado/descimbrado es obligatoria ya que las posibles soluciones que existen en el campo completo de soluciones ascienden de manera muy rápida en función del número de plantas del edificio.

Las estrategias que se adoptan en este capítulo son las mismas que las adoptadas en el capítulo 5, es decir, se van a obtener procesos de cimbrado/descimbrado óptimos según las estrategias de saltos múltiples aleatorios, por búsqueda local por gradiente en su versión "First Best" y por búsqueda por entornos aplicando cristalización simulada.

Un inconveniente adicional que no aparecía en los cálculos realizados para el edificio experimental es que en este caso no se conocerá el óptimo absoluto al no poder evaluar el campo de soluciones completo.

6.6.1 Estrategia de saltos múltiples aleatorios [Random Walk]

Para aplicar la estrategia de saltos múltiples aleatorios es necesario definir cuantas soluciones va a proceder a comprobar de forma totalmente aleatoria el algoritmo. Es en este punto donde se considera que un tiempo de cálculo aproximado de 5 minutos debería ser suficiente para encontrar soluciones más o menos óptimas. Este criterio se mantendrá para el resto de estrategias con tal de poder comparar la efectividad de las mismas bajo las mismas condiciones. Evidentemente que cuanto mayor sea el tiempo de cálculo, más soluciones comprueba la aplicación informática y por tanto mayor probabilidad existe de obtener soluciones más óptimas. Sin embargo, para este trabajo final de máster se ha decidido adoptar este criterio, con el que se comprueban a través de esta estrategia 10000000 de soluciones totalmente aleatorias.

Como se ha visto en el capítulo 5, esta estrategia dependía en gran medida de la solución inicial a través del parámetro "put". Por lo tanto se plantean de la misma forma 5 casos distintos y se presenta en la tabla 6.14 los resultados obtenidos para cada uno de los casos. También resulta evidente que cuantas más casos se realizaran, así como con mayor tiempo de cálculo por caso, mayor sería la probabilidad de obtener soluciones más óptimas.

Tabla 6.14 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de saltos múltiples aleatorios.

	Soluciones				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 9999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	1	2	2	1
Porcentaje de clareado o recimbrado	66	0	66	66	0
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	1	2	2	1
Separación de sopandas [m]	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49
Separación de puntales planta 1 [m]	0.5	2	1	1	2
Separación de puntales planta 2 [m]	2	2	1	2	2
Separación de puntales planta 3 [m]	0.5	2	2	2	2
Separación de puntales planta 4 [m]	2	2	2	2	2
Separación de puntales planta 5 [m]	1	2	2	2	2
Separación de puntales planta 6 [m]	2	2	1	2	2
Separación de puntales planta 7 [m]	2	2	2	2	2
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 2 [días]	5	10	7	7	8
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 3 [días]	14	8	9	9	12
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 4 [días]	8	11	6	9	9
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 5 [días]	5	8	8	9	10
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 6 [días]	7	8	8	5	8
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 7 [días]	6	8	6	6	9
Tiempo de la oc clareado de la planta 1 [días]	2	-	3	3	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 2 [días]	2	-	4	2	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 3 [días]	4	-	3	6	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 4 [días]	2	-	5	5	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 5 [días]	3	-	4	2	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 6 [días]	2	-	3	2	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 7 [días]	5	-	2	2	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 4 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 5 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 6 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 7 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	4.44	3.92	4.35	4.44	4.15
Duración de la búsqueda (s)	361.58	345.38	345.87	346.66	344.64

Como se puede observar, la solución con menor coste económico es la correspondiente a un "put" igual a 1000 que consiste en un proceso con un sistema CD, 1 planta consecutiva cimbrada y resulta más económico respecto al proceso seguido en la realidad básicamente por la mayor separación de

sopandas y puntales adoptadas, bajando sustancialmente las necesidades de puntales para la construcción del edificio y por tanto, el coste económico del proceso de cimbrado/descimbrado. Esta solución más óptima obtenida a través de esta estrategia supone un coste económico definido según la función objetivo del apartado 5.1.4 de **3.92 €/m²**. Este coste supone, respecto a la solución adoptada en la realidad, una reducción de la función objetivo según la siguiente expresión:

$$\text{Reducción de costes} = \frac{9.38 - 3.92}{9.38} \cdot 100 = 58.21 \%$$

Por lo que se consigue una reducción del coste económico definido según la función objetivo del 58.21 %, aunque por contra supone un incremento del plazo constructivo del edificio al basarse la solución óptima en una menor utilización de puntales y no en la reducción de los plazos constructivos.

6.6.2 Estrategia de búsqueda local por gradiente [First Best]

Para aplicar la estrategia de búsqueda local por gradiente según la modalidad *First Best* es necesario definir cuantos movimientos realizará el algoritmo sin encontrar una solución más óptima que la última encontrada. Es en este punto donde se considera, tras varios ensayos numéricos, un tiempo de cálculo aproximado de 5 minutos tal y como se ha escogido para la anterior estrategia con tal de comparar su efectividad de manera equitativa. Evidentemente que cuanto mayor sea el tiempo de cálculo, más soluciones comprueba la aplicación informática y por tanto mayor probabilidad existe de obtener soluciones más óptimas. Sin embargo, en las simulaciones numéricas realizadas, por más tiempo que se le ha proporcionado al algoritmo, no ha conseguido mejores soluciones.

Como se ha visto en el capítulo 5, esta estrategia dependía en gran medida de la solución inicial a través del parámetro "put". Por lo tanto se plantean de la misma forma 5 casos distintos y se presenta en la tabla 6.15 los resultados obtenidos para cada uno de los casos. También resulta evidente que cuantas más casos se realizaran, así como con mayor tiempo de cálculo por caso, mayor sería la probabilidad de obtener soluciones más óptimas. En este caso, a diferencia de lo realizado para el edificio experimental, solo se ha considerado realizar el movimiento de los valores de dos variables, descartando la opción de realizar el movimiento de tan solo una ya que como se ha comprobado, cabe esperar, que para los problemas de cimbrado/descimbrado sea más adecuado realizar simultáneamente el movimiento de 2 variables para la búsqueda de soluciones más óptimas.

Como se puede observar, la solución con menor coste económico es la correspondiente a un "put" igual a 122222 que consiste en un proceso con un sistema CD, 2 plantas consecutivas cimbradas y resulta más económico respecto al proceso seguido en la realidad básicamente por la mayor separación de sopandas y puntales adoptadas y el tiempo transcurrido para proceder al hormigonado de cada uno de los forjados, bajando de esta forma el coste económico del proceso de cimbrado/descimbrado. Esta solución más óptima obtenida a través de esta estrategia supone un coste económico definido según la función objetivo del apartado 5.1.4 de **4.87 €/m²**. Este coste supone, respecto a la solución adoptada en la realidad, una reducción de la función objetivo según la siguiente expresión:

$$\text{Reducción de costes} = \frac{9.38 - 4.87}{9.38} \cdot 100 = 48.08 \%$$

Tabla 6.15 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de búsqueda local por gradiente con su modalidad *First Best*.

	Soluciones				
	put = 1	put = 1000	put = 5555	put = 12222	put = 999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	1	1	1	1	1
Porcentaje de clareado o recimbrado	0	0	0	0	0
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	2	2	2	2
Separación de sopandas [m]	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49
Separación de puntales planta 1 [m]	0.5	1	1	2	0.5
Separación de puntales planta 2 [m]	2	1	0.5	1	1
Separación de puntales planta 3 [m]	2	2	1	2	2
Separación de puntales planta 4 [m]	1	1	2	1	2
Separación de puntales planta 5 [m]	2	2	1	2	1
Separación de puntales planta 6 [m]	1	2	1	1	1
Separación de puntales planta 7 [m]	1	2	1	2	1
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 2 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 3 [días]	5	5	7	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 4 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 5 [días]	5	5	6	5	6
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 6 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 7 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc clareado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 4 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 5 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 6 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc clareado de la planta 7 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 4 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 5 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 6 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 7 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	5.29	5.29	5.82	4.87	5.46
Duración de la búsqueda (s)	350.68	349.75	342.45	358.76	348.61

Por lo que se consigue una reducción del coste económico definido según la función objetivo del 48.08 %. Sin embargo, respecto a la solución óptima obtenida a través de la estrategia de salto múltiples aleatorios, la solución aquí obtenida encarece el proceso según la siguiente expresión:

$$\Delta \text{coste} = \frac{4.87 - 3.92}{3.92} \cdot 100 = 24.23 \%$$

Por lo tanto, la solución más óptima hasta el momento ha sido obtenida a través de la estrategia de saltos múltiples aleatorios con un coste de 3.92 €/m². En el siguiente apartado se utilizará la estrategia

de búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada con tal de intentar encontrar soluciones más óptimas que las obtenidas hasta el momento.

6.6.3 Estrategia de búsqueda por entornos aplicando cristalización simulada [Simulated Annealing]

Tal y como se ha visto en el apartado 5.5, los únicos parámetros que necesitan de calibración a partir de simulaciones numéricas, son los correspondientes a la longitud de la cadena de Markov y el coeficiente de enfriamiento para los que es necesario establecer un solución de compromiso entre la obtención de soluciones óptimas y el tiempo de cálculo. Para ello se ha utilizado el edificio experimental y se han probado distintos valores de ambos parámetros comparando el coste económico de las soluciones óptimas obtenidas con el tiempo de cálculo necesario para conseguirlas.

Los valores adoptados para realizar las pruebas son los siguientes:

Longitud de la cadena de Markov: [1000 5000 10000 20000]

Factor de enfriamiento: [0.9 0.95 0.98]

Así pues los resultados de las distintas pruebas se presentan en la siguiente tabla (Tabla 6.16).

Como se puede observar a medida que se aumenta el coeficiente de enfriamiento y la longitud de Markov, el tiempo de cálculo necesario aumenta a la vez que aumenta la calidad de la solución óptima encontrada. También cabe destacar que en muy poco tiempo, tan solo 11 segundos, ya se están obteniendo soluciones significativamente óptimas respecto al proceso de cimbrado/descimbrado real. En función del tiempo empleado, de la solución más óptima obtenida y estableciendo como criterio un tiempo de cálculo similar al resto de estrategias adoptadas, se adoptan como longitud de la cadena de Markov un valor de 10000 y como coeficiente de enfriamiento un valor de 0.95. Con esta decisión se podrá comprobar que estrategia es la más óptima. Sin embargo, puede ser que con valores más altos de estos parámetros puedan obtenerse mejores soluciones en detrimento de un tiempo de cálculo superior, tal y como se ha podido observar en la última prueba. Por ello, tras la comparación que se establezca para poder observar cuál es la mejor estrategia, posteriormente se aumentarán ambos parámetros estableciendo una longitud de la cadena de Markov de 40000 y un coeficiente de enfriamiento de 0.98.

Por otra parte, aunque es verdad que la solución inicial (en menor medida que en el resto de estrategias) y la cantidad de movimientos realizadas en cada una de las nuevas soluciones planteadas (1 o 2 según capítulo 5) puedan afectar a los resultados, se plantea de la misma forma que en el resto de estrategias adoptar 5 valores del parámetro "put" distintos con tal de evitar en mayor medida la influencia de la solución inicial. Respecto a la cantidad de movimientos a realizar en cada variación de la solución en la búsqueda de una más óptima, se decide tener en cuenta únicamente la opción en la que se realizan dos movimientos totalmente aleatorios de forma simultánea, ya que como se ha comprobado en el capítulo 5, cabe esperar la obtención de soluciones más económicas.

Tabla 6.16 Calibración de los parámetros correspondientes al coeficiente de enfriamiento y a la longitud de la cadena de Markov.

Prueba	Coefficiente de enfriamiento	Longitud de la cadena de Markov	Coste económico [€/m²]	Tiempo de cálculo [s]
1	0.9	1000	3.13	11.45
2	0.9	5000	3.31	57.85
3	0.9	10000	3.13	109.13
4	0.9	20000	3.13	209.95
5	0.95	1000	3.26	22.20
6	0.95	5000	3.13	107.90
7	0.95	10000	3.01	214.23
8	0.95	20000	3.13	422.60
9	0.98	1000	3.13	54.52
10	0.98	5000	3.10	257.39
11	0.98	10000	3.13	552.82
12	0.98	20000	3.13	1070.51

En primer lugar, en la tabla 6.17 se observan los resultados con un tiempo similar al empleado por el resto de estrategias con tal de poder comparar la eficacia en la búsqueda inteligente de soluciones óptimas.

Como se puede observar, la solución final en función de los parámetros de calibración elegidos sí depende de la solución inicialmente empleada.

Adoptando esta última estrategia de optimización heurística de búsqueda por entornos aceptando la degradación de la función objetivo, se consigue encontrar las soluciones más óptimas con unos tiempos, en este caso, de aproximadamente 210 segundos. Por lo tanto, esta estrategia es la mejor de las planteadas en este trabajo y realiza una búsqueda eficiente e inteligente de las soluciones óptimas al problema planteado.

Además, la solución más óptima obtenida, 3.01 €/m², consiste en un sistema CCD con dos plantas consecutivas cimbradas, un 50 % de clareado (es decir, se retiran 1 de cada 2 sopandas en esta operación) y la máxima separación de sopandas y puntales permitida, con un tiempo de los hormigonados de los forjados de 5 días y con tiempos de clareado mínimos. La única solución posible

más óptima que la obtenida sería la que presentara un porcentaje de clareado del 66 %, aunque se prevé que dicha solución no cumpliría algunas de las condiciones de descimbrado o de autosuficiencia de los forjados. De todas formas se comprobará una solución de este tipo en el siguiente apartado para ver si el proceso de cimbrado/descimbrado apuntado es o no factible.

Tabla 6.17 Procesos de cimbrado/descimbrado óptimos obtenidos por el algoritmo de búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada.

	Soluciones				
	put = 1	put = 1000	put = 55555	put = 122222	put = 9999999
Sistema de cimbrado / descimbrado	2	2	2	2	2
Porcentaje de clareado o recimbrado	50	66	50	66	66
Número de plantas consecutivas cimbradas	2	2	2	2	2
Separación de sopandas [m]	2.49	2.49	2.49	2.49	2.49
Separación de puntales planta 1 [m]	2	1	2	2	2
Separación de puntales planta 2 [m]	2	1	2	1	1
Separación de puntales planta 3 [m]	2	1	2	1	1
Separación de puntales planta 4 [m]	2	1	2	0.5	1
Separación de puntales planta 5 [m]	2	2	2	2	2
Separación de puntales planta 6 [m]	2	1	2	1	1
Separación de puntales planta 7 [m]	2	2	2	2	2
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 1 [días]	0	0	0	0	0
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 2 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 3 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 4 [días]	5	5	5	5	6
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 5 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 6 [días]	5	6	5	6	6
Tiempo de la oc hormigonado de la planta 7 [días]	5	5	5	5	5
Tiempo de la oc clareado de la planta 1 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la oc clareado de la planta 2 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la oc clareado de la planta 3 [días]	2	2	2	2	3
Tiempo de la oc clareado de la planta 4 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la oc clareado de la planta 5 [días]	2	3	2	3	3
Tiempo de la oc clareado de la planta 6 [días]	2	2	2	2	2
Tiempo de la oc clareado de la planta 7 [días]	2	2	2	3	3
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 1 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 2 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 3 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 4 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 5 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 6 [días]	-	-	-	-	-
Tiempo de la oc recimbrado de la planta 7 [días]	-	-	-	-	-
Área del puntal [m ²]	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04	2.89E-04
Coste de la solución óptima (€/m²)	3.01	3.13	3.01	3.13	3.22
Duración de la búsqueda (s)	215.82	222.00	206.03	208.62	210.09

De esta forma, el ahorro económico constatado respecto al proceso de cimbrado/descimbrado real seguido en la construcción del edificio estudiado es de:

$$\text{Reducción de costes} = \frac{9.38 - 3.01}{9.38} \cdot 100 = 67.91 \%$$

Sin embargo, como no se conoce el óptimo absoluto y cabe la posibilidad de que existan soluciones más óptimas desde el punto de vista de la función objetivo, tal y como se ha comentado anteriormente, se prueba a continuación el cálculo con una longitud de la cadena de Markov de 40000 con un coeficiente de enfriamiento de 0.98. Procesados los resultados se observa que el tiempo de cálculo ha sido de 2168 segundos (36.13 minutos) y el coste de la solución óptima obtenida es de 3.01 €/m². Aún así, sobre emplear una cantidad de tiempo mucho mayor al resto de cálculos realizados, el coste económico obtenido es idéntico. Por lo tanto, la solución más óptima obtenida para el edificio estudiado según esta estrategia es aquella que tiene un coste económico, evaluado según la función objetivo del apartado 5.1.4, de 3.01 €/m².

Aunque todos los valores seleccionados constituyen los extremos de los valores proporcionados a la nueva aplicación informática (salvo el porcentaje de clareado), puesto que el algoritmo de optimización heurística considerado ha planteado como solución la solución de la anterior tabla, significa que es una solución factible y que cumple con todas las condiciones de descimbrado o autosuficiencia de los forjados, como se podrá comprobar en el siguiente apartado.

Cabe destacar, por último, que se ha obtenido esta solución comprobando, mediante optimización heurística, una parte muy pequeña del campo de soluciones completo, y que a través de una búsqueda inteligente con pocas comprobaciones, se ha obtenido la solución óptima al problema planteado.

6.7 Comprobación de la validez de la solución más óptima al problema planteado

Este apartado se plantea con el objetivo de obtener la distribución de cargas entre forjados y puntales de la solución más óptima obtenida una vez procesadas las distintas estrategias de optimización heurística de las que ha constado este documento. Analizados los resultados de los apartados 6.6.1, 6.6.2 y 6.6.3, se observa que la solución más óptima obtenida, utilizando como criterio un tiempo de cálculo similar para todas las estrategias, es de 3.01 €/m² obtenida a través de la búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada con dos movimientos en cada una de las nuevas soluciones consideradas por el algoritmo. Por lo tanto, en la siguiente tabla se presentan los resultados de la distribución de cargas entre forjados y puntales para el proceso de cimbrado/descimbrado óptimo obtenido.

Como se puede observar, el proceso de cimbrado/descimbrado óptimo obtenido a partir de una búsqueda inteligente por el campo de soluciones a través de una estrategia de búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada, cumple con todas las condiciones de descimbrado o autosuficiencia de los forjados. Además, también se muestran las cargas asumidas tanto por los puntales como por los forjados para cada una de las plantas y operaciones constructivas, expresadas en valor absoluto y en valor escalado respecto al peso propio de los forjados (coeficientes de forjado).

Tabla 6.18 Proceso de cimbrado/descimbrado más óptimo obtenido por los distintos algoritmos considerando un tiempo de cálculo similar.

Operación	Forjado	Carga en forjados [kN/m ²]	Carga en puntales [kN/m ²]	Coefficiente de forjado	Coefficiente de puntales	β	$f_{ct,j}/f_{ct,28}$	$\beta \leq f_{ct,j}/f_{ct,28}$?
Hormigonado Forjado 1	1	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Clareado Forjado 1	1	3.38	2.38	0.59	0.41	0.26	0.50	CUMPLE
Hormigonado Forjado 2	2	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	1	6.95	4.57	1.21	0.79	0.54	0.71	CUMPLE
Clareado Forjado 2	2	4.11	1.65	0.71	0.29	0.32	0.50	CUMPLE
	1	4.42	2.99	0.77	0.52	0.34	0.78	CUMPLE
Descimbrado Forjado 1	2	4.77	0.99	0.83	0.17	0.37	0.50	CUMPLE
	1	6.75	-	1.17	-	0.52	0.78	CUMPLE
Hormigonado Forjado 3	3	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	2	9.15	2.37	1.59	0.41	0.71	0.71	CUMPLE
	1	8.13	-	1.41	-	0.63	0.84	CUMPLE
Clareado Forjado 3	3	4.07	1.69	0.71	0.29	0.32	0.50	CUMPLE
	2	6.07	1.38	1.05	0.24	0.47	0.78	CUMPLE
	1	7.14	-	1.24	-	0.55	0.88	CUMPLE
Descimbrado Forjado 2	3	4.39	1.37	0.76	0.24	0.34	0.50	CUMPLE
	2	7.13	-	1.24	-	0.55	0.78	CUMPLE
Hormigonado Forjado 4	4	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	3	8.70	2.82	1.51	0.49	0.67	0.71	CUMPLE
	2	8.58	-	1.49	-	0.67	0.84	CUMPLE
Clareado Forjado 4	4	4.07	1.69	0.71	0.29	0.32	0.50	CUMPLE
	3	5.67	1.78	0.98	0.31	0.44	0.78	CUMPLE
	2	7.54	-	1.31	-	0.58	0.88	CUMPLE
Descimbrado Forjado 3	4	4.48	1.28	0.78	0.22	0.35	0.50	CUMPLE
	3	7.04	-	1.22	-	0.55	0.78	CUMPLE
Hormigonado Forjado 5	5	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	4	8.78	2.74	1.53	0.47	0.68	0.71	CUMPLE
	3	8.50	-	1.47	-	0.66	0.84	CUMPLE
Clareado Forjado 5	5	4.07	1.69	0.71	0.29	0.32	0.50	CUMPLE
	4	5.76	1.70	1.00	0.29	0.45	0.78	CUMPLE
	3	7.46	-	1.29	-	0.58	0.88	CUMPLE
Descimbrado Forjado 4	5	4.46	1.30	0.77	0.23	0.35	0.50	CUMPLE
	4	7.06	-	1.23	-	0.55	0.78	CUMPLE
Hormigonado Forjado 6	6	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	5	8.76	2.76	1.52	0.48	0.68	0.71	CUMPLE
	4	8.52	-	1.48	-	0.66	0.84	CUMPLE
Clareado Forjado 6	6	4.07	1.69	0.71	0.29	0.32	0.50	CUMPLE
	5	5.74	1.72	1.00	0.30	0.44	0.78	CUMPLE
	4	7.48	-	1.30	-	0.58	0.88	CUMPLE
Descimbrado Forjado 5	6	4.46	1.30	0.78	0.22	0.35	0.50	CUMPLE
	5	7.06	-	1.22	-	0.55	0.78	CUMPLE
Hormigonado Forjado 7	7	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	6	8.77	2.75	1.52	0.48	0.68	0.71	CUMPLE
	5	8.51	-	1.48	-	0.66	0.84	CUMPLE
Clareado Forjado 7	7	4.07	1.69	0.71	0.29	0.32	0.50	CUMPLE
	6	5.74	1.71	1.00	0.30	0.45	0.78	CUMPLE
	5	7.47	-	1.30	-	0.58	0.88	CUMPLE
Descimbrado Forjado 6	7	4.46	1.30	0.77	0.23	0.35	0.50	CUMPLE
	6	7.06	-	1.23	-	0.55	0.78	CUMPLE
Descimbrado Forjado 7	7	5.76	-	1.00	-	0.45	0.78	CUMPLE

Habitualmente, como se ha comentado anteriormente, el forjado que más carga asume es el último forjado que ha estado conectado a través de los puntales hasta la cimentación en la operación en que

este tiene el mismo número de plantas apuntaladas por encima. Es decir, en un caso de dos plantas consecutivas cimbradas, como es este caso, el forjado que más carga debería asumir es el forjado 2 cuando se hormigona el forjado 4. Sin embargo, en este caso no ocurre así ya que el sistema de apuntalamiento finalmente obtenido presenta un número muy inferior de puntales respecto a un apuntalamiento habitual, reduciendo notablemente la rigidez del conjunto de puntales y por lo tanto cambiando el comportamiento habitual en las distintas operaciones constructivas. Lo mismo ocurre en cuanto a las cargas asumidas por los puntales que, aunque la carga máxima asumida por uno de ellos sí que pueda encontrarse en el forjado 1 cuando se hormigona el forjado 2, en términos medios de carga asumida por el sistema de apuntalamiento no se observa que sea la máxima carga asumida para esta planta en esta operación constructiva.

De esta forma, la máxima carga asumida por los forjados se observa en el forjado 2 cuando se está hormigonando el forjado 3, asumiendo una carga de 9.15 kN/m^2 , que en términos de coeficiente de forjado es de 1.59, es decir, el forjado en este momento está asumiendo 1.59 veces el peso propio del mismo. También se puede observar que la condición de descimbrado, o en este caso de autosuficiencia del forjado, está al límite. En cuanto al sistema de apuntalamiento, la máxima carga asumida no supera el peso propio de los forjados cuando estos están recién hormigonados.

Como se ha comentado anteriormente, es importante que ante la posibilidad y no seguridad de que la nueva aplicación informática obtenga los procesos óptimos absolutos de todo el campo de soluciones formado a partir de los valores de las distintas variables, y que además se puedan obtener procesos de cimbrado/descimbrado complicados de llevar a la práctica constructiva, es necesario que el usuario de la nueva aplicación informática uniformice criterios para tener un proceso de cimbrado/descimbrado coherente en vistas a su posterior construcción y compruebe soluciones desde la lógica que pueden dar lugar a soluciones más óptimas. Por lo tanto, a partir de las soluciones obtenidas por optimización heurística, ahora es el momento de leer la información que proporciona las soluciones obtenidas, y realizar comprobaciones adicionales, a través del módulo de cálculo y comprobación, de las soluciones que se puedan proponer a posteriori.

Así, de esta forma, observando el proceso de cimbrado/descimbrado óptimo obtenido, se puede observar que la solución es bastante coherente, con la misma separación de puntales y sopandas para todas las plantas y el mismo tiempo de hormigonado y clareado de los distintos forjados. Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, cabe la duda de si este proceso de cimbrado/descimbrado podría ser mejorado a partir de establecer un porcentaje de clareado del 66 % en lugar del porcentaje mostrado por la aplicación del 50 %. En un principio, si la aplicación informática hubiera sido capaz de alcanzar la solución óptima absoluta, este proceso que aquí se plantea debería resultar no factible. Por contra, no existe la total seguridad que la nueva aplicación informática, a través de la aplicación de la optimización heurística haya sido capaz de obtener la solución óptima al problema planteado.

Por lo tanto, en la siguiente tabla se presentan los resultados de este nuevo proceso de cimbrado/descimbrado propuesto, para comprobar la factibilidad de la solución y la distribución de cargas entre forjados y puntales.

Tabla 6.19 Proceso de cimbrado/descimbrado propuesto a partir de la modificación del porcentaje de clareado del proceso más óptimo obtenido por los distintos algoritmos.

Operación	Forjado	Carga en forjados [kN/m ²]	Carga en puntales [kN/m ²]	Coefficiente de forjado	Coefficiente de puntales	β	$f_{ct,j}/f_{ct,28}$	$\beta \leq f_{ct,j}/f_{ct,28}$?
Hormigonado Forjado 1	1	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Clareado Forjado 1	1	3.90	1.86	0.68	0.32	0.30	0.50	CUMPLE
Hormigonado Forjado 2	2	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
	1	7.96	3.56	1.38	0.62	0.62	0.71	CUMPLE
Clareado Forjado 2	2	4.48	1.28	0.78	0.22	0.35	0.50	CUMPLE
	1	4.81	2.23	0.84	0.39	0.37	0.78	CUMPLE
Descimbrado Forjado 1	2	4.87	0.89	0.85	0.15	0.38	0.50	CUMPLE
	1	6.65	-	1.15	-	0.52	0.78	CUMPLE
	3	0.00	5.76	0.00	1.00	-	-	-
Hormigonado Forjado 3	2	9.53	1.99	1.65	0.35	0.74	0.71	NO CUMPLE
	1	7.75	-	1.35	-	0.60	0.84	CUMPLE

Solo se muestran los resultados hasta el hormigonado del forjado 3 porque cuando la aplicación informática encuentra un incumplimiento de la condición de descimbrado o autosuficiencia de los forjados se detiene.

Como se ha comentado anteriormente, para el caso de un porcentaje de clareado del 50 %, el forjado 2 cuando se hormigona el forjado 3 se encontraba al límite de su resistencia presentando una carga asumida de 9.15 kN/m². Al establecer un porcentaje mayor de clareado, para comprobar si la solución es factible y si se mejora económicamente a la obtenida, se le está exigiendo aún más al forjado 2 en el hormigonado 3, llegando a incumplir la condición de descimbrado o autosuficiencia de los forjado como ha quedado explícito en la tabla anterior.

Por lo tanto, la mejor solución obtenida por los algoritmos de optimización heurística (50 % de clareado) es la mejor solución de todo el campo de soluciones obtenida para el sistema CCD, ya que los valores obtenidos de todas las variables son los valores extremo proporcionados a la aplicación que producen un ahorro económico del proceso salvo el valor correspondiente al porcentaje de clareado, que se ha demostrado que no es posible mejorarlo.

Además, puesto que probablemente el sistema CCD, para este caso concreto, suponga un sistema más económico que los sistemas CD y CRD según los distintos resultados que se han ido obteniendo, se puede afirmar con casi total seguridad que la solución óptima obtenida por optimización heurística mediante la estrategia de búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada, ha sido capaz de obtener en un tiempo de cálculo reducido y razonable (210 segundos = 3.5 minutos), la solución óptima absoluta de todo el campo de soluciones para el problema planteado.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES, APORTACIÓN ORIGINAL Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

7.1 Conclusiones

A lo largo de este trabajo final de máster se ha conseguido una nueva aplicación informática de ayuda al cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ con ayuda del nuevo procedimiento simplificado desarrollado por Calderón et al (2011). Además del módulo de comprobación y cálculo de procesos de cimbrado/descimbrado, se ha llevado a cabo el desarrollo del módulo de optimización de procesos a partir del que mediante diferentes estrategias y realizando una búsqueda inteligente mediante optimización heurística, se obtiene una solución óptima que optimiza el coste económico de cualquier edificio considerado. La aplicación informática se ha programado en lenguaje FORTRAN, debido a su gran velocidad de procesamiento, y se han empleado 36391 líneas de programa para el funcionamiento de ambos módulos.

Para la consecución de los objetivos marcados, en primer lugar se ha realizado un exhaustivo estado del arte referente a:

- Sistemas de cimbrado para forjados de edificios hormigonados in situ a partir del que se ha decidido contemplar en la nueva aplicación informática los sistemas CD, CCD y CRD.
- Transmisión de cargas durante la construcción, analizando detalladamente los distintos métodos simplificados de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado, a partir del que finalmente se ha escogido para su utilización en la nueva aplicación informática el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011).
- Estimación del plazo de descimbrado a partir del que se ha decidido emplear la condición de descimbrado o autosuficiencia de los forjados establecida por Calavera (1981).
- Técnicas de diseño óptimo habitualmente elegidas en ingeniería a partir de las que se ha decidido emplear en este trabajo final de máster las estrategias correspondientes a saltos múltiples aleatorias, búsqueda local por gradiente y búsqueda por entornos aplicando cristalización simulada.

A partir del análisis realizado en el estado del arte de todos los aspectos necesarios a tener en cuenta para la elaboración de la nueva aplicación informática, se ha realizado la implementación del nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) en la nueva herramienta informática. Es en este punto donde, además de seguir los criterios y las hipótesis establecidas por el método simplificado, se han considerado una serie de hipótesis que deben ser tomadas para proceder al cálculo del método. Entre ellas se encuentran:

- Para el cálculo del diagrama de momentos según el EFM ("*Equivalent Frame Method*") se ha adoptado el cálculo mediante pórticos virtuales, obteniendo en primer lugar los momentos

correspondientes a los pórticos virtuales según los criterios establecidos por F.Regalado (2003), a partir de los que se han repartido según los coeficientes de reparto propuestos por F. Regalado (2003) en las distintas bandas de soportes y centrales, a partir de las que se puede seguir con el cálculo de la deformación de los forjados según Scanlon y Murray, criterio adoptado en el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011).

- Para el cálculo de la inercia de los distintos forjados, en el caso de forjados reticulares, se han considerado las simplificaciones apuntados según F. Regalado (2003), a partir de las que se considera una inercia equivalente para aquellas bandas que contengan tanto zona aligerada como zona de ábacos.
- Se ha aplicado el método de madurez para obtener la evolución de las características mecánicas del hormigón en el tiempo, a partir del que se han seguido los criterios tanto de la EHE-08 como del EC-2 para el cálculo de los distintos parámetros como son el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción del hormigón en función del tiempo.

Tras todas estas consideraciones, a continuación se ha validado el correcto funcionamiento de la nueva aplicación informática a partir de la comparación de los resultados obtenidos por la misma para un edificio experimental utilizado por Alvarado et al (2009), con los resultados obtenidos en la tesis doctoral del mismo relativos a los valores experimentales, los valores obtenidos a partir del método de los elementos finitos, los valores obtenidos por el mismo método simplificado por Calderón et al (2011) en la tesis doctoral, y los valores obtenidos por otros métodos simplificados como son los métodos simplificados por Duan y Chen (1995) y Fant et al (2001). Tras realizar la comprobación a partir de los valores promedios, la desviación típica y la suma de errores cometidos para cada planta en cada operación constructiva, todos ellos con valores respecto a los resultados experimentales (objetivo), se ha obtenido un buen promedio, una aceptable desviación típica y una suma de errores muy reducida, por debajo del resto de métodos simplificados considerados. Por lo tanto, se puede afirmar que la nueva aplicación informática funciona correctamente, con lo que queda validado su correcto funcionamiento. Adicionalmente, la aplicación informática está basada en el nuevo método simplificado por Calderón et al (2011) que presenta un muy buen promedio, una desviación típica y suma de errores reducidas en comparación con el resto de métodos simplificados considerados, desarrollados y planteados por Duan y Chen (1995) y Fang et al (2001).

A continuación, una vez realizado, comprobado y validado el módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado, se ha implementado el módulo de optimización de procesos de cimbrado/descimbrado utilizando como ejemplo de cálculo para cada una de las estrategias consideradas, el edificio experimental tratado en la comprobación y validación del correcto funcionamiento de la nueva aplicación informática. Los resultados obtenidos de la función objetivo para las distintas estrategias de optimización utilizadas, junto con el porcentaje de ahorro económico obtenido, se definen en la tabla 7.1.

Como se puede observar, tras la aplicación de las distintas técnicas de optimización, el ahorro económico que se puede producir, según la función objetivo definida en el apartado 5.1.4, es muy alto considerando un proceso de cimbrado/descimbrado óptimo en lugar del que pudiera plantear un proyectista sin la utilización de esta aplicación. Además, aplicando distintas estrategias de optimización heurística, para las que es posible no alcanzar el óptimo absoluto por el muestreo que

realizan del campo de soluciones completo, se alcanzan porcentajes de ahorro similares a la solución óptima absoluta, conocida al ser posible la evaluación completa del campo de soluciones. Como se preveía, debido a la mayor eficiencia e inteligencia en la búsqueda de soluciones más óptimas que tiene de forma intrínseca la estrategia de cristalización simulada, esta estrategia consigue los mejores resultados, obteniendo en un pequeño intervalo de tiempo la solución óptima absoluta.

Tabla 7.1 Comparación de resultados obtenidos a través de las distintas estrategias de optimización consideradas para el edificio experimental.

	Edificio real	Optimización completa	Salto múltiples aleatorios	Gradiente	Cristalización Simulada
Coste (€/m²) según función objetivo (apartado 5.1.4)	4.12	1.19	1.24	1.50	1.19
Tiempo de cálculo	-	15.85 minutos	5.39 segundos	6.77 segundos	21.74 segundos
% ahorro económico	-	71.12 %	69.90 %	63.59 %	71.12 %

Una vez implementado el módulo de optimización de procesos de cimbrado/descimbrado en la nueva aplicación informática, y comprobado su correcto funcionamiento, se ha realizado una aplicación práctica en donde el objetivo perseguido ha sido la aplicación de la nueva herramienta informática a un edificio real con tal de, en primer lugar, calcular y comprobar el proceso de cimbrado/descimbrado seguido en la realidad, para más tarde utilizar el módulo de optimización con tal de obtener soluciones óptimas y poder observar la optimización en términos económicos que podría llegar a alcanzarse a través de la aplicación de esta herramienta. El edificio utilizado para este fin ha sido el edificio de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia utilizado en la tesis doctoral de Gasch (2012), para el que se conocen los valores experimentales obtenidos y los valores obtenidos a través de la aplicación del método de los elementos finitos y de los distintos métodos simplificados considerados. Por lo tanto, además de realizar una aplicación práctica de la nueva aplicación informática, se ha podido volver a comprobar su correcto funcionamiento.

Tras la comprobación realizada, se ha podido demostrar otra vez el correcto funcionamiento de la nueva aplicación informática como herramienta de cálculo simplificado de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios. A partir de aquí se han ejecutado las distintas herramientas de optimización heurística consideradas. A diferencia del caso de ejemplo utilizado anteriormente, en este caso no ha sido posible estudiar el campo completo de soluciones, ya que el tiempo de cálculo necesario ascendía a 734.75 siglos. Sin embargo, el resto de estrategias, correspondientes a las estrategias de optimización heurística, sí que pueden ser utilizadas ya que el tiempo de cálculo es un parámetro que puede ser controlado a través de los parámetros de cada una de las estrategias. Para poder comparar los resultados de las distintas estrategias de optimización heurística, tras realizar una serie de simulaciones numéricas, se ha establecido un tiempo de cálculo similar para cada una de ellas

con tal de poder comparar los resultados obtenidos y la eficacia de cada uno de los métodos. En la siguiente tabla se presentan de forma resumida los resultados obtenidos.

Como se puede observar, la estrategia de optimización heurística más eficiente es la de búsqueda por entornos aplicando Cristalización Simulada ya que es la que obtiene una solución de menor coste en un tiempo inferior.

Tabla 7.2 Comparación de resultados obtenidos a través de las distintas estrategias de optimización consideradas para el edificio de bellas artes.

	Edificio real	Saltos múltiples aleatorios	Gradiente	Cristalización Simulada
Coste [€/m²] según función objetivo (apartado 5.1.4)	9.38	3.92	4.87	3.01
Tiempo de cálculo [segundos]	-	345	359	210
% ahorro económico	-	58.21 %	48.08 %	67.91 %

Por lo tanto, aplicando el módulo de optimización de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, se han obtenido ahorros económicos del sistema de apuntalamiento, evaluados según la función objetivo definida en el apartado 5.1.4, del orden del 71 % para el edificio experimental y del 68 % para el edificio de Bellas Artes, siendo ambos unos porcentajes de reducción respecto a las soluciones adoptadas en la realidad muy elevados.

Con todo, tras el desarrollo de este trabajo final de máster se ha conseguido una aplicación informática de apoyo al cálculo de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, que funciona correctamente para evaluar la distribución de cargas entre forjados y puntales y comprobar su cumplimiento, a través del módulo de cálculo y comprobación, además de poder ejecutar el módulo de optimización para obtener procesos de cimbrado/descimbrado óptimos desde el puntos de vista del coste del sistema de apuntalamiento, obteniendo porcentajes de ahorro económico, respecto a soluciones que habitualmente han sido empleadas en la realidad, el orden del 70 %.

7.2 Aportación original del Trabajo Final de Máster

Tras el desarrollo del presente trabajo final de máster se ha desarrollado una aplicación informática compuesta, fundamentalmente, de dos módulos. El primero, se corresponde con el módulo de cálculo y comprobación de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, en base al nuevo procedimiento simplificado de cálculo por Calderón et al (2011) y a las hipótesis contrastadas consideradas en este trabajo. En este punto, aunque se le dotado de generalidad al método propuesto por Calderón et al (2011) para que una aplicación informática sea capaz de tenerlo en

cuenta, la aportación realizada es tan solo la automatización del proceso de cálculo y comprobación y, por lo tanto, no supone ninguna novedad respecto a lo ya realizado por otros investigadores.

El segundo se corresponde con el módulo de cálculo de procesos óptimos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, con el que la aplicación informática es capaz de obtener procesos óptimos, en este caso desde el punto de vista económico, sin la necesidad de contar con la experiencia del proyectista y desde un punto de vista objetivo. La verdadera aportación original de este trabajo final de máster se basa en el desarrollo de este módulo al tratarse un tema novedoso nunca tratado anteriormente y para el que, además, se ha podido automatizar el proceso.

7.3 Futuras líneas de trabajo

El desarrollo realizado en el presente trabajo final de máster ha ido dirigido a la obtención de una aplicación informática de apoyo al cálculo de procesos de cimbrado/descimbrado de edificios en altura hormigonados in situ, además de proporcionar soluciones óptimas para un determinado problema planteado. Sin embargo, aunque en este punto la aplicación informática tiene autonomía para funcionar correctamente tal y como ha sido concebida en este trabajo, en un futuro pueden adoptarse las siguientes líneas de trabajo para mejorar la aplicación planteada en base a la mejora de las hipótesis adoptadas así como la incorporación de otras posibles opciones, de la forma que se indica en los siguientes puntos:

- Respecto al cálculo simplificado adoptado para determinar la deformación media de los forjados se podría considerar, a diferencia de los considerado en este trabajo, los siguientes puntos:
 - Mejorar el cálculo de momentos y su repartición en bandas centrales y de soportes a partir de la aplicación, por ejemplo, del método de rigidez de cálculo de esfuerzos en estructuras.
 - Mejorar la consideración de la inercia equivalente en forjados reticulares en aquellos casos en los que en una banda (de soportes habitualmente) aparecen zonas con ábacos y zonas aligeradas.
- Utilización y comprobación de su eficiencia de otras estrategias de optimización heurística para poder determinar cuál es la mejor estrategia.
- Definir y establecer otras funciones objetivo con tal de obtener procesos de cimbrado/descimbrado óptimos desde diversos puntos de vista, como pueden ser: duración del proceso, sostenibilidad, facilidad constructiva, seguridad, etc; o una combinación de algunas de las anteriores.
- Dotar de robustez a la aplicación para el correcto funcionamiento de los algoritmos de optimización heurística para todos los casos con tal de que el usuario final de la nueva aplicación informática no tenga que elegir los parámetros más adecuadas de las distintas estrategias, adoptando criterios robustos para que la nueva aplicación sea capaz de asignar valores a esos parámetros.
- Mejorar la interfaz gráfica con tal de proporcionar al usuario final de la aplicación una entrada de datos amigable y sencilla.

REFERENCIAS

- ACI Committee 347 (1988). "Guide to formwork for concrete", ACI Structural Journal, 530-562.
- ACI Committee 347 (2005). "Guide for shoring/reshoring of concrete multistory buildings", Farmington Hills.
- Adam JM, Pallarés FJ, Calderón PA, Payá IJ (2007). "A study of the conditions of use of a new safety system for the building industry", Engineering Structures, 29(8), 1690-1697.
- Adeli H, Sharma K (2006). "Cost optimization of structures. Fuzzy, Genetic Algorithms and Parallel Computing". Ed. Wiley-VCH.
- AENOR (1996). "UNE 83316:1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad de hormigón a compresión", Madrid.
- AENOR (2003). "UNE -EN 12390-3:2003. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas", Madrid.
- Agarwal RK, Gardner NJ (1974). "Form and shore requirements for multi-story flat slab type buildings", ACI Journal Proceedings, 71(11), 559-569.
- Alcalá J (2009). "Optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados" Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia).
- ALSINA (2009). "Catálogo general de productos y servicios".
- Alvarado YA, Calderón PA, Pallarés FJ, Pellicer T (2005). "Estimation of shore removal times in bidirectional in situ concrete floor slabs applying the maturity method", Bangkok, Thailand.
- Alvarado YA (2007). "Definición de un modelo experimental y numérico de la construcción de forjados bidireccionales hormigonados in situ mediante cimbrado y descimbrado de plantas sucesivas con clareado de puntales", Dpto. de Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil, Universidad Politécnica de Valencia.
- Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Pallares FJ, Payá IJ, Pellicer T (2008). "Cargas en puntales en la construcción de edificios con clareado", IV Congreso de ACHE Congreso Internacional de Estructuras, Valencia.
- Alvarado YA, Calderón PA, Adam JM, Payá IJ, Pellicer T, Pallares FJ, Moragues JJ, (2009). "An experimental study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings using partial striking", Engineering Structures (2009), doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.021.

Alvarado YA (2009). "Estudio experimental y numérico de la construcción de forjados hormigonados in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas" Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia).

Alvarado YA, Calderón PA, Gasch I, Adam JM, (2010). "A numerical study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multistory buildings. Comparison of partial striking with other techniques", *Engineering Structures* (2010), doi: 10.1016/j.engstruct.2010.05.028.

Alvarez R (1983). "Comportamiento de las estructuras de hormigón en edificación durante el proceso constructivo", *Hormigón y Acero*, 152, 25-37.

Ambrose TP, Huston DR, Fuhr PL, Devino EA, Werner MP (1994). "Shoring systems for construction load monitoring", *Smart Materials and Structures*, 3, 26-34.

ASTM (1999). "Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM C 1074-98", Philadelphia.

Balling R (1991). "Optimal steel frame design by Simulated Annealing". *ASCE Journal of Structural Engineering*.

Buitrago (2012). "Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puntales en la construcción de edificios de forjados consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia". Proyecto Final de Carrera.

Calavera J, Fernández J (1991). "Cuaderno N° 3: Criterios para el descimbrado de estructuras de hormigón", INTEMAC, Madrid.

Calavera J (2002). "Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación", INTEMAC, Madrid.

Calderón PA, Alvarado YA, Adam JM, (2011). "A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings", *Engineering Structures* (2011), doi: 10.1016/j.engstruct.2011.01.027.

Camp C, Pezeshk S, Hansson H (2003). "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm". *ASCE Journal of Structural Engineering*.

Catalá J, Moragues JJ, Salort V, Sirvent PL (1992). "Transmisión de cargas entre forjados durante el proceso constructivo: Medidas realizadas en obra", Valencia.

CEB-FIP (1991). "Model code 90", Laussane.

Ceracnic B, Fryer C, Bines RW (2001). "An application of simulated Annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures". *Computers and Structures*.

Chen WF, Mosallam K (1991). "Concrete buildings: Analysis for safe construction", Boca Raton.

Díaz J (2008). "Criterios técnicos para el descimbrado de estructuras de hormigón", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

- Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A (1996). "Ant System: optimization by a colony of cooperating agents". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.
- Dowland, K.A. "Some experiments with Simulated Annealing Techniques for packing problems". European Journal of Operational Research 68:389-399. 1993.
- Duan MZ, Chen WF (1995). "Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction", Project Report CE-STR-95-24, West Lafayette, Ind.
- Duan MZ, Chen WF (1996). "Design guidelines for safe concrete construction", Concrete International, 18(10), 44-49.
- El-Shahhat AM, Chen WF (1992). "Improved analysis of shore-slab interaction", ACI Structural Journal, 89(5), 528-537.
- ENV 1992-1-1 (Eurocode N° 2) (1991). "Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for Buildings".
- Fang DP, Zhu HY, Geng CD, Liu XL (2001). "On site measurement of load distribution in reinforced concrete buildings during construction", ACI Structural Journal, 98(2), 157-163.
- Fang DP, Geng CD, Zhu HY, Liu XL (2001). "Floor load distribution in reinforced concrete buildings during construction", ACI Structural Journal, 98(2), 149-156.
- Fernández J (1986). "Estudio experimental de la evolución de las características mecánicas del hormigón curado en diversas condiciones y su aplicación al cálculo de los procesos de descimbrado", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Gasch I (2012). "Estudio de la evolución de cargas en forjados y estructuras auxiliares de apuntalamiento durante la construcción de edificios de hormigón in situ mediante procesos de cimbrado, clareado y descimbrado de plantas consecutivas" Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia).
- Glover F, Laguna M (1997). "Tabu Search". Boston, Kluwer Academic Publishers.
- Grundy P, Kabaila A (1963). "Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings", ACI Structural proceedings, 60(12), 1729-1738.
- Guo C (1989). "Maturity of concrete: method for predicting early-stage strength", ACI Materials Journal, 86(4), 341, 353.
- IVE. "Base de precios 2014".
- Johnston DW, Wheeler LK (2003). "Guide to formwork for concrete", ACI 347, 347-1, 347-32.
- Kaminetzky D, Stivaros P (1994). "Early-Age Concrete: Construction Loads, Behavior, and failures", Concrete International, 16(1), 58-62.
- Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP (1983). "Optimization by simulated annealing". Science n° 220.

Lee HM, Liu XL, Chen WF (1991). "Creep analysis of concrete buildings during construction", *Journal of Structural Engineering*, 117(10), 3135-3148.

Liu XL, Chen WF, Bowman MD (1985). "Construction load analysis for concrete structures", *Journal of Structural Engineering*, 111(5), 1019-1036.

Liu XL, Chen WF, Bowman MD (1985). "Construction loads on supporting floors", *Concrete International*, 7(12), 21-26.

Liu XL, Chen WF, Bowman MD (1986). "Shore-slab interaction in concrete buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(2), 227-244.

Liu XL, Chen WF (1987). "Probability distribution of maximum wooden shore loads in multistory R/C buildings", *Structural Safety*, 4, 197-215.

Lundy M, Mees A (1986). "Convergence of an Annealing Algorithm". *Mathematical Programming*.

Marí AR, Serrà I (1995). "Criterios para la determinación de plazos de descimbrado en estructuras de hormigón armado solicitadas a flexión", *Hormigón y Acero*, 197, 41-55.

Metrópolis N, Rosenbluth AW, Rosenbluth MN, Teller AH, Teller E (1953). "Equation of state calculation by Fast Computing Machines". *Journal of Chemical Physics*.

Ministerio de Fomento (1999). "Instrucción de hormigón estructural. EHE", Comisión Permanente del Hormigón, Madrid.

Ministerio de Fomento (2002). "Guía de aplicación de la instrucción de hormigón estructural: edificación", Comisión Permanente del Hormigón, Madrid.

Ministerio de Fomento (2008). "Instrucción de hormigón estructural. EHE-08", Comisión Permanente del Hormigón, Madrid.

Moragues JJ (1992). "Algunas mediciones reales en cimbrados de plantas consecutivas realizadas en España", Valencia.

Moragues JJ, Catalá J, Pellicer E (1994). "Mediciones en obra y análisis teórico de estructuras de edificación, de hormigón armado, durante el proceso de cimbrado consecutivo de forjados", *Hormigón y Acero*, 190, 83-91.

Moragues JJ, Catalá J, Pellicer E (1996). "An analysis of concrete framed structures during the construction process", *Concrete International*, 18(11), 44-48.

Mosallam K, Chen WF (1990). "Design considerations for formwork in multistorey concrete buildings", *Engineering Structures*, 12(3), 163-172.

Mosallam K, Chen WF (1991). "Determining shoring loads for reinforced concrete construction", *ACI Structural Journal*, 88(3), 340-350.

Mosallam K, Chen WF (1992). "Construction load distributions for laterally braced formwork", *ACI Structural Journal*, 89(4), 415-424.

- Pallett P (2001). "Guide to flat slab formwork and falsework", CONSTRUCT, Berkshire.
- Pallett P (2003). "Striking of flat slabs", Concrete, 37(5), 30-32.
- Payá IJ (2007). "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado" Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia).
- Perepérez B (1981). "La resistencia a compresión simple, la resistencia a tracción y el módulo de deformación de hormigones fabricados con cementos PA-350", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Perepérez B, Barberá E (2004). "Cuaderno N° 55: Temperatura, madurez y resistencia del hormigón", INTEMAC, Madrid.
- Regalado F (2003). "Los forjados reticulares: diseño, análisis, construcción y patología". Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros. ISBN: 84-930696-0-4.
- SANRO (2014). "Obras realizadas".
- Serrà I, Marí AR, Lopez F (1993). "Estudio experimental del comportamiento de las vigas de hormigón armado, descimbradas a tempranas edades", Hormigón y Acero, 189, 93-105.
- Serrà I (1994). "Estudio experimental del comportamiento de vigas de hormigón armado descimbradas a tempranas edades", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Stivaros P, Halvorsen G (1990). "Shoring reshoring operations for multistory buildings", ACI Structural Journal, 87(5), 589-596.
- Stivaros P, Halvorsen G (1991). "Equivalent frame analysis of concrete buildings during construction", Concrete International, 13(8), 57-62.
- Taylor PJ (1967). "Effects of formwork stripping time on deflections of flat slabs and plates", Australian civil engineering and construction, 8(2), 31-35.
- Tzan SR, Pantelides C (2000). "Annealing Strategy for optimal structural design". Advances in Engineering Software.
- UNISPAN (2014). "Encofrados UNISPAN para losa".
- Waller V, d'Aloia L, Cussigh F, Lecrux S (2004). "Using the maturity method in concrete cracking control at early ages", Cement and Concrete Composites, 26, 589-599.
- Yepes V (2002). "Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW" Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia).

APÉNDICE 1. CÁLCULO DE LA DEFORMACIÓN MEDIA PARA CADA BANDA

En el capítulo 3, apartado 3.2, se ha comentado que el desplazamiento medio para cada una de las bandas (centrales y de soportes) se calcula a partir de la ecuación de la viga elástica según la expresión siguiente:

$$\bar{\Delta}_s = \frac{q \cdot L^4}{120 \cdot E \cdot I} - \frac{(M_1 + M_2) \cdot L^2}{24 \cdot E \cdot I} \quad (A1.1)$$

El objetivo perseguido por este apéndice es demostrar la expresión anterior para el cálculo de la deformación media de los forjados a partir de la ecuación de la viga elástica.

Para el cálculo de la deformación media de los forjados (\bar{y}) se debe aplicar la siguiente expresión en donde se igualan las áreas para cada una de las bandas, por una parte el área que encerraría una deformación media, y por otra el área que encerraría la ecuación de la viga elástica biapoyada sometida a carga uniformemente repartida con dos momento M_1 y M_2 en sus extremos ($y(x)$).

$$\bar{y} \cdot L = \int_0^L y(x) dx \quad (A1.2)$$

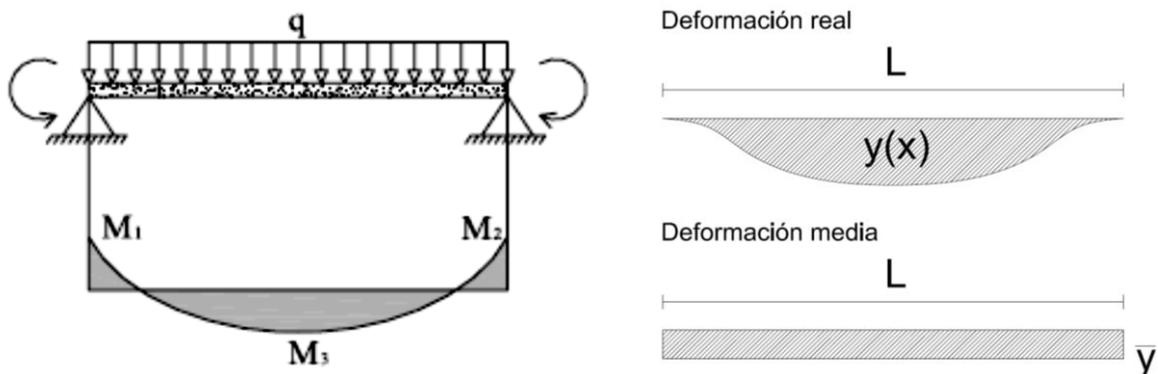


Fig. A1.1 Viga elástica biapoyada sometida a carga uniformemente repartida con momentos M_1 y M_2 en sus extremos (izquierda). Esquemas ilustrativos de la deformación real de la viga elástica y su deformación media (derecha).

Consultando el prontuario, la ecuación de la deformación real de una viga elástica sometida a las cargas según la figura anterior sigue la siguiente expresión en función de la coordenada x tomada con origen ($x = 0$) en el inicio de la viga.

$$y(x) = \frac{q}{24EI} (x^4 - 2Lx^3 + L^3x) - \frac{M_1}{6EI} \left[x \cdot (L - x) + \frac{x \cdot (L-x)^2}{L} + x \cdot (L - x) \cdot \frac{M_2}{M_1} \cdot \left(1 + \frac{x}{L} \right) \right] \quad (A1.3)$$

Desarrollando ahora dicha expresión para poderla integrar posteriormente de manera más sencilla se tiene:

$$y(x) = \frac{q}{24EI}(x^4 - 2Lx^3 + L^3x) - \frac{M_1}{6EI} \left[xL - x^2 + \frac{x \cdot (L^2 - 2Lx + x^2)}{L} + \frac{M_2}{M_1} \cdot (xL - x^2) + \frac{M_2}{M_1} \cdot \left(x^2 - \frac{x^3}{L} \right) \right]$$

$$y(x) = \frac{q}{24EI}(x^4 - 2Lx^3 + L^3x) - \frac{M_1}{6EI} \left[xL - x^2 + xL - 2x^2 + \frac{x^3}{L} + \frac{M_2}{M_1} \cdot (xL - x^2) + \frac{M_2}{M_1} \cdot \left(x^2 - \frac{x^3}{L} \right) \right]$$

$$y(x) = \frac{q}{24EI}(x^4 - 2Lx^3 + L^3x) - \frac{M_1}{6EI} \left[2xL - 3x^2 + \frac{x^3}{L} + \frac{M_2}{M_1} \cdot (xL - x^2) + \frac{M_2}{M_1} \cdot \left(x^2 - \frac{x^3}{L} \right) \right]$$

Una vez desarrollada la función, se calcula a continuación la integral analítica de la ecuación (A1.2):

$$\int y(x)dx = \frac{q}{24EI} \left(\frac{x^5}{5} - 2L \frac{x^4}{4} + L^3 \cdot \frac{x^2}{2} \right) - \frac{M_1}{6EI} \left[L \cdot \frac{x^2}{2} \cdot 2 - 3 \cdot \frac{x^3}{3} + \frac{x^4}{4L} + \frac{M_2}{M_1} \left(\frac{x^2L}{2} - \frac{x^3}{3} \right) + \frac{M_2}{M_1} \left(\frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4L} \right) \right]$$

$$\int y(x)dx = \frac{q}{24EI} \left(\frac{x^5}{5} - 2L \frac{x^4}{4} + L^3 \cdot \frac{x^2}{2} \right) - \frac{M_1}{6EI} \left[\frac{x^4}{4L} - x^3 + Lx^2 + \frac{M_2}{M_1} \left(-\frac{x^4}{4L} + \frac{x^2L}{2} \right) \right]$$

Obteniendo de esta forma el valor de la integral entre $x = 0$ y $x = L$.

$$\int_0^L y(x)dx = \frac{q}{24EI} \left(\frac{L^5}{5} - 2L \cdot \frac{L^4}{4} + \frac{L^5}{2} \right) - \frac{M_1}{6EI} \left[\frac{L^4}{4L} - L^3 + L^3 + \frac{M_2}{M_1} \left(-\frac{L^4}{4L} + \frac{L^3}{2} \right) \right]$$

$$\int_0^L y(x)dx = \frac{q}{24EI} \cdot \frac{L^5}{5} - \frac{M_1}{6EI} \cdot \frac{L^3}{4} - \frac{M_2}{6EI} \cdot \frac{L^3}{4} = \frac{q \cdot L^5}{120EI} - \frac{(M_1 + M_2) \cdot L^3}{24EI}$$

Finalmente, volviendo a la expresión (A1.2) y sustituyendo el valor de la integral calculado se puede obtener la deformación media de los forjados para cada una de las bandas:

$$\bar{y} \cdot L = \int_0^L y(x)dx \quad \Longrightarrow \quad \bar{y} = \frac{q \cdot L^4}{120EI} - \frac{(M_1 + M_2) \cdot L^2}{24EI} \quad (A1.4)$$

Demostrando de esta forma que la deformación media aquí calculada (\bar{y}), coincide con la deformación media de los forjados para cada una de las bandas ($\bar{\Delta}_s$) considerada en este trabajo final de máster y por el nuevo método simplificado de cálculo por Calderón et al (2011).

APÉNDICE 2. ESTIMACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD REAL DEL EDIFICIO EXPERIMENTAL

A2.1 Introducción

La aplicación de la técnica de la madurometría permite estimar la evolución de las propiedades mecánicas del hormigón, en función de su edad. Esta técnica se basa en la medición de la temperatura del hormigón y el conocimiento de su edad para, posteriormente, obtener la evolución de cualquier parámetro mecánico en tiempo real y para un historial de temperaturas dado.

A partir de los resultados de ensayos de módulo de elasticidad en probetas cilíndricas y de los registros de tiempo y temperatura de cada uno de los forjados, en el presente Apéndice se obtiene la evolución del módulo de elasticidad del hormigón para el edificio experimental.

A2.2 Evolución del módulo de elasticidad del edificio experimental

A2.2.1 Datos de partida

El dato de partida son los resultados de los ensayos del módulo de elasticidad en probetas cilíndricas normalizadas de 30x15 cm, fabricadas con el hormigón del forjado 1. Estas probetas fueron curadas en idénticas condiciones de obra que el forjado 1, y su temperatura se registró embebiendo un termopar en el hormigón de la probeta. Las probetas fueron ensayadas a 1, 3, 7 y 28 días. La Tabla A2.1 muestra los resultados de los ensayos de las probetas.

Tabla A2.1 Resultados de los ensayos de módulo de elasticidad

Tiempo (Días)	Módulo de deformación (GPa)	Módulo de deformación (GPa)	Módulo de deformación (GPa)
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio
1	21.44	19.48	20.46
3	28.08	27.43	27.75
7	29.54	27.47	28.50
28	34.51	32.79	33.65

Por otro lado, es necesario conocer la evolución de temperaturas y tiempo (medido desde el hormigonado) en las probetas. En la Tabla A2.2 se observa la evolución media diaria de temperaturas en las probetas de hormigón del forjado 1.

Tabla A2.2 Evolución de la temperatura del hormigón de las probetas del forjado 1 del edificio experimental.

Tiempo (Días)	Temperatura promedio (°C) Probeta F+01
1	15.76
2	12.28
3	13.08
4	14.62
5	12.70
6	15.55
7	15.42
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	12.42
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	

A2.2.2 Aplicación de la madurometría

La estimación del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados del edificio experimental se realiza empleando la técnica de la madurometría. Esta técnica permite mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo (medido desde el hormigonado), evaluar la evolución de cualquier parámetro mecánico en tiempo real y para una temperatura dada.

Aprovechando que el hormigón de los tres forjados tiene la misma dosificación, la estimación del módulo de elasticidad se basa en la evolución de dicho módulo en las probetas de hormigón del forjado 1, y en el registro de tiempo y temperatura realizado.

En el siguiente apartado se describe brevemente el método de la madurez, justificando los valores del módulo de elasticidad empleados en el desarrollo de los capítulos 4 y 5 del presente Trabajo Final de Máster.

A2.2.2.1 El método de la madurez

El método de la madurez ha sido empleado durante mucho tiempo para determinar las propiedades mecánicas del hormigón a edades tempranas. Además, a menudo es empleado para determinar la edad

que debe tener el hormigón para poder desencofrar una estructura de hormigón. Ejemplos del empleo del método de la madurez se pueden encontrar en Waller et al. (2004), Adam et al. (2007), Alvarado (2009) y Gasch (2012).

El concepto de la madurez define el estado que ha alcanzado el hormigón en el proceso de hidratación del cemento. Por lo tanto, se puede decir que la madurez representa el grado de desarrollo alcanzado por una determinada propiedad de una mezcla de base de cemento, y depende de la historia de temperaturas a lo largo del proceso de curado (ASTM C 1074-98 1999).

La madurez se basa en el principio de tiempo equivalente, considerando una energía de activación aparente del material para estimar la evolución de las propiedades del hormigón puesto en obra.

El tiempo equivalente o edad teórica se puede definir como el número j de días (o de horas) necesario, a una temperatura de referencia T_R , para que la madurez de la mezcla se iguale a la alcanzada con temperaturas distintas a la de referencia, aplicadas durante un periodo de tiempo t (ASTM, 1999). Con base en la ley de Arrhenius (Ec. A2.1) (Guo 1989) (Laplante 1994), P. Freiesleben Hansen y E.J. Pedersen en 1977 propusieron la Ec. A2.2 de tiempo equivalente (CEB 1992).

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (\text{A2.1})$$

donde, k es la constante de velocidad (1/s para una reacción de primer orden, A la constante denominada factor de frecuencia (1/s para un reacción de primer orden), E la energía de activación (independiente de la temperatura), T la temperatura en grados kelvin y R la constante de los gases perfectos (8.3144 J/°K mol).

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left(e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{273+T_R} - \frac{1}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (\text{A2.2})$$

siendo, j el tiempo equivalente en días, E la energía de activación aparente (J/mol), T_R la temperatura de referencia y T_i la temperatura en el intervalo de tiempo Δt_i en grados centígrados.

Habitualmente se suele utilizar un valor único para la energía de activación aparente. Según propuesta del Código Modelo CEB-FIP 1990 (CEB-FIP 1993), coincidente con la del anejo B del Eurocódigo 2, se puede considerar para el hormigón una energía aparente de activación constante e igual a 33258 J/mol y una temperatura de referencia de 20°C. De esta forma el tiempo equivalente se puede expresar como muestra la Ec. A2.3.

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left(e^{\left(13.65 - \frac{4000}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (\text{A2.3})$$

El campo de aplicación de este modelo se extiende entre las temperaturas de 0 °C y 60°C y con cementos con contenidos relativamente reducidos de adiciones (tipos CEM I y CEM II) (fib 1999).

A2.2.2.2 Estimación del módulo de elasticidad

La Figura A2.1 muestra la línea de tendencia para los resultados del módulo de elasticidad de las probetas de hormigón. Cada uno de los valores de módulo de elasticidad se corresponde a un tiempo y a una temperatura del hormigón de la probeta.

Empleando la ecuación A2.3 se determina el tiempo equivalente para una temperatura de referencia de 20°C del hormigón de la probeta de hormigón. Así, se determina la función y línea de tendencia que relaciona la evolución del módulo de elasticidad con el tiempo equivalente para una temperatura de referencia de 20°C. La Tabla A2.3 muestra el tiempo equivalente para la probeta de hormigón. La Figura A2.2 muestra la línea de tendencia para la evolución del módulo de elasticidad para una temperatura de referencia de 20°C.

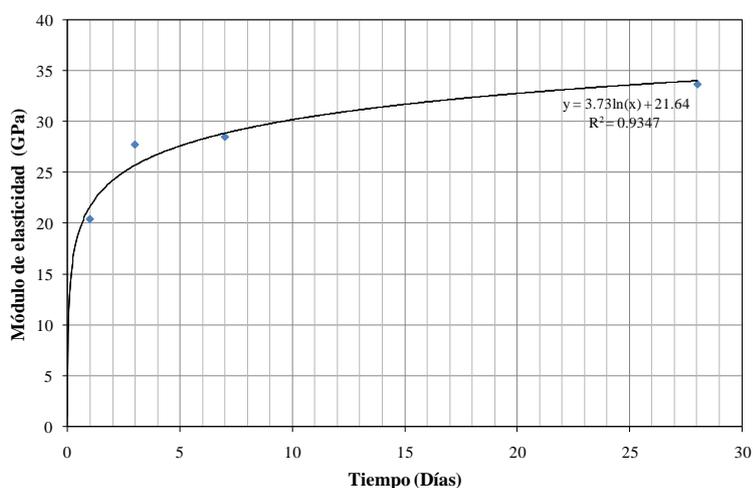


Fig. A2.1 Evolución del módulo de elasticidad de la probeta de hormigón

Tabla A2.3 Tiempo equivalente probeta de hormigón

Tiempo (Días)	Temperatura (°C)	Tiempo Equivalente (Días)	Módulo de deformación (GPa) Promedio
1	15.77	0.82	20.46
2	12.28	1.51	24.23
3	13.08	2.22	27.75
4	14.62	3.00	25.74
5	12.70	3.70	26.82
6	15.55	4.51	27.65
7	15.42	5.31	28.50
28	12.05	27.00	33.65

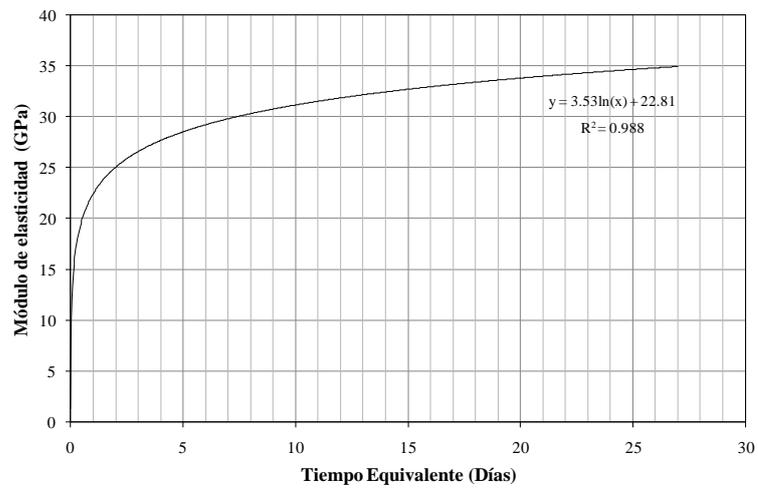


Fig. A2.2 Evolución del módulo de elasticidad para el tiempo equivalente a una temperatura de referencia 20°C.

Así, la ecuación que representa la evolución del módulo de elasticidad del hormigón es:

$$E_t = 3.53 \cdot \ln(j) + 22.81 \quad (\text{A2.4})$$

donde, E_t es el módulo de elasticidad para una edad de t días (GPa) y j es el tiempo equivalente para una edad de t días.