



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE  
VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



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 FIN DE CARRERA TIPO II

Titulación: Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Especialidad: Construcciones Civiles y Edificación

Autor: Manuel Buitrago Moreno

Tutor: José Miguel Adam Martínez

Cotutor: Yezid Alexander Alvarado Vargas

Valencia, Mayo de 2.012



## INDICE GENERAL

### INDICE DE FIGURAS

### INDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 1.1 Introducción..... | 1.1 |
| 1.2 Objetivos.....    | 1.3 |
| 1.3 Contenido.....    | 1.3 |

### CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

|  |      |
|--|------|
| 2.1 Introducción.....  | 2.1  |
| 2.2 Sistemas y procesos de cimbrado para forjados de edificación hormigonados in situ..... | 2.1  |
| 2.2.1 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado y descimbrado .....                         | 2.3  |
| 2.2.2 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, recimbrado y descimbrado .....             | 2.3  |
| 2.2.3 Apuntalamiento en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado .....               | 2.4  |
| 2.3 Transmisión de cargas durante la construcción .....                                    | 2.4  |
| 2.3.1 Modelos Teóricos.....  | 2.4  |
| 2.3.1.1 Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) .....                               | 2.5  |
| 2.3.1.2 Método simplificado de Duan y Chen (1995) .....                                    | 2.7  |
| 2.3.1.3 Método simplificado de Fang et al. (2001) .....                                    | 2.11 |
| 2.3.1.4 Nuevo método simplificado por Calderón et al. (2011) .....                         | 2.13 |
| 2.3.2 Estudios Experimentales .....  | 2.17 |
| 2.3.2.1 Medidas realizadas por Agarwal y Gardner (1974).....                               | 2.17 |
| 2.3.2.2 Medidas realizadas por Lasisi (1979) .....   | 2.17 |
| 2.3.2.3 Medidas realizadas por Moragues et al. (1992) .....                                | 2.18 |
| 2.3.2.4 Medidas realizadas por Ambrose et al. (1994) .....                                 | 2.18 |

|  |      |
|--|------|
| 2.3.2.5 Medidas realizadas por Rosowsky et al. (1997)                          | 2.19 |
| 2.3.2.6 Medidas realizadas por Fang et al. (2001)                              | 2.19 |
| 2.3.2.7 Medidas realizadas por Puente et al. (2007)                            | 2.20 |
| 2.3.2.8 Medidas realizadas por Alvarado et al. (2009)                          | 2.22 |
| 2.4 Estimación del plazo de descimbrado  | 2.22 |
| 2.4.1 Condición de descimbrado   | 2.22 |
| 2.4.1.1 Método propuesto por Calavera (1981) y Fernández (1986)                | 2.23 |
| 2.4.1.2 Método propuesto por Marí (1995)                                       | 2.24 |
| 2.4.1.3 Método por comprobación de coeficientes de carga                       | 2.25 |
| 2.4.2 Estimación del plazo de descimbrado                                      | 2.26 |
| 2.4.2.1 Método mediante el ensayo de probetas de hormigón                      | 2.26 |
| 2.4.2.2 Método de las curvas de referencia                                     | 2.27 |
| 2.4.2.3 Método de la madurez para el descimbrado de forjados de hormigón       | 2.28 |
| 2.4.2.4 Método de Díaz (2008)  | 2.32 |
| 2.4.3 Recomendaciones de la normativa para estimar los plazos de descimbrado   | 2.33 |
| 2.4.3.1 Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)                           | 2.34 |
| 2.4.3.2 Eurocódigo EC-2 (1992)   | 2.35 |
| 2.4.3.3 ACI (American Concrete Institute, Guide to formwork for concrete 2001) | 2.35 |
| 2.4.3.4 Código modelo CEB-FIP 1990 (1995)                                      | 2.36 |
| 2.5 Conclusiones relativas al estado del arte                                  | 2.37 |

### **CAPÍTULO 3. ESTUDIO POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL**

|   |     |
|---|-----|
| 3.1 Introducción                        | 3.1 |
| 3.2 Descripción de la estructura        | 3.1 |
| 3.3 Proceso constructivo                | 3.2 |
| 3.4 Descripción del sistema de cimbrado | 3.5 |

|   |      |
|---|------|
| 3.4.1 Puntales.....   | 3.5  |
| 3.4.2 Elemento de control de carga .....                                | 3.6  |
| 3.4.3 Sopandas principales .....  | 3.7  |
| 3.4.4 Sopandas intermedias .....  | 3.8  |
| 3.4.5 Basculantes.....  | 3.8  |
| 3.4.6 Tableros de encofrado .....                                       | 3.9  |
| 3.4.7 Portasopandas.....  | 3.9  |
| 3.5 Ensayos de laboratorio.....   | 3.9  |
| 3.6 Modelo de elementos finitos.....                                    | 3.9  |
| 3.6.1 Hipótesis del modelo de EF .....                                  | 3.10 |
| 3.6.2 Descripción del modelo de elementos finitos .....                 | 3.11 |
| 3.6.2.1 Tipos de EF y mallado empleado .....                            | 3.12 |
| 3.6.2.2 Desarrollo del modelo.....                                      | 3.13 |
| 3.6.3 Carga considerada para el edificio experimental .....             | 3.19 |
| <b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS</b> |      |
| 4.1 Introducción.....   | 4.1  |
| 4.2 Factores considerados.....  | 4.1  |
| 4.3 Modelos a realizar y resultados registrados .....                   | 4.2  |
| 4.4 Análisis de los modelos de elementos finitos .....                  | 4.3  |
| 4.4.1 Paso de carga 1 (PC1-Hormigonado del forjado 1) .....             | 4.4  |
| 4.4.1.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....                         | 4.5  |
| 4.4.1.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....                         | 4.6  |
| 4.4.1.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....                         | 4.7  |
| 4.4.1.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....                         | 4.8  |
| 4.4.2 Paso de carga 2 (PC2-Clareado del forjado 1).....                 | 4.9  |
| 4.4.2.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....                         | 4.10 |

|   |      |
|---|------|
| 4.4.2.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....             | 4.11 |
| 4.4.2.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....             | 4.12 |
| 4.4.2.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....             | 4.13 |
| 4.4.3 Paso de carga 3 (PC3-Hormigonado del forjado 2) ..... | 4.14 |
| 4.4.3.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....             | 4.15 |
| 4.4.3.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....             | 4.20 |
| 4.4.3.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....             | 4.26 |
| 4.4.3.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....             | 4.32 |
| 4.4.4 Paso de carga 4 (PC4-Clareado del forjado 2) .....    | 4.38 |
| 4.4.4.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....             | 4.40 |
| 4.4.4.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....             | 4.41 |
| 4.4.4.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....             | 4.42 |
| 4.4.4.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....             | 4.43 |
| 4.4.5 Paso de carga 5 (PC5-Descimbrado del forjado 1) ..... | 4.44 |
| 4.4.5.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....             | 4.46 |
| 4.4.5.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....             | 4.47 |
| 4.4.5.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....             | 4.48 |
| 4.4.5.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....             | 4.49 |
| 4.4.6 Paso de carga 6 (PC6-Hormigonado del forjado 3) ..... | 4.50 |
| 4.4.6.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....             | 4.52 |
| 4.4.6.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....             | 4.53 |
| 4.4.6.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....             | 4.54 |
| 4.4.6.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....             | 4.55 |
| 4.4.7 Paso de carga 7 (PC7-Clareado del forjado 3) .....    | 4.56 |
| 4.4.7.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....             | 4.58 |
| 4.4.7.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....             | 4.59 |

|  |      |
|--|------|
| 4.4.7.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....  | 4.60 |
| 4.4.7.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....  | 4.61 |
| 4.4.8 Paso de carga 8 (PC8-Carga en el forjado 3) .....  | 4.62 |
| 4.4.8.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....  | 4.64 |
| 4.4.8.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....  | 4.65 |
| 4.4.8.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....  | 4.66 |
| 4.4.8.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....  | 4.67 |
| 4.4.9 Paso de carga 9 (PC9-Descimbrado del forjado 2) .....  | 4.68 |
| 4.4.9.1 Resultados para un canto de 20 cm. ....  | 4.70 |
| 4.4.9.2 Resultados para un canto de 25 cm. ....  | 4.71 |
| 4.4.9.3 Resultados para un canto de 30 cm. ....  | 4.72 |
| 4.4.9.4 Resultados para un canto de 35 cm. ....  | 4.73 |
| 4.5 Análisis de resultados y conclusiones obtenidas .....  | 4.74 |
| 4.5.1 Conclusiones relativas al estudio por el MEF del edificio experimental .....                                 | 4.74 |
| <b>CAPÍTULO 5. APLICACIÓN AL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE BELLAS ARTES DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA</b> |      |
| 5.1 Introducción .....   | 5.1  |
| 5.2 Descripción de la estructura .....   | 5.1  |
| 5.3 Proceso constructivo .....   | 5.2  |
| 5.4 Descripción del sistema de cimbrado .....  | 5.5  |
| 5.5 Modelo de elementos finitos .....  | 5.5  |
| 5.5.1 Hipótesis del modelo de EF .....   | 5.6  |
| 5.5.2 Descripción del modelo de elementos finitos .....  | 5.7  |
| 5.5.2.1 Tipos de EF y mallado empleado .....   | 5.7  |
| 5.5.2.2 Desarrollo del modelo .....  | 5.9  |
| 5.5.3 Combinaciones de acciones consideradas y niveles de plastificación .....                                     | 5.15 |

|   |      |
|---|------|
| 5.5.3.1 Cargas permanentes.....   | 5.16 |
| 5.5.3.2 Estado Límite de Servicio (ELS).....  | 5.16 |
| 5.5.3.3 Estado Límite Último (ELU) .....  | 5.16 |
| 5.5.3.4 Niveles de plastificación adoptados .....   | 5.17 |
| 5.6 Análisis de resultados.....   | 5.17 |
| 5.6.1 Paso de carga 1 (PC1-Hormigonado del forjado 1) .....   | 5.17 |
| 5.6.2 Paso de carga 2 (PC2-Clareado del forjado 1) .....  | 5.18 |
| 5.6.3 Paso de carga 3 (PC3-Hormigonado del forjado 2) .....   | 5.19 |
| 5.6.4 Paso de carga 4 (PC4-Clareado del forjado 2) .....  | 5.23 |
| 5.6.5 Paso de carga 5 (PC5-Descimbrado del forjado 1) .....   | 5.24 |
| 5.6.6 Paso de carga 6 (PC6-Hormigonado del forjado 3) .....   | 5.25 |
| 5.6.7 Paso de carga 7 (PC7-Clareado del forjado 3).....   | 5.26 |
| 5.6.8 Paso de carga 8 (PC8-Descimbrado del forjado 2) .....   | 5.27 |
| 5.6.9 Paso de carga 9 (PC9-Hormigonado del forjado 4) .....   | 5.28 |
| 5.7 Justificación económica del empleo de elementos de control de carga en puntales para el presente edificio.....                | 5.30 |
| 5.8 Conclusiones relativas a la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales para el presente edificio..... | 5.30 |

## **REFERENCIAS**

## **APÉNDICES**

Apéndice I. Planos

Apéndice II. Registro fotográfico

Apéndice III. Estimación del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados

Apéndice IV. Comprobación Estado Límite de Servicio. Fisuración

Apéndice V. Justificación económica

## INDICE DE FIGURAS

- Fig. 2.1 Sistema de losas (ALSINA 2009)
- Fig. 2.2 Sistema para reticulares (ALSINA 2009)
- Fig. 2.3 Sistema de puntales con arriostramiento lateral (ALSINA 2009)
- Fig. 2.4 Sistema de mesas
- Fig. 2.5 Proceso de cimbrado y descimbrado
- Fig. 2.6 Proceso de cimbrado, recimbrado, descimbrado
- Fig. 2.7 Proceso de cimbrado, clareado y descimbrado
- Fig. 2.8 Mecanismo para realizar el clareado (ALSINA 2009)
- Fig. 2.10 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=2$
- Fig. 2.9 Operaciones de cimbrado y descimbrado  $n=3$
- Fig. 2.11 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=3$
- Fig. 2.12 Coeficientes de carga para puntales y forjados considerando la variación del módulo de elasticidad  $n=3$
- Fig. 2.13 Operaciones de (a) Hormigonado del último forjado y (b) Descimbrado del primer forjado
- Fig. 2.14 Operación de cimbrado y clareado del último forjado y descimbrado del primero. Calderón et al. (2011)
- Fig. 2.15 Discretización de la estructura, EFM. Calderón et al. (2011)
- Fig. 2.16 Evolución de cargas en puntales medida por Fang et al.
- Fig. 2.17 Evolución de carga en puntales medida por Puente et al. (2007)
- Fig. 2.18 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-450 ARI)
- Fig. 2.1 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-350)
- Fig. 2.2 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición escoria)
- Fig. 2.3 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición puzolana)
- Fig. 2.22 Relación de  $\beta$  con respecto a la relación entre  $f_{ck,j}/f_{ck,28}$

- Fig. 2.23 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa. y cemento de endurecimiento rápido  $s = 0.20$ )
- Fig. 2.24 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento normal  $s = 0.25$ )
- Fig. 2.25 Curvas para el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento lento  $s = 0.38$ )
- Fig. 2.26 Curva para estimar el plazo de descimbrado en función de la evolución de la resistencia a tracción Díaz (2008)
- Fig. 3.1 Vista 3D del edificio proyectado
- Fig. 3.2 Proceso constructivo día “0”
- Fig. 3.3 Proceso constructivo día “3”
- Fig. 3.4 Proceso constructivo día “7”
- Fig. 3.5 Proceso constructivo día “13”
- Fig. 3.6 Proceso constructivo día “14”
- Fig. 3.7 Proceso constructivo día “17”
- Fig. 3.8 Proceso constructivo día “20”
- Fig. 3.9 Proceso constructivo día “24”
- Fig. 3.10 Proceso constructivo día “25”
- Fig. 3.11 Puntal empleado en el edificio experimental
- Fig. 3.12 Respuesta elasto-plástica del elemento de control de carga
- Fig. 3.13 Descripción de las sopandas principales
- Fig. 3.14 Distribución de sopandas principales y secundarias en los forjados
- Fig. 3.15 Extracción del basculante de las sopandas principales
- Fig. 3.16 Respuesta elasto-plástica del puntal modelado
- Fig. 3.1 Elemento SHELL63 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 3.2 Elemento LINK1 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 3.19 Elemento BEAM44 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 3.20 Vista tridimensional del modelo de EF
- Fig. 3.21 Hormigonado del forjado 1
- Fig. 3.22 Clareado del forjado 1
- Fig. 3.23 Hormigonado del forjado 2
- Fig. 3.24 Clareado del forjado 2

- Fig. 3.25 Descimbrado del forjado 1
- Fig. 3.26 Hormigonado del forjado 3
- Fig. 3.27 Clareado del forjado 3
- Fig. 3.28 Carga en el forjado 3
- Fig. 3.29 Descimbrado del forjado 2
- Fig. 4.1 Distribución de puntales del forjado 1 y deformada tipo. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
- Fig. 4.2 Distribución de puntales del forjado 1 y deformada tipo. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)
- Fig. 4.3 Distribución de puntales en forjados 1 y 2. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 4.4 Deformada tipo. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 4.5 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 18 KN.
- Fig. 4.6 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 16 KN y con nivel de plastificación de 14 KN.
- Fig. 4.7 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 18 KN.
- Fig. 4.8 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 16 KN y con nivel de plastificación de 14 KN.
- Fig. 4.9 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 18 KN.
- Fig. 4.10 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 16 KN y con nivel de plastificación de 14 KN.
- Fig. 4.11 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.12 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

- Fig. 4.13 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.14 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.15 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.16 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.17 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.18 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.19 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.20 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.21 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.22 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.23 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.24 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.25 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

- Fig. 4.26 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.27 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.28 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.29 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.30 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.31 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.32 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.33 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.34 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.35 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.
- Fig. 4.36 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.
- Fig. 4.37 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.
- Fig. 4.38 Distribución de puntales en forjados 1 y 2. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)
- Fig. 4.39 Deformada tipo. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

- Fig. 4.40 Distribución de puntales del forjado 2 y deformada tipo. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 4.41 Distribución de puntales en forjados 2 y 3. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 4.42 Deformada tipo. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 4.43 Distribución de puntales en forjados 2 y 3. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)
- Fig. 4.44 Deformada tipo. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)
- Fig. 4.45 Distribución de puntales en forjados 2 y 3. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 4.46 Deformada tipo. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)
- Fig. 4.47 Distribución de puntales del forjado 3 y deformada tipo. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.1 Proceso constructivo día “0”
- Fig. 5.2 Proceso constructivo día “3”
- Fig. 5.3 Proceso constructivo día “7”
- Fig. 5.4 Proceso constructivo día “10”
- Fig. 5.5 Proceso constructivo día “11”
- Fig. 5.6 Proceso constructivo día “14”
- Fig. 5.7 Proceso constructivo día “17”
- Fig. 5.8 Proceso constructivo día “18”
- Fig. 5.9 Proceso constructivo día “21”
- Fig. 5.10 Respuesta elasto-plástica del puntal modelado
- Fig. 5.11 Elemento SHELL63 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 5.12 Elemento LINK1 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 5.13 Elemento BEAM44 (ANSYS 11.0 2007)
- Fig. 5.14 Sección transversal convencional y con el ábaco a la izquierda. Dimensiones en cm.
- Fig. 5.15 Sección transversal con el ábaco a la derecha y del interior ábaco. Dimensiones en cm.
- Fig. 5.16 Vista tridimensional del modelo de elementos finitos
- Fig. 5.17 Hormigonado del forjado 1
- Fig. 5.18 Clareado del forjado 1
- Fig. 5.19 Hormigonado del forjado 2
- Fig. 5.20 Clareado del forjado 2
- Fig. 5.21 Descimbrado del forjado 1
- Fig. 5.22 Hormigonado del forjado 3

- Fig. 5.23 Clareado del forjado 3
- Fig. 5.24 Descimbrado del forjado 2
- Fig. 5.25 Hormigonado del forjado 4
- Fig. 5.26 Deformada tipo. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
- Fig. 5.27 Deformada tipo. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)
- Fig. 5.28 Deformada tipo. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Fig. 5.29 Combinación de acciones: CP sin mayorar. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales.
- Fig. 5.30 Combinación de acciones: CP sin mayorar. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 15 KN.
- Fig. 5.31 Combinación de acciones: CP sin mayorar. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 12 KN.
- Fig. 5.32 Combinación de acciones: ELU. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales.
- Fig. 5.33 Combinación de acciones: ELU. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 15 KN.
- Fig. 5.34 Combinación de acciones: ELU. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 12 KN.
- Fig. 5.35 Deformada tipo. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)
- Fig. 5.36 Deformada tipo. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Fig. 5.37 Deformada tipo. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Fig. 5.38 Deformada tipo. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)
- Fig. 5.39 Deformada tipo. Paso de carga 8 (Descimbrado del forjado 2)
- Fig. 5.40 Deformada tipo. Paso de carga 9 (Hormigonado del forjado 4)

## **INDICE DE TABLAS**

- Tabla 2.1 Comparación entre los métodos simplificados de Grundy y Kabaila y de Duan y Chen para el caso de dos forjados cimbrados y uno recimbrado.
- Tabla 2.2 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
- Tabla 2.3 Comparación entre los resultados experimentales y los del nuevo método simplificado. Calderón et al. (2011)
- Tabla 2.4 Comparación entre los resultados del modelo de elementos finitos y los del nuevo método simplificado. Calderón et al. (2011)
- Tabla 2.5 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)
- Tabla 2.6 Comparación entre los resultados de Fang et al., los del experimental y los del método de elementos finitos. Calderón et al. (2011)
- Tabla 2.7 Coeficientes de carga en puntales y forjados medidos por Fang et al. (2001)
- Tabla 2.8 Comparación entre las medidas experimentales de Puente et al. con diferentes métodos de estimación de cargas
- Tabla 2.9 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.)
- Tabla 2.10 Criterios para establecer los plazos de descimbrado propuestos por Marí
- Tabla 2.11 Relación  $f_{ct}/f_{ck}$  para diversos tipos de cementos
- Tabla 2.12 Periodos mínimos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado según la EHE-08.
- Tabla 2.13 Períodos mínimos de descimbrado, recomendados por el Código modelo
- Tabla 3.1 Características geométricas del puntal empleado en el estudio experimental
- Tabla 3.2 Resistencia del puntal dependiendo de la altura de uso según datos del fabricante
- Tabla 3.3 Características geométricas y mecánicas de los puntales considerados en el modelo
- Tabla 3.4 Características geométricas y mecánicas de los tableros de encofrado considerados en el modelo
- Tabla 3.5 Características geométricas y mecánicas de las sopandas consideradas en el modelo
- Tabla 4.1 Modelos a realizar para el análisis paramétrico. Referencias utilizadas.
- Tabla 4.2 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 1.

|            |   |
|------------|---|
| Tabla 4.3  | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 1. |
| Tabla 4.4  | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 1. |
| Tabla 4.5  | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 1. |
| Tabla 4.6  | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 2. |
| Tabla 4.7  | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 2. |
| Tabla 4.8  | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 2. |
| Tabla 4.9  | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 2. |
| Tabla 4.10 | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 3. |
| Tabla 4.11 | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 3. |
| Tabla 4.12 | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 3. |
| Tabla 4.13 | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 3. |
| Tabla 4.14 | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 4. |
| Tabla 4.15 | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 4. |
| Tabla 4.16 | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 4. |
| Tabla 4.17 | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 4. |
| Tabla 4.18 | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 5. |
| Tabla 4.19 | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 5. |
| Tabla 4.20 | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 5. |
| Tabla 4.21 | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 5. |
| Tabla 4.22 | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 6. |
| Tabla 4.23 | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 6. |
| Tabla 4.24 | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 6. |
| Tabla 4.25 | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 6. |
| Tabla 4.26 | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 7. |
| Tabla 4.27 | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 7. |
| Tabla 4.28 | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 7. |
| Tabla 4.29 | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 7. |
| Tabla 4.30 | Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 8. |
| Tabla 4.31 | Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 8. |
| Tabla 4.32 | Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 8. |
| Tabla 4.33 | Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 8. |

- Tabla 4.34 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 9.
- Tabla 4.35 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 9.
- Tabla 4.36 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 9.
- Tabla 4.37 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 9.
- Tabla 5.1 Características geométricas y mecánicas de los puntales considerados en el modelo
- Tabla 5.2 Características geométricas y mecánicas de los tableros de encofrado considerados en el modelo
- Tabla 5.3 Resultados para el paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)
- Tabla 5.4 Resultados para el paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)
- Tabla 5.5 Resultados para el paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)
- Tabla 5.6 Resultados para el paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)
- Tabla 5.7 Resultados para el paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)
- Tabla 5.8 Resultados para el paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)
- Tabla 5.9 Resultados para el paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)
- Tabla 5.10 Resultados para el paso de carga 8 (Descimbrado del forjado 2)
- Tabla 5.11 Resultados para el paso de carga 9 (Hormigonado del forjado 4)

# **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), 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) y Alvarado et al. (2009) han estudiado el efecto que tiene el clareado en la transmisión de cargas durante la construcción de forjados.

Por otro lado, en todos los estudios experimentales relacionados con el tema planteado, se observa que la toma de medidas en una obra real es compleja y sometida a incertidumbres, pues requiere adaptar toda la organización y control que requiere un estudio experimental al ritmo de la obra. Un estudio experimental a escala real, realizado sobre un edificio construido expresamente como “probeta” de ensayo, es el modo ideal de trabajar. Así, el ritmo de la obra es el que se adapta a las exigencias del estudio y no a la inversa. Esta metodología permite aumentar el número y la calidad de variables controladas y estudiar por separado los efectos de cada una de ellas.

Además, otro aspecto que caracteriza a la etapa de construcción de edificios en la fase de diseño del sistema de apuntalamiento, es el poco aprovechamiento que se realiza de la resistencia de los puntales de una planta. Tradicionalmente, el criterio de diseño del sistema de apuntalamiento es el de instalar puntales capaces de resistir la máxima carga a la que van a ser sometidos. Esta máxima carga solo aparecerá en uno de ellos, quedando el resto con capacidad resistente superior a la que es necesaria e incluso de forma claramente sobredimensionada.

Tal y como se evidencia en los párrafos anteriores, algunos de los aspectos más importantes de la fase de construcción son la economía, la seguridad y la eficiencia estructural. Con este objeto se planteó la investigación “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.”, de forma que debido al empleo de elementos de control de carga en puntales se mejore la seguridad, la economía y la eficiencia estructural. Esta investigación se desarrolla en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia. El presente Proyecto Final de Carrera representa el inicio del desarrollo del proyecto de investigación planteado, buscando hacer un primer acercamiento al efecto que produce el elemento de control de carga en puntales en la redistribución y transmisión de cargas entre forjados y puntales en la construcción de edificios de plantas sucesivas utilizando la técnica del clareado.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo principal de este Proyecto Final de Carrera es el conocimiento del comportamiento estructural debido a la redistribución de cargas máximas en puntales por el empleo de elementos de control de carga en puntales.

Aparece la necesidad de conocer dicho comportamiento estructural de este tipo de proceso constructivo para conseguir los siguientes objetivos:

- ✓ Optimizar los costes de ejecución de los forjados.
- ✓ Aumentar la seguridad en la construcción de forjados debido a la redistribución de cargas máximas en puntales.
- ✓ Obtener mayor eficiencia estructural.

Además, también forma parte de los objetivos, aplicar los conocimientos adquiridos para la mejora de la fase constructiva del edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.

## **1.3 Contenido**

El presente Proyecto Final de Carrera está estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- Capítulo 2. Antecedentes y estado del arte.
- Capítulo 3. Estudio por el método de elementos finitos de un edificio experimental.
- Capítulo 4. Análisis paramétrico del modelo de elementos finitos.
- Capítulo 5. Aplicación al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Referencias
- Apéndices.

En el Capítulo 1 se justifica la realización del presente Proyecto Final de Carrera, exponiendo de una forma general la necesidad de estudiar el efecto que el elemento de control de carga en puntales produce en la transmisión de cargas entre forjados y puntales, dentro de un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado para conseguir los objetivos marcados.

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 experimental y numérico relativas a la transmisión de cargas entre forjados y puntales durante el proceso constructivo de edificios de forjados sucesivos. Finalmente se detallan los criterios para determinar los plazos de descimbrado, recopilados en distintas normas y propuestas de estimación de diversos autores.

En el Capítulo 3 se desarrolla un modelo de elementos finitos representando el proceso constructivo de un edificio experimental. Este modelo fue calibrado a partir de las medidas obtenidas en la fase experimental.

En el Capítulo 4 se expone un análisis paramétrico del modelo de elementos finitos desarrollado para el edificio experimental y se obtienen diversas conclusiones. También se recogen una serie de conclusiones acerca de los resultados y conclusiones obtenidas hasta el momento.

En el Capítulo 5 se aplica la técnica constructiva desarrollada anteriormente al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia con el fin de mejorar su proceso constructivo en cuanto a seguridad, economía y eficiencia estructural, que son parte de los objetivos marcados en este Proyecto.

Finalmente se recogen varios Apéndices que contienen información que complementa la investigación desarrollada. Estos apéndices profundizan en temas tratados en el Proyecto Final de Carrera 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. 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.

Sin embargo este acercamiento teórico contrasta con una escasa validación experimental, siendo las medidas en obra el sistema habitual de validación o comprobación de resultados con las distintas distorsiones debidas a factores no contemplados que suelen aparecer.

En este capítulo se pretende establecer los antecedentes y el estado actual de conocimiento que motivan el desarrollo del presente Proyecto Fin de Carrera. 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 citarán mediciones reales durante el cimbrado de edificios. Y, finalmente, se realizará una descripción de las metodologías adoptadas por diversos autores de la estimación de tiempos de descimbrado a partir de la evolución de las propiedades del hormigón en el tiempo.

### **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 aun 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).

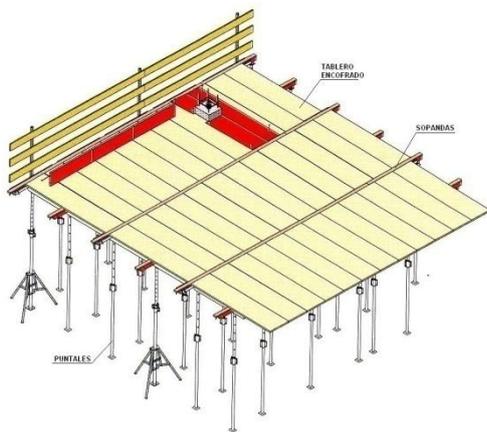


Fig. 2.1 Sistema de losas (ALSINA 2009)

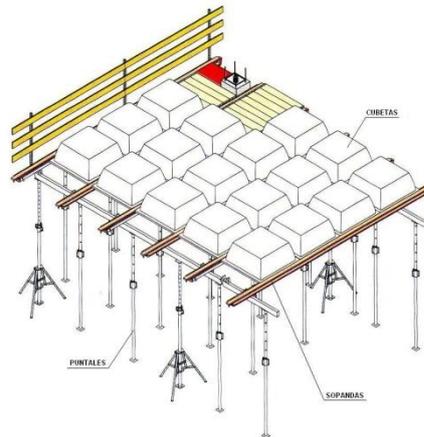


Fig. 2.2 Sistema para reticulares (ALSINA 2009)

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

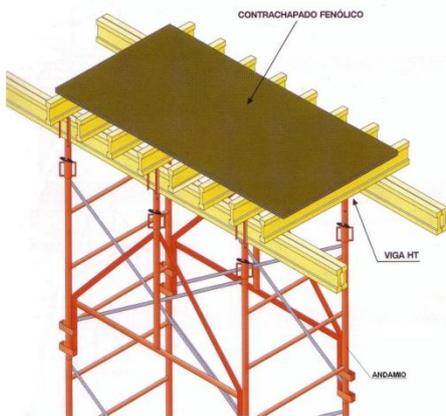


Fig. 2.3 Sistema de puntales con arriostramiento lateral (ALSINA 2009)

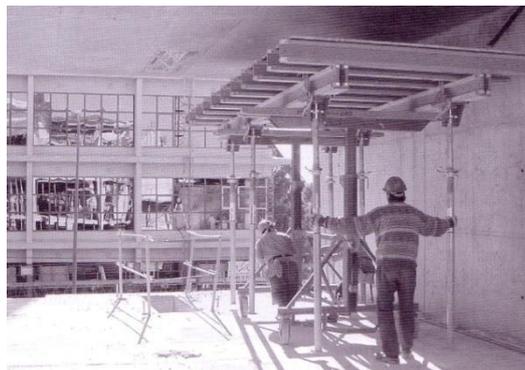


Fig. 2.4 Sistema de mesas

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

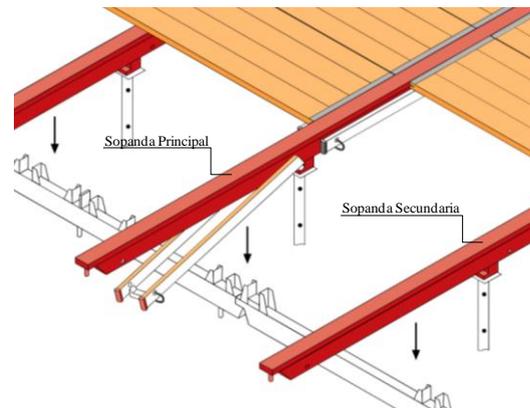


Fig. 2.8 Mecanismo para realizar el clareado (ALSINA 2009)

## 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.

### 2.3.1 Modelos Teóricos

En el presente apartado se describirán algunos de los principales métodos teóricos para el cálculo de la distribución de cargas en forjados y puntales durante la construcción de forjados sucesivos en altura de hormigón in situ. Entre estos modelos encontramos modelos simplificados y modelos más complejos, basados en el método de elementos finitos en dos y tres dimensiones.

Por orden temporal, se pueden citar los siguientes métodos o modelos teóricos:

- ✓ Método simplificado de Grundy y Kabaila (1963)

- ✓ Método simplificado para recimbrado de Taylor (1967)
- ✓ Modelo de Liu et al. (1985, 1986)
- ✓ Modelo EFM de Stivaros y Halvorsen (1990)
- ✓ Modelo de Mosallam y Chen (1991)
- ✓ Método simplificado Modificado de Mosallam y Chen (1991)
- ✓ Modelo de Moragues et al. (1992, 1994, 1996)
- ✓ Método simplificado de Duan y Chen (1995)
- ✓ Método simplificado de Fang et al. (2001)
- ✓ Estudios realizados por Díaz (2008)
- ✓ Estudios y modelos realizados por Alvarado et al. (2009)
- ✓ Nuevo método simplificado por Calderón et al. (2011)

En la actualidad, los métodos simplificados que más se emplean son el de Grundy y Kabaila (1963), a pesar de no considerar la rigidez real del sistema de apuntalamiento, y los métodos de Duan y Chen (1995), Fang et al. (2001) y Calderón et al. (2011). Estos tres últimos métodos simplificados son los que mejor se ajustan para predecir la transmisión de cargas entre forjados y puntales y en concreto, para un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado en donde la consideración de la rigidez del sistema de apuntalamiento es fundamental para tener en cuenta la pérdida de rigidez que aparece en la fase de clareado.

A continuación se pasa a detallar en qué consisten los cuatro métodos simplificados más importantes y que más se emplean.

### 2.3.1.1 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<sup>2</sup>) se reparte entre los  $n$  forjados inferiores, correspondiendo a cada uno de ellos una fracción de carga de:

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

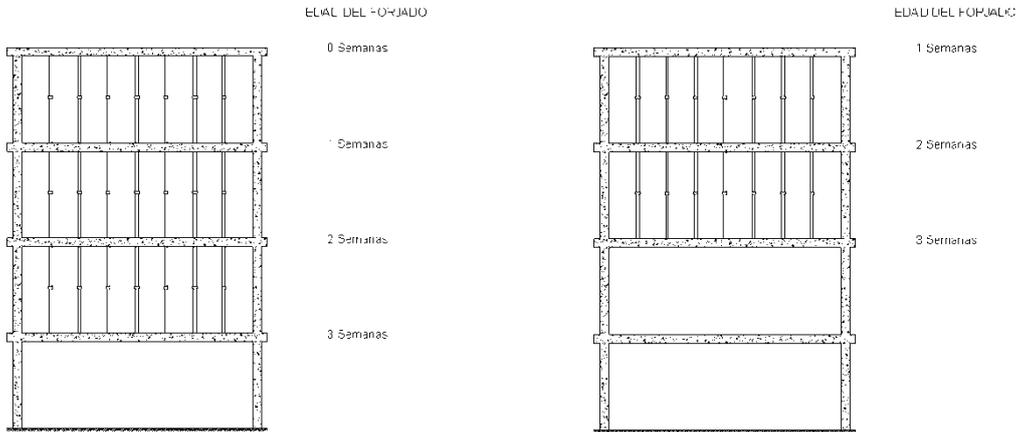


Fig. 2.9 Operaciones de cimbrado y descimbrado  $n=3$

En la segunda etapa, al descimbrar la planta inferior, la diferencia entre la carga total  $q_1$  (kN/m<sup>2</sup>), que recibía, y su peso propio (incluido en éste, el peso del sistema de encofrado y la posible sobrecarga de construcción)  $q$  (kN/m<sup>2</sup>), se reparte entre los  $n$  forjados superiores correspondiendo a cada uno de ellos:

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

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.

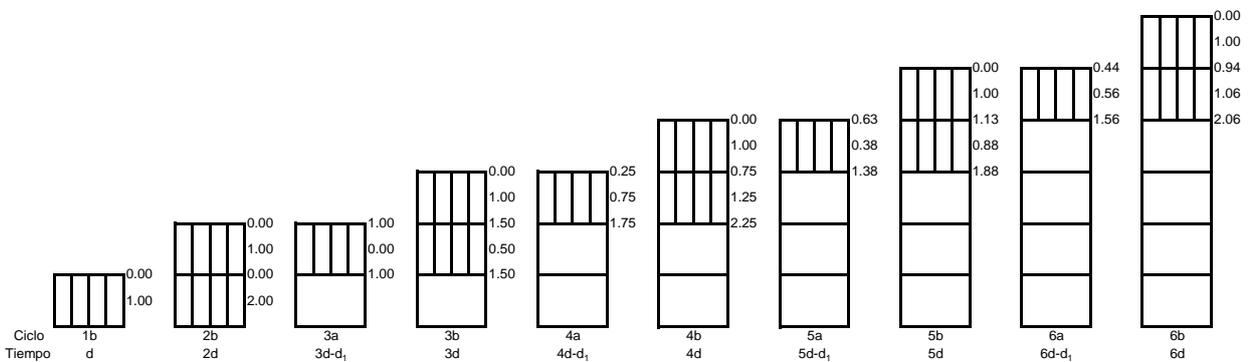


Fig. 2.10 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=2$

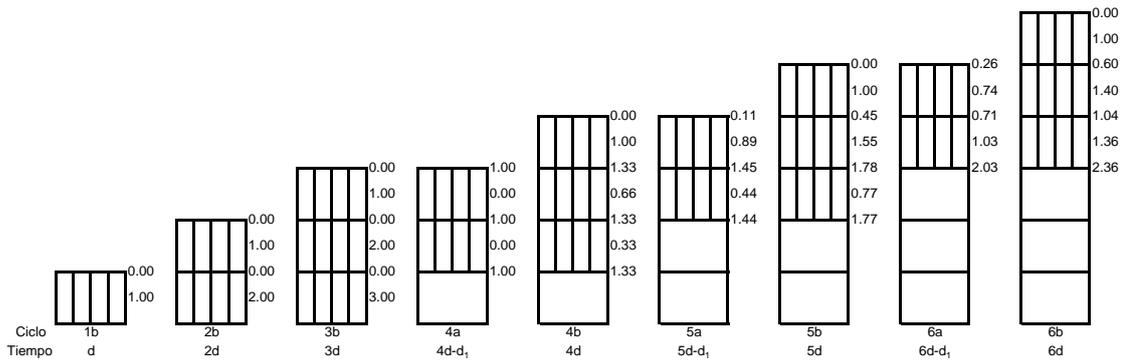


Fig. 2.11 Coeficientes de carga para puntales y forjados  $n=3$

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.

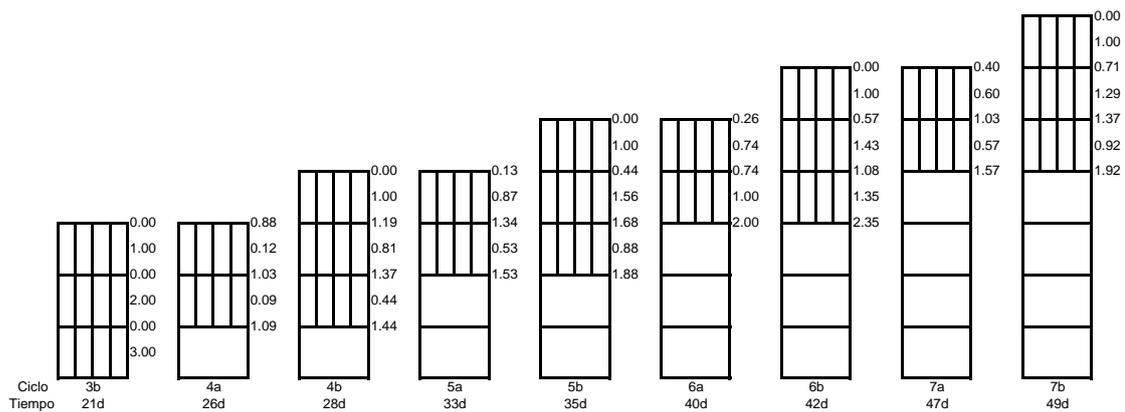


Fig. 2.12 Coeficientes de carga para puntales y forjados considerando la variación del módulo de elasticidad  $n=3$

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.

### 2.3.1.2 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. La principal hipótesis de partida se basa en considerar que los puntales tienen una rigidez finita.

La Figura 2.13 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:

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

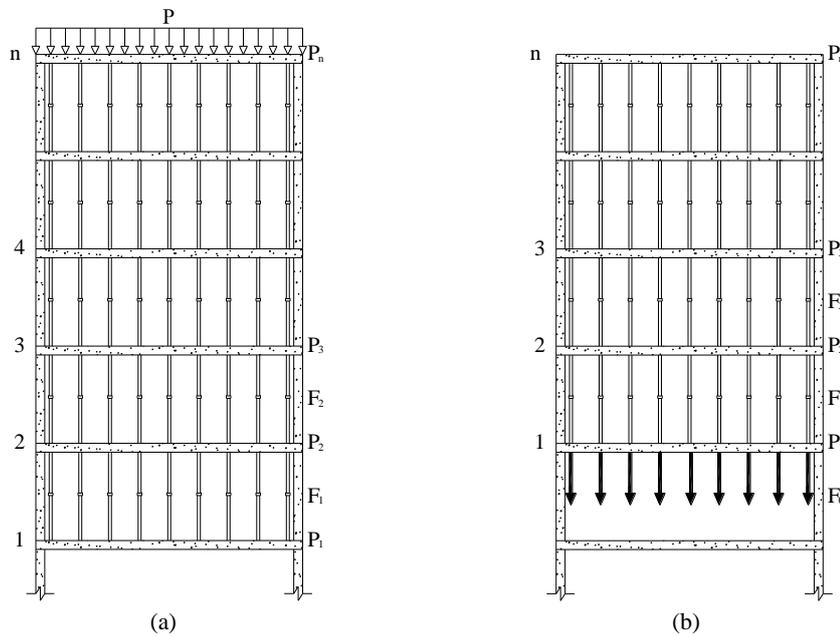


Fig. 2.13 Operaciones de (a) Hormigonado del último forjado y (b) Descimbrado del primer forjado

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:

$$\Delta_j = \Delta_{j-1} + \Delta_{sh,j-1}
 \tag{2.4}$$

donde  $\Delta_j$  y  $\Delta_{j-1}$  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:

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

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  $\gamma$  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:

$$\alpha_{2\ 1} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{K_1}{K_2} + \frac{K_{sh}}{K_2}$$

$$\alpha_{3\ 2} = \frac{P_3}{P_2} = \frac{K_2}{K_3} + \frac{K_{sh}}{K_3} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{2\ 1}}\right)$$

$$\alpha_{4\ 3} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{K_3}{K_4} + \frac{K_{sh}}{K_4} \left(1 + \frac{1}{\alpha_{3\ 2}} + \frac{1}{\alpha_{2\ 1} \cdot \alpha_{3\ 2}}\right) \quad (2.8)$$

.....

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

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:

$$P_1 = \frac{P}{1 + \alpha_{2\ 1} + \alpha_{2\ 1} \cdot \alpha_{3\ 2} + \alpha_{2\ 1} \cdot \alpha_{3\ 2} \cdot \alpha_{4\ 3} + \dots + \alpha_{2\ 1} \cdot \alpha_{3\ 2} \cdot \alpha_{n-1\ n-2}} \quad (2.10)$$

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

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 2.13 (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:

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

$$\sum_{j=1}^n P_j = F_0
 \tag{2.13}$$

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 2.1 se muestran los resultados del método desarrollado por Duan y Chen comparándolos con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963).

Tabla 2.1 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     | 1.00                                    | 0.00    | 1.00                               | 0.00    |
| 2    | 1     | 2.00                                    | 0.00    | 1.65                               | 0.35    |
|      | 2     | 0.00                                    | 1.00    | 0.39                               | 0.61    |
| 3,4  | 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    |
| 6    | 3     | 0.67                                    | 0.33    | 0.95                               | 0.05    |
|      | 2     | 0.33                                    | 1.34    | 0.78                               | 1.16    |
| 7,8  | 1     | 0.00                                    | 1.33    | 0.00                               | 1.78    |
|      | 3     | 0.50                                    | 0.50    | 0.66                               | 0.34    |
| 9    | 2     | 0.00                                    | 1.50    | 0.00                               | 1.65    |
|      | 1     | 0.00                                    | 1.00    | 0.00                               | 1.00    |
| 10   | 4     | 1.00                                    | 0.00    | 1.00                               | 0.00    |
|      | 3     | 1.17                                    | 0.83    | 1.14                               | 0.86    |
| 10   | 2     | 0.34                                    | 1.83    | 0.19                               | 1.94    |
|      | 1     | 0.00                                    | 1.34    | 0.00                               | 1.19    |
| 10   | 4     | 0.89                                    | 0.11    | 0.97                               | 0.03    |
|      | 3     | 0.95                                    | 0.94    | 1.06                               | 0.91    |
| 10   | 2     | 0.00                                    | 1.95    | 0.00                               | 2.05    |
|      | 1     | 0.00                                    | 1.00    | 0.00                               | 1.00    |

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.

### 2.3.1.3 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.

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,  $\lambda_i$  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,  $\rho_i$  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  $\Delta_i$ , 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:

$$\begin{aligned} q_3 &= q_2 \left( \frac{K_{slab,3}}{K_{slab,2}} + \frac{K_{slab,3}}{K_{shore,2}} \right) + q_1 \cdot \frac{K_{slab,3}}{K_{shore,2}} = m_{2,1} \cdot q_1 (v_{3,2} + u_{3,2}) + u_{3,2} \cdot q_1 \\ &= m_{3,1} \cdot q_1 \end{aligned} \quad (2.25)$$

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

$$q_i = m_{i,1} \cdot q_1 \tag{2.26}$$

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

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

Si se considera el peso propio del forjado superior como unitario (q = 1), se pueden establecer los coeficientes de carga. La Tabla 2.2 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.

Tabla 2.2 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                     |
|      | 1     | 1.33                          | 1.27            | 1.43                         | 1.78                     | 1.66                     |
| 7,8  | 3     | 0.50                          | 0.59            | 0.50                         | 0.34                     | 0.44                     |
|      | 2     | 1.50                          | 1.47            | 1.50                         | 1.65                     | 1.56                     |
|      | 1     | 1.00                          | 1.00            | 1.00                         | 1.00                     | 1.00                     |
| 9    | 4     | 0.00                          | 0.00            | 0.00                         | 0.00                     | 0.00                     |
|      | 3     | 0.83                          | 1.10            | 0.80                         | 0.86                     | 0.93                     |
|      | 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                     |
|      | 2     | 1.95                          | 1.63            | 1.86                         | 2.05                     | 1.86                     |
|      | 1     | 1.00                          | 1.00            | 1.00                         | 1.00                     | 1.00                     |

### 2.3.1.4 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 2.14 muestra la simulación estructural del proceso CCD.

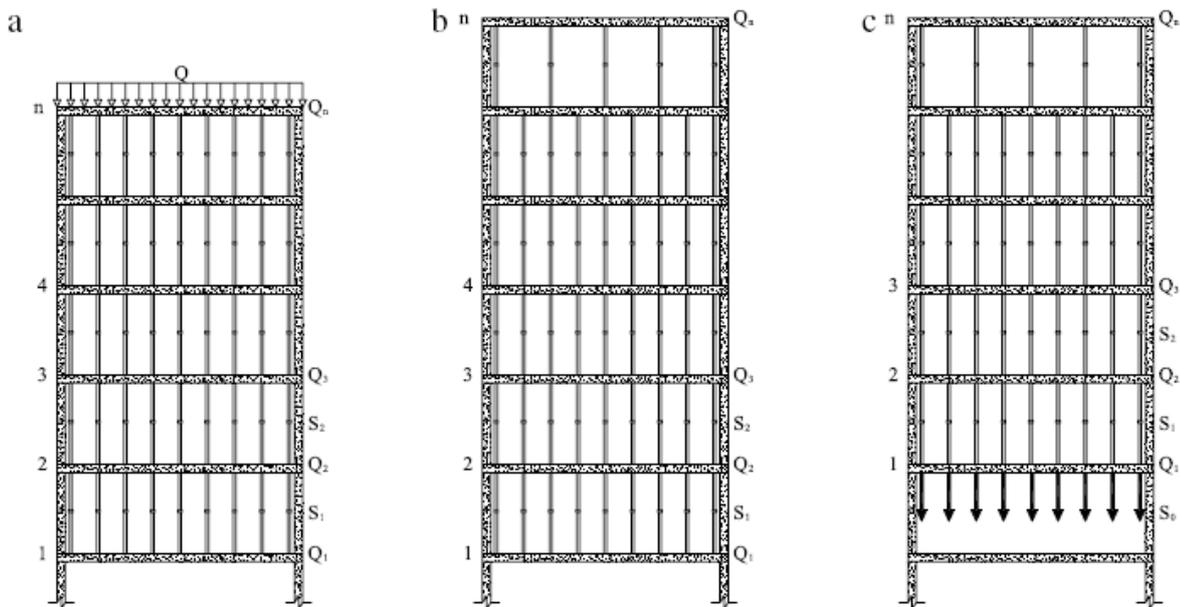


Fig. 2.14 Operación de cimbrado y clareado del último forjado y descimbrado del primero. Calderón et al. (2011)

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 2.15.

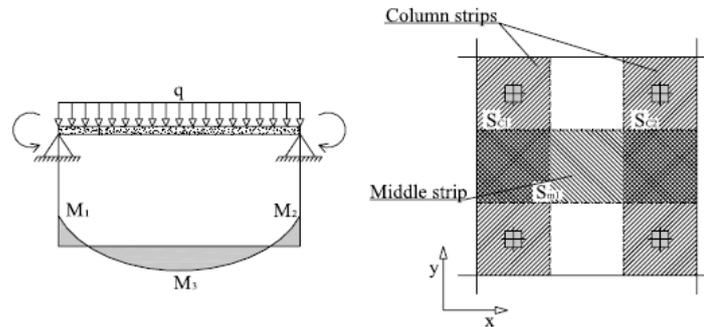


Fig. 2.15 Discretización de la estructura, EFM. Calderón et al. (2011)

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 isostática 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 y en el Apéndice III de este Proyecto Final de Carrera), 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 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6.

Tabla 2.3 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 <sup>2</sup> ) | $\overline{S_{nsp}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\frac{\overline{S_{exp}}}{\overline{S_{nsp}}}$ |
|------|-----------------------|-------|---|---|---|
| 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  |
|      |                       | 1     | 4.48                                      | 8.36                                      | 0.54  |
| 4    | Clearing level 2      | 2     | 2.91                                      | 3.48                                      | 0.84  |
|      |                       | 1     | 3.86                                      | 6.47                                      | 0.60  |
| 5    | Striking level 1      | 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                  | -     | -   | -   | <b>0.94</b>                                     |
| -    | Standard deviation    | -     | -   | -   | <b>0.25</b>                                     |

Tabla 2.4 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 <sup>2</sup> ) | $\overline{S_{nsp}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\frac{\overline{S_{FEM}}}{\overline{S_{nsp}}}$ |
|------|-----------------------|-------|---|---|---|
| 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  |
|      |                       | 1     | 6.60                                      | 8.36                                      | 0.79  |
| 4    | Clearing level 2      | 2     | 2.90                                      | 3.48                                      | 0.83  |
|      |                       | 1     | 5.33                                      | 6.47                                      | 0.82  |
| 5    | Striking level 1      | 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                  | -     | -   | -   | <b>0.96</b>                                     |
| -    | Standard deviation    | -     | -   | -   | <b>0.14</b>                                     |

Tabla 2.5 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 | $S_{ism}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\overline{S_{exp}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\frac{\overline{S_{exp}}}{S_{ism}}$ | $\overline{S_{FEM}}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\frac{\overline{S_{FEM}}}{S_{ism}}$ |
|------|-----------------------|-------|--------------------------------|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| 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                                 |
|      |                       | 1     | 8.91                           | 4.48                                      | 0.50                                 | 6.60                                      | 0.74                                 |
| 4    | Clearing level 2      | 2     | 4.40                           | 2.91                                      | 0.66                                 | 2.90                                      | 0.66                                 |
|      |                       | 1     | 7.90                           | 3.86                                      | 0.49                                 | 5.33                                      | 0.68                                 |
| 5    | Striking level 1      | 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                                 |
|      |                       | 2     | 3.33                           | 3.07                                      | 0.92                                 | 3.04                                      | 0.91                                 |
| 7    | Clearing level 3      | 3     | 3.27                           | 3.12                                      | 0.95                                 | 2.77                                      | 0.85                                 |
|      |                       | 2     | 2.26                           | 2.78                                      | 1.23                                 | 2.19                                      | 0.97                                 |
| 8    | Load in level 3       | 3     | 6.49                           | 4.33                                      | 0.67                                 | 5.37                                      | 0.83                                 |
|      |                       | 2     | 3.67                           | 3.38                                      | 0.92                                 | 3.36                                      | 0.92                                 |
| 9    | Striking level 2      | 3     | 4.79                           | 3.67                                      | 0.77                                 | 4.23                                      | 0.88                                 |
| -    | Mean                  | -     | -                              | -   | <b>0.91</b>                          | -   | <b>0.93</b>                          |
| -    | Standard deviation    | -     | -                              | -   | <b>0.36</b>                          | -   | <b>0.26</b>                          |

Tabla 2.6 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 <sup>2</sup> ) | $\overline{S}_{exp}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\frac{S_{exp}}{S_{Fang}}$ | $\overline{S}_{FEM}$ (KN/m <sup>2</sup> ) | $\frac{\overline{S}_{FEM}}{S_{Fang}}$ |
|------|-----------------------|-------|---------------------------------|---|----------------------------|---|---------------------------------------|
| 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                                  |
|      |                       | 1     | 8.97                            | 4.48                                      | 0.50                       | 6.60                                      | 0.74                                  |
| 4    | Clearing level 2      | 2     | 3.84                            | 2.91                                      | 0.76                       | 2.90                                      | 0.76                                  |
|      |                       | 1     | 7.50                            | 3.86                                      | 0.51                       | 5.33                                      | 0.71                                  |
| 5    | Striking level 1      | 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                                  |
|      |                       | 2     | 3.21                            | 3.07                                      | 0.95                       | 3.04                                      | 0.95                                  |
| 7    | Clearing level 3      | 3     | 3.27                            | 3.12                                      | 0.95                       | 2.77                                      | 0.85                                  |
|      |                       | 2     | 2.14                            | 2.78                                      | 1.30                       | 2.19                                      | 1.02                                  |
| 8    | Load in level 3       | 3     | 6.43                            | 4.33                                      | 0.67                       | 5.37                                      | 0.84                                  |
|      |                       | 2     | 3.55                            | 3.38                                      | 0.95                       | 3.36                                      | 0.95                                  |
| 9    | Striking level 2      | 3     | 4.96                            | 3.67                                      | 0.74                       | 4.23                                      | 0.85                                  |
| -    | Mean                  | -     | -                               | -   | <b>0.95</b>                | -   | <b>0.96</b>                           |
| -    | Standard deviation    | -     | -                               | -   | <b>0.43</b>                | -   | <b>0.32</b>                           |

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.

### 2.3.2 Estudios Experimentales

En el presente apartado se explican algunos de los estudios experimentales que plantean la interacción forjado cimbra durante la construcción de forjados sucesivos en altura. Estos estudios han buscado la validación de algunos de los modelos expuestos en el apartado anterior. Sin embargo, cabe resaltar que, en general, la validación experimental es muy escasa, reduciéndose en casi todos los casos a medidas realizadas en obra reales con sus correspondientes alteraciones debidas a factores que no pueden ser controlados ni conocidos.

#### 2.3.2.1 Medidas realizadas por Agarwal y Gardner (1974)

Agarwal y Gardner (1974), instrumentaron dos edificios en Canadá. Uno de ellos era para apartamentos, mientras que el otro era una torre para oficinas.

El desarrollo de estas mediciones permitió establecer que el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) puede considerarse adecuado, ya que comparando las cargas obtenidas experimentalmente con las cargas obtenidas con dicho método, las desviaciones eran del 5 y 10 %. Sin embargo, los autores coinciden en la necesidad de realizar más investigaciones, a fin de poder tener en consideración las diferentes variables que aparecen durante el proceso constructivo no contempladas en dicho método.

#### 2.3.2.2 Medidas realizadas por Lasisi (1979)

Posteriormente, Lasisi (1979) instrumentó las plantas séptima a undécima del edificio N° 5 del gobierno de Canadá en Ottawa. De estas mediciones, Lasisi (1979) propuso una pequeña modificación

al método simplificado de Grundy y Kabaila (1963) que consiste en considerar las sobrecargas de construcción durante las fases de hormigonado.

### 2.3.2.3 Medidas realizadas por Moragues et al. (1992)

Después de hacer un análisis de las investigaciones acerca de la transmisión de cargas entre forjados durante el proceso constructivo, Moragues et al. (1992) estiman necesario realizar mediciones de las cargas que se producen en la construcción de un edificio, considerando los medios habituales usados en España.

De este modo, se instrumentaron dos edificios ubicados en las ciudades de Benidorm y Alicante. Según la medición de carga en puntales, se determinó que la carga máxima en puntales se produce cuando están todos los juegos de cimbras hasta la cimentación. Este valor difiere del teórico esperado al aplicar el método de Grundy y Kabaila (1963) puesto que, de cargar hasta tres veces el peso propio del forjado, se pasó a medir un coeficiente de 1.69. En cuanto a las cargas sobre forjados, se obtuvo que el caso más desfavorable se presenta en el forjado que fue cimbrado hasta la cimentación, cuando sobre él existen tantos forjados como juegos de cimbras utilizados. La diferencia con el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), es que el coeficiente de carga que se obtuvo fue de 1.84 veces el peso propio, bastante alejado del valor 2.36 propuesto por Grundy y Kabaila.

A partir de las mediciones realizadas por Moragues et al. (1992) se pueden extraer los siguientes resultados:

- ✓ Al hormigonar una planta determinada, los puntales de la planta inferior a la de los que soportan aquélla, incrementan su medición entre un 25 y un 33% de la carga añadida.
- ✓ Al hormigonar una determinada planta, los puntales de la planta situada dos más abajo que aquélla, incrementan su carga en un 7%, respecto a la carga añadida.
- ✓ Los valores asumidos por los forjados serían, en forma de coeficientes de carga añadida, un 7% el inferior, entre un 18 y un 25% el intermedio y entre el 75 y el 67% el superior.

### 2.3.2.4 Medidas realizadas por Ambrose et al. (1994)

Durante la construcción de un edificio en Burlington (Vermont), Ambrose et al. (1994) instrumentaron puntales bajo un forjado recién hormigonado. El objetivo de la experimentación consistía en medir la evolución de las cargas en los puntales en el tiempo durante las primeras 72 horas posteriores al hormigonado del forjado.

Una vez transcurridas las 72 horas, las cargas en los puntales descendieron hasta llegar a un 75% de su carga inicial, debido al aumento de rigidez de la losa de hormigón. De esta forma Ambrose et al. (1994), concluyeron que durante el proceso de curado del hormigón se presenta una redistribución del peso propio del forjado, considerando que el forjado va asumiendo un mayor porcentaje de carga hasta que termina el proceso de curado.

### 2.3.2.5 Medidas realizadas por Rosowsky et al. (1997)

Rosowsky et al. (1997) desarrollaron un completo estudio acerca de la evolución de cargas en puntales durante un proceso de cimbrado y descimbrado.

Rosowsky et al. (1997) estudiaron la evolución de cargas en puntales durante los tres o cuatro primeros días después del hormigonado del forjado, controlando que las sobrecargas de ejecución aplicadas sobre el forjado fueran relativamente bajas. Las variaciones registradas durante este periodo de tiempo fueron diferentes según la zona instrumentada, presentándose mayores variaciones en la zona con una mayor área. En ambas zonas las variaciones de carga en los puntales fueron de carácter cíclico (diario) aunque con una tendencia decreciente con el tiempo, lo que llevó a concluir por parte de los autores que estas variaciones se debían a cambios medioambientales en la obra asociados también con efectos de fluencia y ganancia de rigidez del hormigón.

### 2.3.2.6 Medidas realizadas por Fang et al. (2001)

Fang et al. (2001) realizaron uno de los programas experimentales más extensos durante la construcción de un edificio de hormigón armado de plantas sucesivas en Beijing (China). La Tabla 2.7 muestra las cargas obtenidas en cada fase constructiva considerando como la unidad el peso propio del forjado.

Tabla 2.7 Coeficientes de carga en puntales y forjados medidos por Fang et al. (2001)

| Paso | Operación                                 | Nivel | Medidas en forjados |          |
|------|---|-------|---------------------|----------|
|      |   |       | Forjado             | Puntales |
| 1    | Hormigonado<br>Forjado 2                  | 2     | 0.248               | 0.752    |
|      |   | 1     | -                   | -        |
|      |   | 0     | -                   | -        |
| 2    | 1 día después<br>hormigonado<br>forjado 2 | 2     | 0.420               | 0.580    |
|      |   | 1     | -                   | -        |
|      |   | 0     | -                   | -        |
| 3    | Descimbrado<br>forjado 1                  | 2     | 0.540               | 0.460    |
|      |   | 1     | 1.460               | -        |
|      |   | 0     | -                   | -        |
| 4    | Hormigonado<br>forjado 3                  | 3     | 0.217               | 0.783    |
|      |   | 2     | 1.006               | 0.777    |
|      |   | 1     | 1.777               | -        |
| 5    | 1 día después<br>hormigonado<br>forjado 3 | 3     | 0.303               | 0.697    |
|      |   | 2     | 0.949               | 0.748    |
|      |   | 1     | 1.748               | -        |
| 6    | Descimbrado<br>forjado 2                  | 3     | 0.544               | 0.456    |
|      |   | 2     | 1.456               | -        |
|      |   | 1     | -                   | -        |
| 7    | Hormigonado<br>forjado 4                  | 4     | 0.186               | 0.895    |
|      |   | 3     | 1.045               | 0.769    |
|      |   | 2     | 1.769               | -        |
| 8    | 1 día después<br>hormigonado<br>forjado 4 | 4     | 0.342               | 0.658    |
|      |   | 3     | 0.897               | 0.761    |
|      |   | 2     | 1.761               | -        |
| 9    | Descimbrado<br>forjado 3                  | 4     | 0.419               | 0.581    |
|      |   | 3     | 1.581               | -        |
|      |   | 2     | -                   | -        |

Fang et al. (2001) compararon los resultados experimentales con las cargas estimadas usando el método simplificado de Grundy y Kabaila (1963), encontrando diferencias de hasta un 27.2% en la estimación de la cargas en los forjados. También compararon sus resultados con su modelo numérico (descrito en el apartado 2.3.1.3), encontrando que las estimaciones realizadas con este método diferían sólo un 5.3%, considerándolo como aceptable para estimar la distribución de cargas tanto en puntales como en los forjados.

Adicionalmente, durante la construcción del tercer forjado, Fang et al. (2001) monitorizaron de forma continua las cargas en los puntales después de la fase de hormigonado y durante los siguientes dos días. Encontraron una tendencia decreciente en general de las cargas en los puntales. Así, se evidencia que durante el proceso de curado, el forjado empieza a soportar parte de su peso propio. También encontraron que se presentaban variaciones cíclicas diarias en las cargas de los puntales (véase Fig. 2.16), por lo que concluyen que la evolución de cargas en los puntales se encuentra afectada por factores como las variaciones de temperaturas, la fluencia o el aumento de rigidez de los forjados.

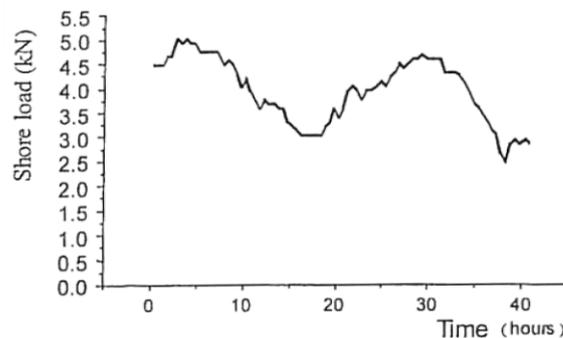


Fig. 2.16 Evolución de cargas en puntales medida por Fang et al.

### 2.3.2.7 Medidas realizadas por Puente et al. (2007)

Durante la construcción de dos edificios ubicados en Getaria y Azkoitia (España), Puente et al. (2007) tomaron medidas de las cargas en puntales, con el objetivo de ver cómo se reparten los pesos propios entre forjados sucesivos conectados por puntales durante el proceso constructivo.

La Tabla 2.8 muestra una comparación entre los resultados obtenidos con diferentes métodos de estimación de cargas con los registrados experimentalmente en la obra de Getaria (considerando como unidad el peso propio del forjado).

En la Tabla 2.8 *Simp. E<sub>cte</sub>* se refiere al método simplificado de Grundy y Kabaila considerando el módulo de elasticidad constante, *Simp. E<sub>var</sub>* al método simplificado de Grundy y Kabaila considerando el módulo de elasticidad variable, *Refin. 2D* y *Refin. 3D* al método de Liu et al. en dos y tres dimensiones, *Moss-Chen 2D* y *3D* al método de Mosallam y Chen en dos y tres dimensiones, *Simp. Modif.* al método simplificado modificado de Mosallam y Chen, *Simp. Mej.* al método

simplificado mejorado de Duan y Chen y Medida Exper. a las medidas experimentales realizadas por Puente et al. (2007).

Tabla 2.8 Comparación entre las medidas experimentales de Puente et al. con diferentes métodos de estimación de cargas

| Operación          | Nivel | Simp.<br>E <sub>cte</sub> | Simp.<br>E <sub>var</sub> | Refin.<br>2D | Refin.<br>3D | Moss-<br>Chen<br>2D | Moss-<br>Chen<br>3D | Simp.<br>Modif. | Simp.<br>Mej. | Medida<br>Exper. |
|--------------------|-------|---------------------------|---------------------------|--------------|--------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------|------------------|
| Hormigón sótano -4 | -4    | 1.00                      | 1.00                      | 1.00         | 1.00         | 1.00                | 1.00                | 1.00            | 1.00          | 0.99             |
| Hormigón sótano -3 | -3    | 1.00                      | 1.00                      | 1.00         | 1.00         | 1.00                | 1.00                | 1.00            | 1.00          | 1.02             |
|                    | -4    | 2.00                      | 2.00                      | 1.41         | 1.51         | 1.10                | 0.97                | 2.00            | 1.59          | 1.35             |
| Hormigón sótano -2 | -2    | 1.00                      | 1.00                      | 1.00         | 1.00         | 1.00                | 1.00                | 1.00            | 1.00          | 1.07             |
|                    | -3    | 2.00                      | 2.00                      | 1.33         | 1.41         | 0.95                | 0.83                | 2.00            | 1.48          | 1.35             |
|                    | -4    | 3.00                      | 3.00                      | 1.58         | 1.73         | 1.05                | 1.03                | 3.00            | 1.86          | 1.53             |
| Descimb. sótano -4 | -2    | 0.00                      | 0.14                      | 0.84         | 0.79         | 0.37                | 0.31                | 0.14            | 0.75          | 0.95             |
|                    | -3    | 0.00                      | 0.11                      | 0.84         | 0.79         | 0.30                | 0.31                | 0.11            | 0.74          | 0.84             |
| Hormigón sótano -1 | -1    | 1.00                      | 1.00                      | 1.00         | 1.00         | 1.00                | 1.00                | 1.00            | 1.00          | 0.94             |
|                    | -2    | 0.67                      | 0.84                      | 1.17         | 1.17         | 0.82                | 0.70                | 0.82            | 1.21          | 1.23             |
|                    | -3    | 0.33                      | 0.47                      | 0.95         | 0.93         | 0.45                | 0.49                | 0.45            | 0.91          | 0.96             |
| Descimb. sótano -3 | -1    | 0.89                      | 0.85                      | 0.92         | 0.89         | 0.34                | 0.32                | 0.65            | 0.87          | 0.81             |
|                    | -2    | 0.44                      | 0.53                      | 0.91         | 0.88         | 0.38                | 0.36                | 0.40            | 0.84          | 0.86             |
| Descimb. sótano -2 | -1    | 0.67                      | 0.59                      | 0.70         | 0.63         | 0.26                | 0.21                | 0.44            | 0.58          | 0.64             |

Al comparar los resultados obtenidos de esta investigación con los diferentes métodos de predicción de cargas, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ✓ En general, todos los modelos teóricos predicen correctamente la posición de la carga máxima durante el proceso de construcción.
- ✓ Los métodos desarrollados por Liu et al. (1985), son los más acertados en la predicción de los valores de carga. Sin embargo, son métodos cuya aplicación resulta compleja.
- ✓ El método simplificado mejorado (Duan y Chen, 1995) predice con una precisión razonable las cargas originadas en los puntales durante la construcción de una estructura de hormigón.

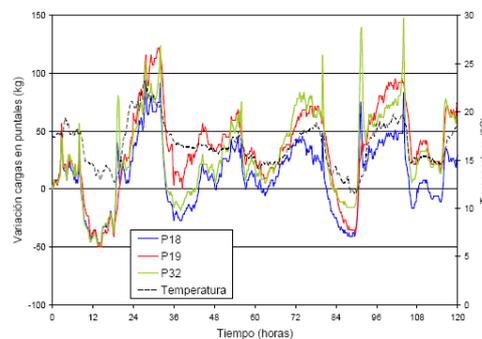


Fig. 2.17 Evolución de carga en puntales medida por Puente et al. (2007)

Además del estudio de la transmisión de cargas entre puntales y forjados durante el proceso constructivo, Puente et al. (2007) realizaron un estudio de la influencia de la temperatura en la

transmisión de dichas cargas en la estructura. Se observó que fluctuaciones de temperaturas diarias pueden producir cambios en los valores de carga en puntales de hasta 300 Kg. La Figura 2.17 muestra la variación por temperatura en algunos de los puntales instrumentados.

#### **2.3.2.8 Medidas realizadas por Alvarado et al. (2009)**

El programa experimental consistió en construir un edificio de tres plantas con forjados de losa maciza de hormigón armado de 25 cm de canto de uso exclusivo para la investigación.

Se instrumentaron 80 puntales. Durante el cimbrado del primer forjado, la totalidad de puntales bajo el área del forjado se encontraban instrumentados. En el cimbrado de los forjados 2 y 3 se instalaron un total de 48 puntales instrumentados por planta, dispuestos en las sopandas principales y en 2 sopandas secundarias. Durante la fase de clareado, la totalidad de los puntales dispuestos bajo los forjados se encontraban instrumentados. 3 puntales fueron utilizados como referencia, con el objeto de medir el efecto de la temperatura ambiente sobre los puntales.

Se instalaron 3 termopares embebidos en cada uno de los forjados para determinar la evolución de la temperatura desde el vertido del hormigón. Asimismo, 2 termopares para medir la temperatura ambiente. Se realizaron ensayos sobre el hormigón de cada uno de los forjados, con el fin de evaluar la evolución de la resistencia a compresión, tracción, flexotracción y módulo de elasticidad de probetas curadas en condiciones de obra.

Una vez construido el edificio y adquiridos todos los datos que se tomaron se obtuvieron distintas conclusiones que se pueden encontrar en su Tesis Doctoral.

## **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 2.9 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 2.9 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<br>Compresión<br>$\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}$ | Tracción,<br>Adherencia y<br>Rasante<br>$\sqrt[3]{\left(\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}\right)^2}$ | Corte y<br>Punzonamiento<br>$\left(\sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{c,28}}}\right)^{\frac{1}{3}}$ | Flexión         |              | Deformaciones<br>$\left(\frac{f_{c,j} + 8}{f_{c,28} + 8}\right)^{\frac{1}{3}}$ |
|--|---|--|-----------------|--------------|--|
|  |   |  | Cuantía<br>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 2.9 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  $\alpha p$  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 permite que el factor de mayoración de acciones durante la etapa de construcción ( $\gamma'_{fg}$ ), pueda reducirse, no siendo menor a 1.25. La EHE no propone el valor del coeficiente de mayoración de acciones durante la construcción.

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,  $\alpha$  la relación entre la carga característica de construcción y la carga característica del forjado,  $\gamma'_{fg}$  el coeficiente de mayoración de acciones de la etapa de construcción y  $\gamma_{fg}$  el coeficiente de mayoración de acciones definido en el artículo 12 de la EHE.

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 2.10 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 2.10, 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 2.10 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 | $E_{c,j} \geq E_{c,28} \cdot f(j) \cdot \frac{\alpha_{28}}{\alpha_{adm}}$                                |
| 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,  $\gamma_D$  y  $\gamma_L$  los factores de mayoración de cargas muertas y sobrecargas respectivamente,  $\Phi_s$  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,  $\beta$  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,  $\gamma'_{fg}$  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 la 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 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, 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 2.18 a 2.21 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 (Pereperez 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.

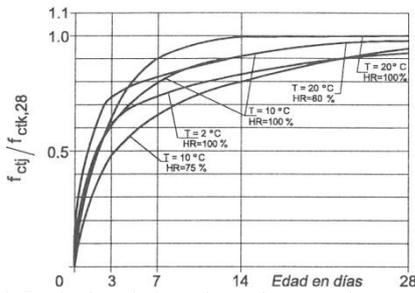


Fig. 2.18 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-450 ARI)

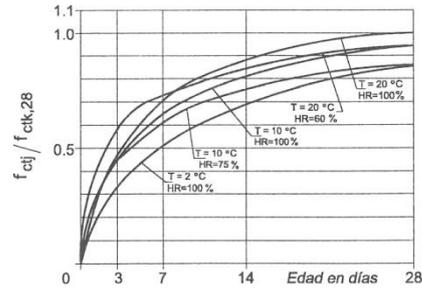


Fig. 2.19 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento P-350)

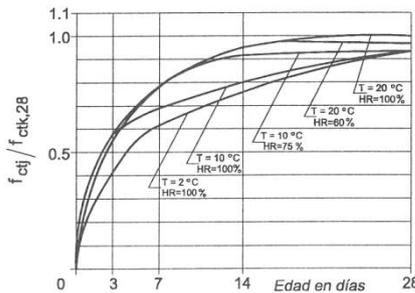


Fig. 2.20 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición escoria)

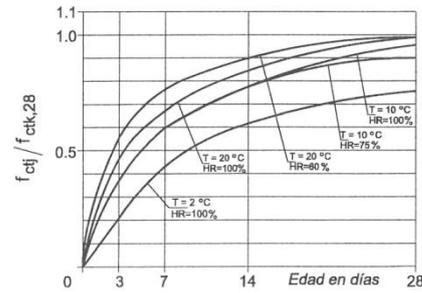


Fig. 2.21 Evolución de la resistencia a tracción, en función de la resistencia a tracción a 28 días (Cemento PA-350 Adición puzolana)

### 2.4.2.3 Método de la madurez para el 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  $\Delta t_i$  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  $f_{cm}$  a partir de la siguiente expresión:

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

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  $\Delta f$  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 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:

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

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

Sin embargo, estas relaciones sólo son válidas para una edad superior a 7 días.

A edades tempranas se pueden emplear las siguientes expresiones obtenidas a partir del tipo de cemento empleado en la mezcla:

Tabla 2.11 Relación  $f_{ckt}(f_{ck})$  para diversos tipos de cementos

|   | Cemento           | Relación $f_{ckt}(f_{ck})$                |
|---|-------------------|---|
| <b>Expresiones propuestas por Fernández (1986)</b>    | P-450 ARI         | $f_{ckt} = 0.26 \cdot f_{ck}^{0.77}$      |
|   | P-350             | $f_{ckt} = 0.07 \cdot f_{ck}^{1.03}$      |
|   | PA-350 (Puzolana) | $f_{ckt} = 0.18 \cdot f_{ck}^{0.85}$      |
|   | PA-350 (Escoria)  | $f_{ckt} = 0.06 \cdot f_{ck}^{1.07}$      |
| <b>Expresión propuesta por Calderón y Adam (2005)</b> | CEM II/A-V 42.5   | $f_{ckt} = 0.11025 \cdot f_{ck}^{0.9315}$ |

Si se considera un nuevo factor  $\beta$ , que compara las cargas de construcción y las cargas de cálculo en servicio, de la ecuación (2.34) se obtiene la siguiente expresión:

$$f_{ckt} \geq \beta \cdot f_{ckt,28} \quad (2.52)$$

donde,

$$\beta = \alpha \cdot \frac{\gamma'_{fg}}{\gamma_{fg}} \quad (2.53)$$

Reemplazando las expresiones que relacionan la resistencia a tracción con la resistencia a compresión del hormigón a edades jóvenes, en la ecuación (2.52) se obtienen las siguientes condiciones de descimbrado:

$$\text{EHE-08} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.5} \cdot f_{ck,28} \quad (2.54)$$

$$\text{ACI} \quad f_{ck,j} \geq \beta^2 \cdot f_{ck,28} \quad (2.55)$$

$$\text{Cemento P-450 ARI} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.3} \cdot f_{ck,28} \quad (2.56)$$

$$\text{Cemento P-350} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{0.97} \cdot f_{ck,28} \quad (2.57)$$

$$\text{Cemento PA-350 (Puzolana)} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{0.93} \cdot f_{ck,28} \quad (2.58)$$

$$\text{Cemento PA-350 (Escoria)} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.18} \cdot f_{ck,28} \quad (2.59)$$

$$\text{CEM II/A-V 42.5} \quad f_{ck,j} \geq \beta^{1.07} \cdot f_{ck,28} \quad (2.60)$$

Las curvas de la Figura 2.22 muestran la relación de  $\beta$ , con respecto a la relación entre la resistencia característica del hormigón a la edad de descimbrado, y la resistencia característica del hormigón a 28 días.

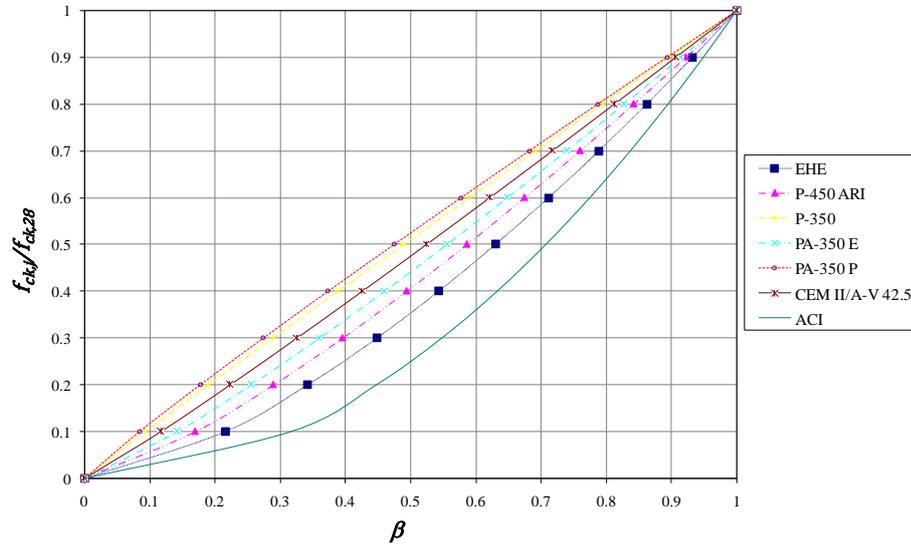


Fig. 2.22 Relación de  $\beta$  con respecto a la relación entre  $f_{ck,j}/f_{ck,28}$

Se observa en la Figura 2.22, que las expresiones de la EHE-08 y de la ACI resultan ser las menos restrictivas de todas, y que sólo las expresiones correspondientes a cementos P-350 y PA-350 Puzolana (cementos de peor calidad, que hoy prácticamente están en desuso en Edificación), son más restrictivas que la expresión correspondiente al cemento CEM II/A-V 42.5. Por lo que, Alvarado et al. (2005) proponen la ecuación (2.60) para determinar la resistencia a compresión necesaria en el momento de descimbrado.

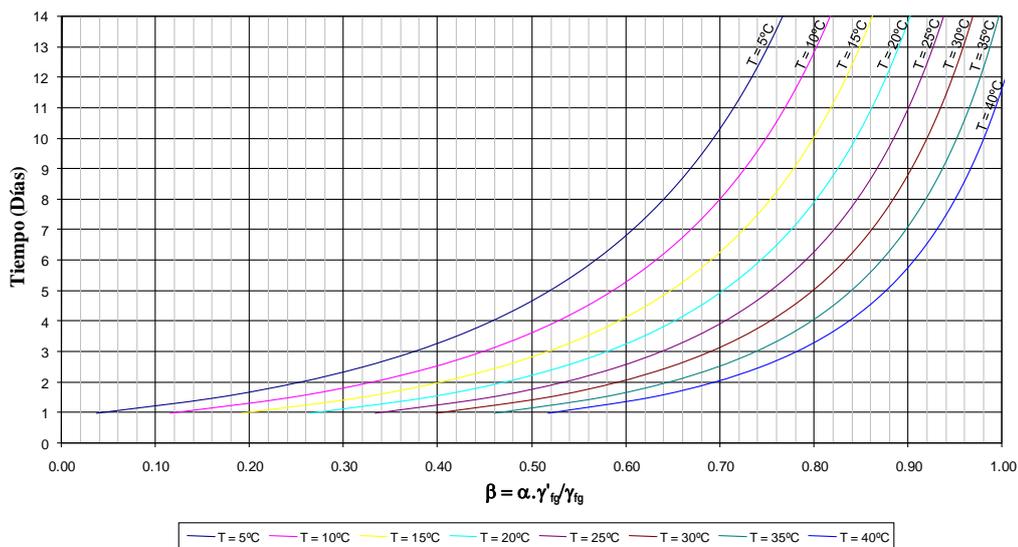


Fig. 2.23 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa. y cemento de endurecimiento rápido  $s = 0.20$ )

A partir de esta expresión, Alvarado et al. (2005) confeccionaron las curvas de las Figuras 2.23, 2.24 y 2.25, para determinar el plazo de descimbrado en función del tipo de cemento utilizado, de la temperatura media en obra, de la relación entre la carga de cálculo de proyecto y la carga de cálculo de construcción (Coeficiente  $\beta$ ), y todo ello para un hormigón con resistencia característica a compresión de 25 MPa.

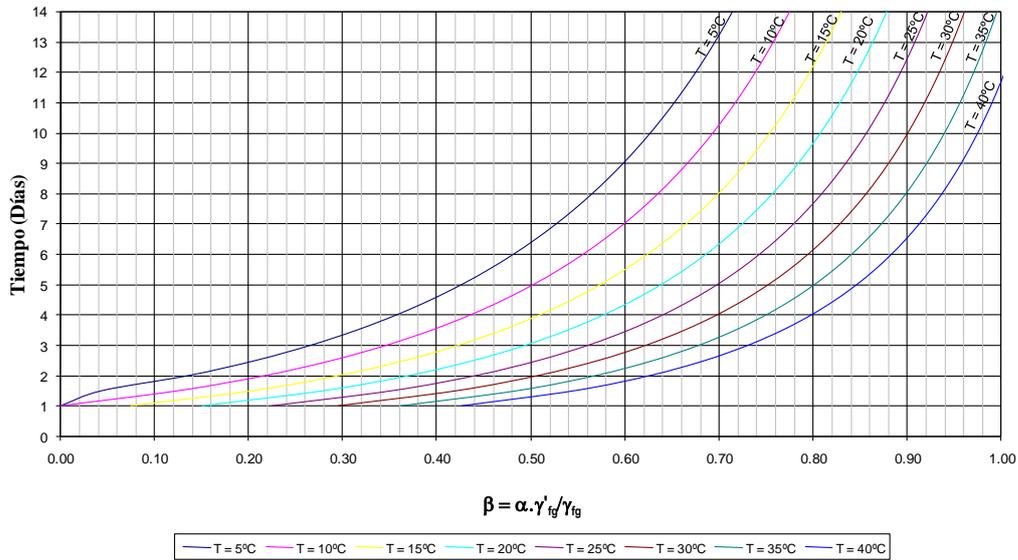


Fig. 2.24 Curvas para determinar el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento normal  $s = 0.25$ )

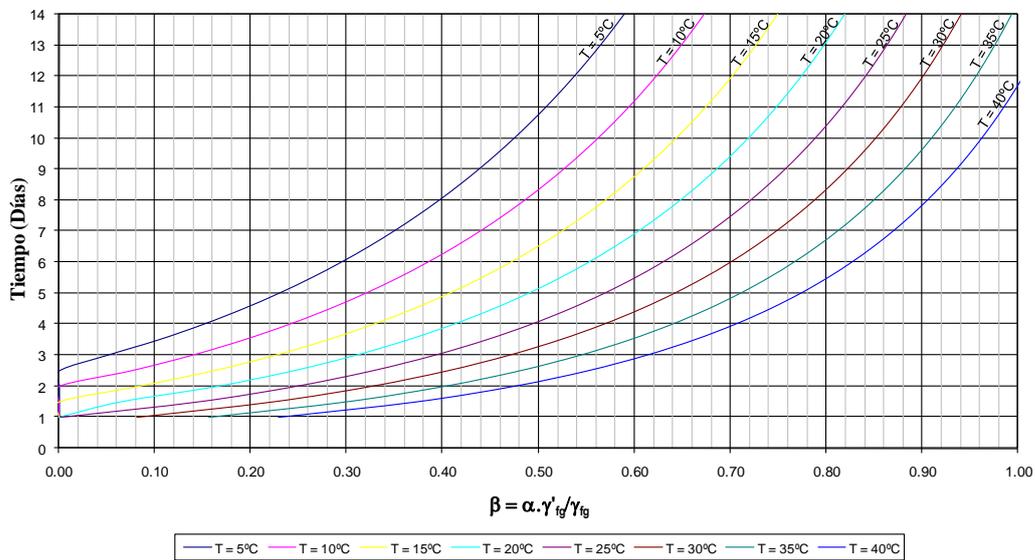


Fig. 2.25 Curvas para el plazo de descimbrado (Hormigón de 25 MPa., y cemento de endurecimiento lento  $s = 0.38$ )

#### 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 2.26 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).

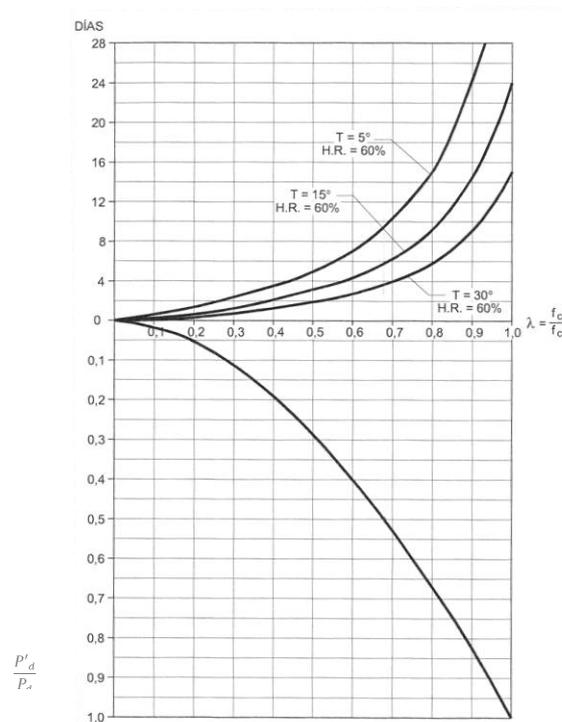


Fig. 2.26 Curva para estimar el plazo de descimbrado en función de la evolución de la resistencia a tracción Díaz (2008)

### 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:

$$j = \frac{400}{\left(\frac{Q}{G} + 0.50\right) \cdot (T + 10)} \quad (2.61)$$

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

| <b>Temperatura superficial del hormigón (°C)</b> |                     | <b>≥ 24°</b> | <b>16°</b> | <b>8°</b> | <b>2°</b> |
|--|---------------------|--------------|------------|-----------|-----------|
| 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 2.13.

Tabla 2.13 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 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 y experimental 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) y Díaz (2008) 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.

La validación experimental de dichos modelos teóricos ha sido desarrollada posteriormente e incluso, en la mayoría de los casos, por otros autores. El desarrollo de gran parte de estos estudios experimentales se ha basado en la instrumentación de edificios durante su construcción midiendo las cargas en los puntales. Esto implica que la toma de datos sea una tarea compleja, debido a que se requiere adaptar toda la organización y control que requiere un estudio experimental al ritmo de la obra existiendo distorsiones en los resultados que no se pueden controlar. Se destacan las mediciones experimentales realizadas por Agarwal y Gardner (1974), Moragues et al. (1992), Rosowsky et al. (1997), Fang et al. (2001) y Puente et al. (2007). Por otra parte, Alvarado et al. (2009), han realizado sus mediciones en condiciones controladas de laboratorio y con fines exclusivamente experimentales.

En este punto es importante resaltar que la mayoría de investigaciones acerca de la transmisión de cargas entre forjados y puntales, tanto teóricas como experimentales, han estudiado el proceso de CD y el proceso de CRD, siendo Moragues et al. (1996) y Alvarado et al. (2009) los únicos que hasta la fecha ha 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 sollicitaciones 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, se puede observar que ningún autor hasta la fecha ha planteado el conseguir mayor eficiencia estructural, aprovechando la capacidad resistente sobrante de los puntales y consiguiendo una redistribución de cargas a través del forjado. Este hecho es posible por cómo se dimensiona el sistema de apuntalamiento, que consiste en obtener la carga máxima del puntal más cargado e instalar en toda la planta el mismo tipo de puntal capaz de resistir dicha carga máxima, que solo se presenta en un punto. El estudio debe permitir, mediante la aplicación del método de los elementos finitos con la mayor precisión posible (como ya realizó Alvarado (2009) en su Tesis Doctoral), obtener la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales en la redistribución de cargas en el forjado. De esta forma se conseguirá mejor eficiencia estructural; más seguridad, puesto que ningún puntal absorberá mayor carga que la esperada; y una fase de construcción más económica, debido a que como se necesita menor capacidad portante en los puntales se podrá utilizar una gama más económica. Se obtendrá para un proceso CCD en el que se presentan las mayores cargas en los puntales.

## CAPÍTULO 3. ESTUDIO POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN EDIFICIO EXPERIMENTAL

### 3.1 Introducción

Con el objeto de estudiar la influencia del empleo de elementos de control de carga en la redistribución de cargas máximas en puntales en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado, utilizaremos, 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.

### 3.2 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 pilares 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. 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.

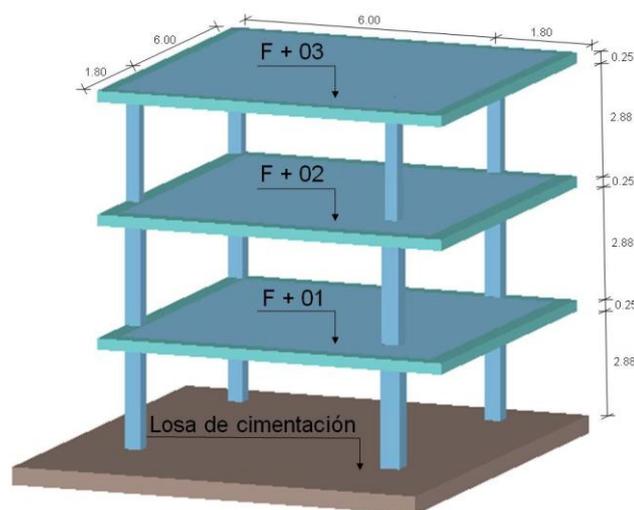


Fig. 3.1 Vista 3D del edificio proyectado

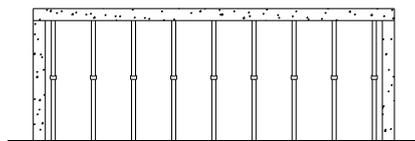
Los materiales empleados en la construcción del edificio se describen a continuación:

- ✓ 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.

### 3.3 Proceso constructivo

El proceso constructivo que adoptaremos en el presente proyecto será el mismo que se adoptó en la construcción de dicho edificio experimental para distorsionar lo mínimo posible los factores influyentes y poder comparar los resultados obtenidos. Dicho proceso es 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. 3.2).

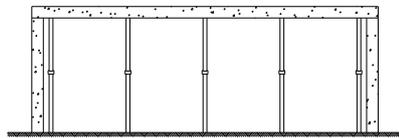


t = 0 días  
Hormigonado 1º Forjado



Fig. 3.2 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. 3.3). 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.

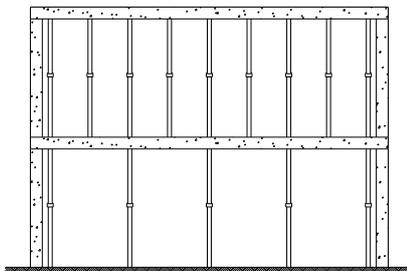


t = 3 días  
Clareado 1° Forjado



Fig. 3.3 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. 3.4).

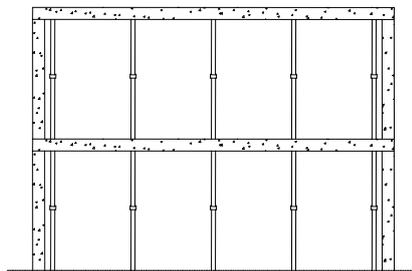


t = 7 días  
Hormigonado 2° Forjado



Fig. 3.4 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. 3.5).

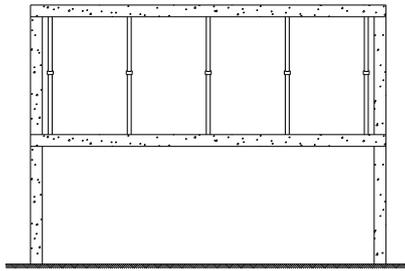


t = 13 días  
Clareado 2° Forjado



Fig. 3.5 Proceso constructivo día "13"

- ✓ Día "14": en esta fase se procedió al descimbrado total de la primera planta (véase Fig. 3.6).

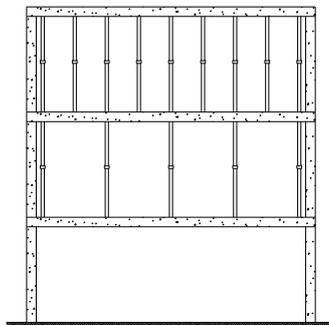


t = 14 días  
Descimbrado 1° Forjado



Fig. 3.6 Proceso constructivo día "14"

- ✓ Día "17": una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procedió a hormigonar el tercer forjado (véase Fig. 3.7).

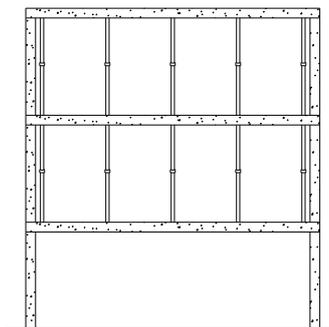


t = 17 días  
Hormigonado 3° Forjado



Fig. 3.7 Proceso constructivo día "17"

- ✓ Día "20": en esta fase se procedió al clareado de puntales de la tercera planta (véase Fig. 3.8).



t = 20 días  
Clareado 3° Forjado



Fig. 3.8 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  $4.0 \text{ kN/m}^2$ , mediante el uso de balsas de agua (véase Fig. 3.9).

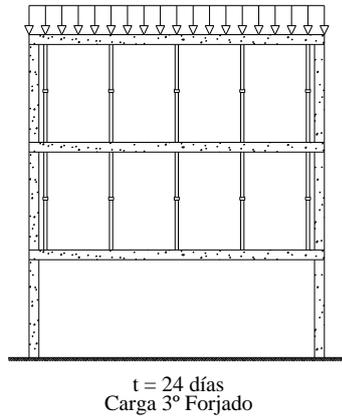


Fig. 3.9 Proceso constructivo día “24”

- ✓ Día “25”: se efectuó el descimbrado total de la segunda planta (véase Fig. 3.10).

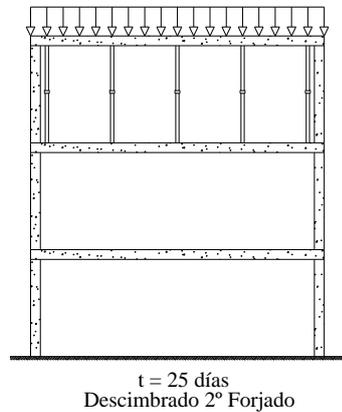


Fig. 3.10 Proceso constructivo día “25”

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

### 3.4 Descripción del sistema de cimbrado

Para el cimbrado de la estructura se empleó el sistema Alumecono suministrado por la empresa Encofrados J. Alsina S.A. El sistema Alumecono 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 describirá cada uno de los componentes del sistema de cimbrado empleado en la construcción del edificio experimental.

#### 3.4.1 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. 3.11). Las características geométricas y de resistencia del puntal empleado se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.1 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 3.2 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                |

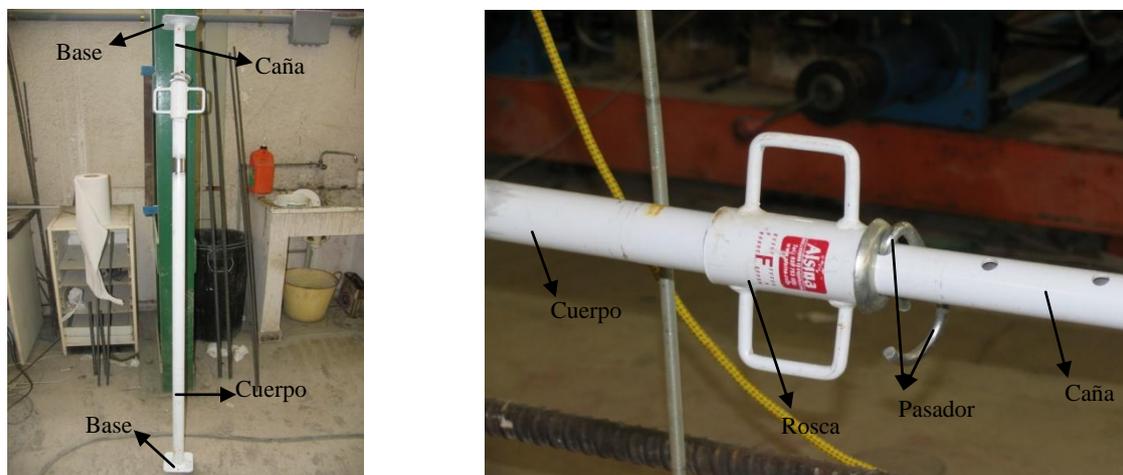


Fig. 3.11 Puntal empleado en el edificio experimental

### 3.4.2 Elemento de control de carga

El elemento de control de carga debe ser un elemento (chapa de acero, elastómero, etc.) situado en la parte superior de los puntales de forma que su misión sea la de controlar la carga que le llega al puntal al que está conectado. De esta forma, elegida la carga que se quiere transmitir al puntal, al instalar el elemento de control de carga, dicho puntal nunca absorberá más carga de la elegida.

Con ello, se conseguirán los objetivos perseguidos en este proyecto:

- ✓ Mayor seguridad en la construcción, puesto que ningún puntal absorberá más carga que el límite impuesto, por lo que no habrán fallos inesperados.
- ✓ Mayor economía del proceso constructivo, puesto que se podrán instalar puntales de menor resistencia al producirse una redistribución de la carga y disminuir las cargas máximas previstas en los puntales.
- ✓ Mayor eficiencia estructural, debida al mayor aprovechamiento de la resistencia del sistema de apuntalamiento. Esto ocurre porque los criterios de diseño actuales se basan en

calcular la máxima carga que recibe cualquier puntal de una planta e instalar puntales capaces de resistir dicha carga en toda la planta. Por ello, con este elemento de control de carga, aparece un nuevo diseño del sistema de apuntalamiento, que aprovecha más la resistencia de todos los puntales al cargarse hasta el límite impuesto por el elemento o hasta un porcentaje mayor de su capacidad resistente.

La respuesta de este elemento de control de carga debe ser similar a la idealizada por un diagrama elasto-plástico perfecto (véase Fig. 3.12). De forma que, al llegar a la carga límite que queremos imponer, el elemento plastifique y empiece a distribuir la carga a los puntales vecinos. A su vez, estos puntales vecinos llegaran a su carga límite impuesta por el elemento y, se obtendrá la redistribución de cargas a través del forjado hacia los pilares deseada.

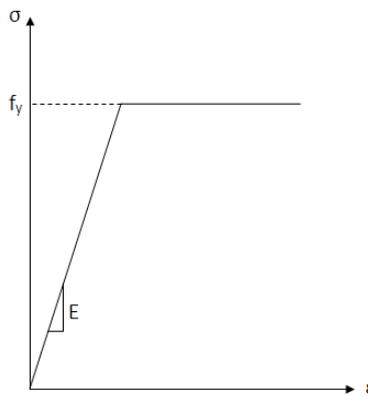


Fig. 3.12 Respuesta elasto-plástica del elemento de control de carga

### 3.4.3 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. 3.13). 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 3.14.

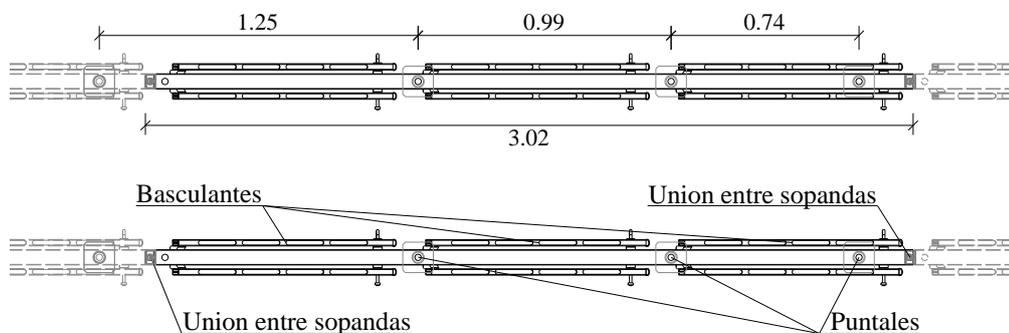


Fig. 3.13 Descripción de las sopandas principales

### 3.4.4 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 3.14.

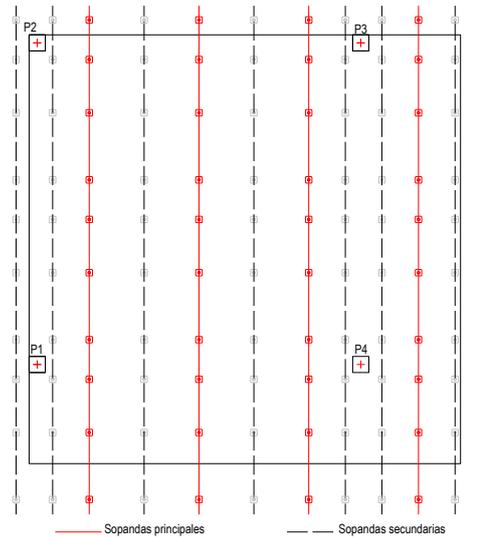


Fig. 3.14 Distribución de sopandas principales y secundarias en los forjados

### 3.4.5 Basculantes

Apoyan sobre las sopandas principales en dos puntos separados entre sí 82 cm. El primero de los apoyos recae sobre un puntal mientras que el segundo se realiza mediante un pasador de acero situado a 18 cm 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. 3.15). Están fabricados en aluminio, siendo su sección rectangular, de 2.5 x 5.0 cm y su longitud de 86 cm.



Fig. 3.15 Extracción del basculante de las sopandas principales

### **3.4.6 Tableros de encofrado**

Los tableros de encofrado son de madera de 0.50 m de ancho, 2 m de largo y 27 mm de espesor.

### **3.4.7 Portasopandas**

Son elementos que sirven de guía para el conjunto de sopandas principales y secundarias. Las portasopandas no cumplen ninguna función resistente.

## **3.5 Ensayos de laboratorio**

Se evaluó el comportamiento de los puntales frente a cargas de compresión centrada obteniendo resultados muy parecidos:

- ✓ Carga de rotura alrededor de los 41 KN.
- ✓ Módulo de elasticidad cercano a los 210 GPa.
- ✓ Rotura por fallo del pasador que apoya la caña del puntal en el cuerpo de éste.

Además, durante la construcción del edificio se realizaron ensayos buscando evaluar las diferentes propiedades del hormigón a distintas edades, buscando así, caracterizar el hormigón curado en las mismas condiciones de obra. Se realizaron ensayos de laboratorio al hormigón de cada uno de los forjados. Los ensayos realizados consistieron en el control de las resistencias a compresión, tracción, flexotracción y del módulo de elasticidad.

## **3.6 Modelo de elementos finitos**

El efecto que tiene el clareado sobre la transmisión de cargas entre forjados y puntales en la construcción de edificios de plantas consecutivas, solo ha sido estudiado hasta la fecha por Moragues et al (1992, 1994) (véanse apartados 2.3.1.7 y 2.3.2.3) e Y.A. Alvarado et al (2009). Moragues et al (1996), a partir de la recopilación de datos experimentales en obras reales, desarrollaron y validaron un modelo en dos dimensiones por el Método de los Elementos Finitos (en adelante MEF). En la investigación desarrollada por Moragues et al. (1992, 1994), se evidenció que al realizar la operación de clareado de un forjado, parte de la carga es asumida por éste, propiciando una descarga global del conjunto de puntales. La conclusión de Moragues et al. (1992, 1994), es reforzada por los resultados tanto experimentales como numéricos de la Tesis Doctoral de Y.A. Alvarado (2009), en donde se desarrolló y validó un modelo en tres dimensiones por el método de elementos finitos aplicado al mismo edificio experimental tratado en este proyecto.

A partir de los estudios anteriores, y partiendo de las características geométricas y mecánicas de cada uno de los elementos que intervienen en la construcción del edificio, en el presente capítulo se lleva a cabo el desarrollo de un modelo tridimensional por el MEF. El desarrollo del modelo de EF pretende simular la influencia de elementos de control de carga en la redistribución de cargas máximas en puntales, en un proceso de cimbrado, clareado y descimbrado. En este modelo no se han

considerado los efectos de los cambios de temperatura aunque si la variación de las propiedades del hormigón.

Para el desarrollo del modelo de EF se emplean hipótesis que serán tratadas con detalle en los apartados posteriores. Cabe destacar que la hipótesis más importante se basa en simular a los puntales como elementos de rigidez finita. Esta hipótesis es básica para simular la reducción de rigidez del sistema de cimbrado que se origina al retirar el 50% de los puntales dentro del proceso de clareado.

Para realizar el cálculo evolutivo que implica el proceso constructivo del edificio, se ha empleado la opción “Birth and Death” y el comando MPCHG disponibles en ANSYS 11.0 (2007). Los aspectos más relevantes del funcionamiento de ANSYS 11.0 (2007) se detallan en apartados posteriores.

### **3.6.1 Hipótesis del modelo de EF**

El modelo de EF descrito en este Capítulo pretende simular el edificio experimental. Así, las características geométricas de los elementos que forman el modelo son las que se describen en los anteriores apartados. De la misma forma, el proceso constructivo se ha modelado según el proceso descrito anteriormente.

Definidas las características y el proceso constructivo del edificio a modelar se adoptarán las siguientes hipótesis:

- ✓ Se asume un comportamiento elástico y lineal del forjado de hormigón armado, considerando la variación de su rigidez con respecto al tiempo. Para evaluar la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados en el tiempo, se usa la técnica de la madurez. Esta técnica permite, mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo, evaluar la evolución de cualquier parámetro en tiempo real. En el Apéndice III se muestra el proceso de cálculo para estimar la evolución diaria del módulo de elasticidad del hormigón de cada uno de los forjados.
- ✓ Los pilares son considerados como elementos de sección rectangular. Se asume que éstos tienen un comportamiento elástico y lineal, y se considera la variación de su rigidez con respecto al tiempo.
- ✓ Los puntales de acero son considerados como soportes de rigidez finita, apoyados en sus extremos. Sus características principales se muestran en la Tabla 3.3. El valor del módulo de elasticidad es el obtenido en el apartado 3.5 del presente proyecto.

Tabla 3.3 Características geométricas y mecánicas de los puntales considerados en el modelo

| <b>Longitud (m)</b> | <b>Diámetro del cuerpo (mm)</b> | <b>Espesor cuerpo (mm)</b> | <b>Módulo de elasticidad (GPa)</b> |
|---------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| 2.88                | 48                              | 2                          | 210                                |

Para modelar el elemento de control de carga adyacente a la parte superior de los puntales simplemente se necesita incorporar un comportamiento idealizado elasto-plástico perfecto al puntal. De esta forma, el comportamiento del puntal modelado es idéntico al comportamiento del puntal más el elemento de control de carga adyacente.

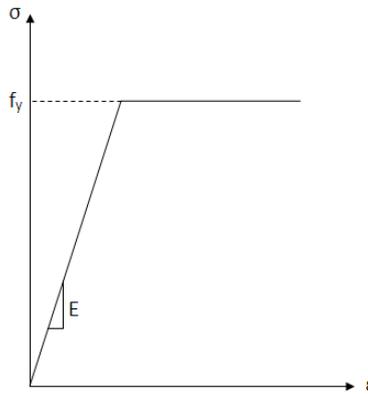


Fig. 3.16 Respuesta elasto-plástica del puntal modelado

- ✓ Los tableros de encofrado son considerados como elementos con un comportamiento elástico y lineal y de rigidez finita. Dichos tableros son de madera y sus propiedades son las proporcionadas por la casa de encofrados ALSINA. Se muestran en la Tabla 3.4 las características del encofrado empleadas en el desarrollo del modelo de EF.

Tabla 3.4 Características geométricas y mecánicas de los tableros de encofrado considerados en el modelo

| Espesor (mm) | Módulo de elasticidad (GPa) |
|--------------|-----------------------------|
| 27           | 10                          |

- ✓ Las sopandas de acero son simuladas como elementos con un comportamiento elástico y lineal, con rigidez finita. Las características se muestran en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Características geométricas y mecánicas de las sopandas consideradas en el modelo

| Sección transversal (mm <sup>2</sup> ) | Módulo de elasticidad (GPa) |
|--|-----------------------------|
| 406                                    | 210                         |

- ✓ La cimentación se considera infinitamente rígida. Esta hipótesis se adopta a partir de establecer que el conjunto de puntales del forjado 1 apoyan directamente sobre la losa de cimentación que se ha diseñado con el suficiente canto para que la hipótesis sea válida.
- ✓ 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.

### 3.6.2 Descripción del modelo de elementos finitos

El modelo de EF se ha realizado con el software comercial ANSYS 11 (2007). Para la discretización de cada una de las partes de la estructura se utilizaron EF tipo SHELL, BEAM y LINK. En los apartados siguientes se explica el tipo y el uso de cada uno de estos elementos. De igual forma se describe como se simula el proceso de cálculo evolutivo del edificio.

### 3.6.2.1 Tipos de EF y mallado empleado

Los forjados de hormigón y los tableros de encofrado de madera se modelizan mediante elementos bidimensionales SHELL63 (ANSYS, 2007). Este elemento está formado por 4 nodos, con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z) y un espesor “h”. El elemento SHELL63 admite realizar un cálculo evolutivo mediante el uso de la opción Birth and Death y el comando MPCHG, que permiten considerar la aparición de nuevos elementos en el cálculo y variar las propiedades de los materiales en el tiempo respectivamente. Estas opciones se explicarán con detalle en apartados posteriores (véase apartado 3.6.2.2). La figura 3.17 incluye la geometría y localización de los nodos del elemento.

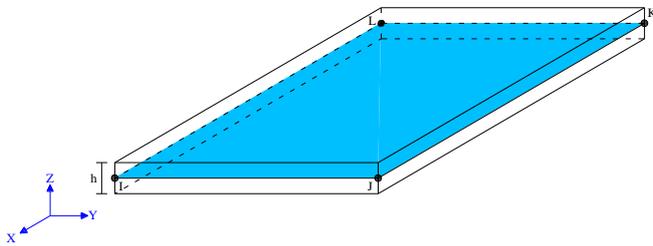


Fig. 3.17 Elemento SHELL63 (ANSYS 11.0 2007)

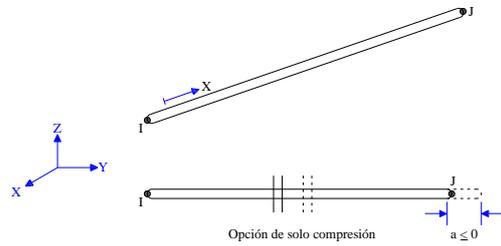


Fig. 3.18 Elemento LINK1 (ANSYS 11.0 2007)

El tamaño de la malla de los forjados está condicionado por sus dimensiones y por la distribución espacial de los componentes del sistema de cimbrado y encofrado. Así, buscando simular con un alto grado de aproximación las características de la estructura, el tamaño de malla de EF para el forjado es de  $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$ . En el caso de los elementos del encofrado, al tener que coincidir sus nodos con los nodos de los elementos del forjado, el tamaño de la malla de EF también es de  $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$ .

Los puntales metálicos se modelizan mediante elementos unidimensionales de 2 nodos tipo LINK1 con 3 grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z). El elemento LINK1 también permite el empleo de la opción Birth and Death que posibilita, para el caso de los puntales, modelar las operaciones de cimbrado, clareado y descimbrado. La figura 3.18 muestra la geometría y disposición de los nodos del elemento.

Para modelizar los pilares de hormigón y las sopandas de acero se emplean elementos tipo BEAM44. El elemento BEAM44 tiene dos nodos (I, J) y un tercer nodo opcional (K) que define la orientación del elemento (en el presente análisis se ha prescindido de emplear dicho nodo). Este elemento cuenta con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z). Dicho elemento permite desplazar sus nodos a partir del eje de la sección (ideal para desplazar los nodos al punto de crecimiento de cada uno de los pilares). Al igual que el resto de elementos empleados en el modelo de EF, el elemento BEAM44 admite la opción Birth and Death y el comando MPCHG. En la figura 3.19 se observa la geometría y disposición de los nodos de dicho elemento.

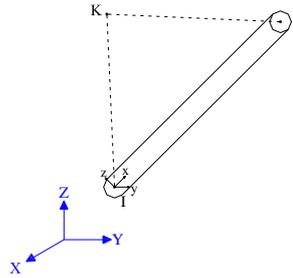


Fig. 3.19 Elemento BEAM44 (ANSYS 11.0 2007)

El tamaño de la malla de los pilares de hormigón es de 0.58 m. En el caso de las sopandas, siendo necesario que los nodos coincidieran con los nodos del encofrado, el tamaño de la malla es de 0.20 m.

### 3.6.2.2 Desarrollo del modelo

El modelo a desarrollar consiste en una estructura de carácter evolutivo. Más concretamente, se trata de una estructura en donde las condiciones de apoyo (puntales, sopandas y encofrado), y las características de los materiales (hormigón), son cambiantes con el tiempo.

Viendo la necesidad de realizar éste cálculo evolutivo y observando los estudios anteriores como en la Tesis Doctoral de Y.A. Alvarado (2009), se plantea la necesidad de utilizar un programa de EF que permita considerar dicha particularidad. El programa escogido (ANSYS 11.0 (2007)) permite realizar el mencionado cálculo.

El cálculo evolutivo en ANSYS 11.0 (2007) se hace en diferentes pasos de carga (Load Steps). Un paso de carga consiste en calcular la estructura con la geometría y las propiedades de los materiales correspondientes a cada una de las fases constructivas consideradas. Así, una vez resuelto el primer paso de carga, el cálculo de un segundo paso parte de los valores de deformación y esfuerzos obtenidos en el primero. De esta forma, se consigue realizar un cálculo evolutivo considerando tantos pasos de carga como fases de construcción del edificio. Para conseguir esto, ANSYS 11.0 (2007) dispone de las opciones Birth and Death y el comando MPCHG.

La opción Birth and Death consiste en activar o desactivar elementos de la estructura a calcular. Para desactivar elementos de la estructura en un paso de carga, se utiliza el comando EKILL. Este comando reduce el valor de rigidez del elemento considerado, multiplicándola por un factor de  $1.0E-6$  (valor por defecto que se puede modificar). Igualmente, al desactivar un elemento, las cargas asociadas a éste son nulas. Para activar un elemento se emplea el comando EALIVE. Este comando asigna a los elementos considerados su rigidez correspondiente, y recupera los valores de carga asociados a dichos elementos.

La evolución del módulo de elasticidad del hormigón en el tiempo se realiza utilizando el comando MPCHG. Este comando permite cambiar el material asignado a los elementos seleccionados. De esta forma, en la construcción del modelo de EF se crean materiales con módulos de elasticidad correspondientes a la edad del hormigón de cada uno de los forjados, en cada una de las fases de construcción. Posteriormente, en cada uno de los pasos de carga, el módulo de elasticidad de los

elementos de los forjados se cambia dependiendo de la edad del hormigón para la fase constructiva considerada. La evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados se estima a partir del ensayo en laboratorio de probetas normalizadas y empleando la técnica de la madurez (el Apéndice III muestra el proceso de cálculo del módulo de elasticidad).

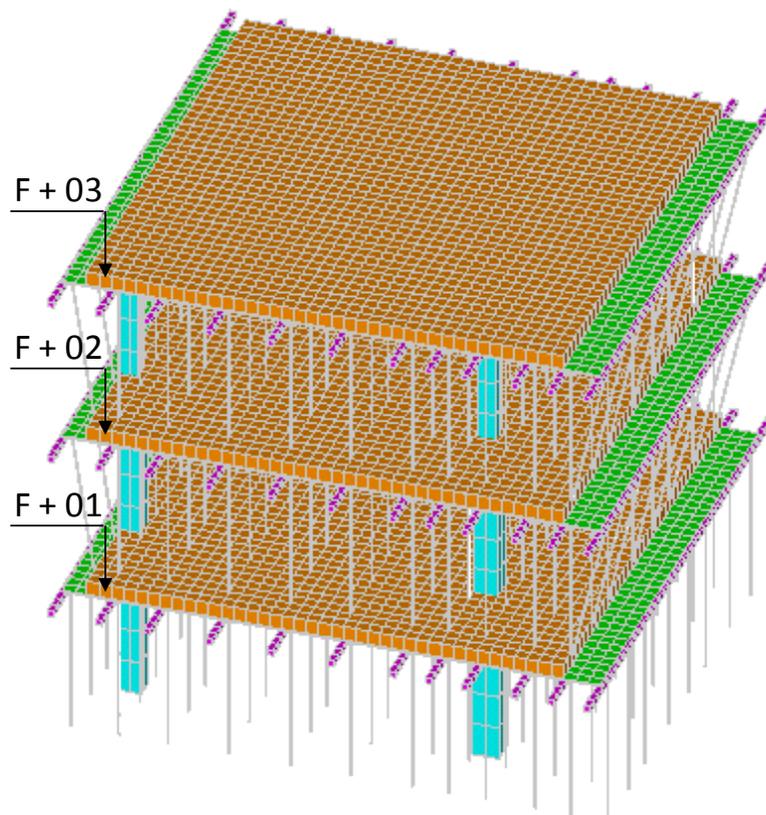


Fig. 3.20 Vista tridimensional del modelo de EF

El proceso de modelado de la estructura está compuesto por tres fases. La primera fase o pre-proceso consiste en definir el tipo de EF, las características de los materiales, la geometría y mallado de la estructura, y la aplicación de las cargas en los elementos. En esta fase se define completamente el modelo de EF, definiendo los tres forjados, pilares y la estructura provisional de apuntalamiento y encofrado. La figura 3.20 muestra la estructura modelada una vez terminado el pre-proceso.

La segunda fase, consiste en resolver 9 pasos de carga correspondientes a 9 fases constructivas. A continuación se explican cada uno de los pasos de carga del modelo de EF:

- a. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1). El cálculo de este paso de carga consiste en desactivar los elementos de los forjados superiores, incluida su estructura temporal (puntales, sopandas y encofrado), dejando solo activados los elementos del forjado 1 con su sistema de cimbrado. La figura 3.21 muestra una vista tridimensional del modelo de EF y las propiedades de los materiales considerados para cada elemento.

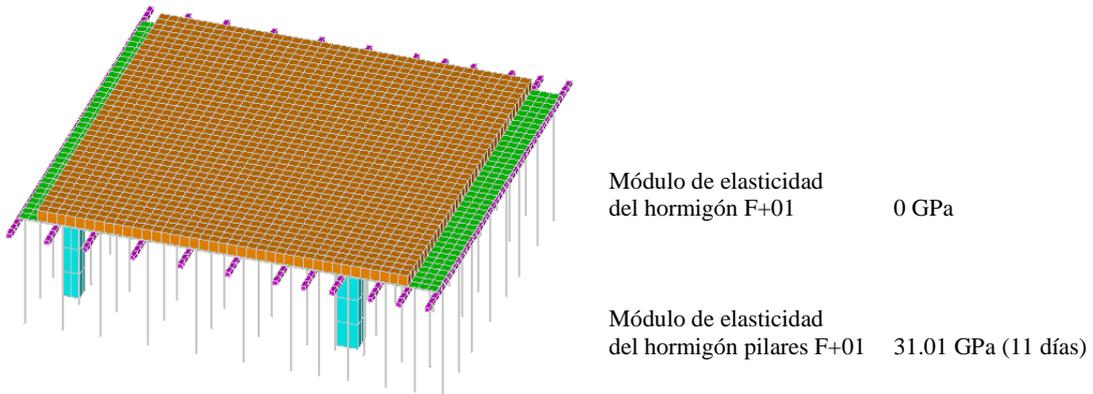


Fig. 3.21 Hormigonado del forjado 1

- b. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1). Para el cálculo de éste paso de carga se desactivan los elementos del encofrado y las sopandas intermedias con sus correspondientes puntales. El módulo de elasticidad del hormigón de los forjados y pilares es modificado por el que corresponde, según la edad del hormigón, al instante de realizar dicha operación de clareado.

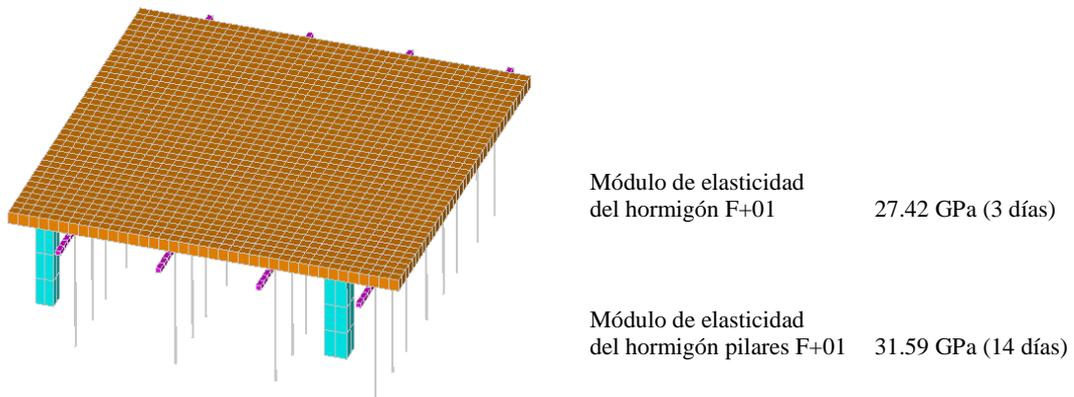
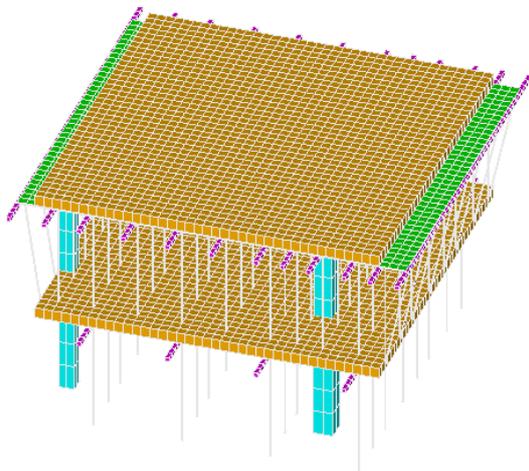


Fig. 3.22 Clareado del forjado 1

La figura 3.22 muestra una vista en tres dimensiones del modelo de EF y las propiedades de los elementos de hormigón.

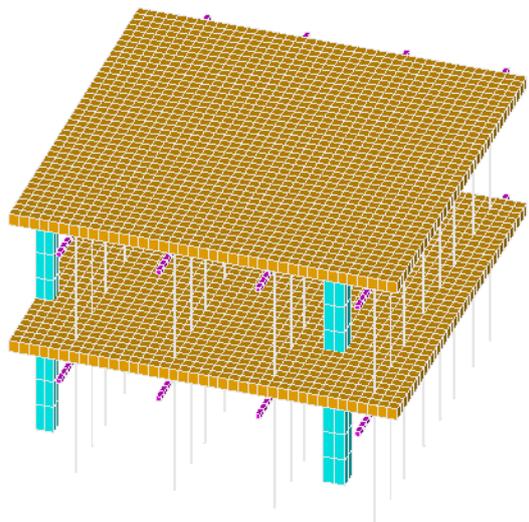
- c. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2). En este paso de carga se activan el conjunto de elementos del forjado 2 incluidos pilares, encofrado, sopandas y puntales. Los módulos de elasticidad de los pilares y del forjado 1 se modifican según la edad de dichos elementos en el instante de realizar el hormigonado del forjado 2. La figura 3.23 muestra una vista tridimensional del modelo de EF y las propiedades de los materiales considerados para cada elemento.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 0 GPa (0 días)      |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 28.71 GPa (6 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 29.67 GPa (7 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 32.27 GPa (18 días) |

Fig. 3.23 Hormigonado del forjado 2

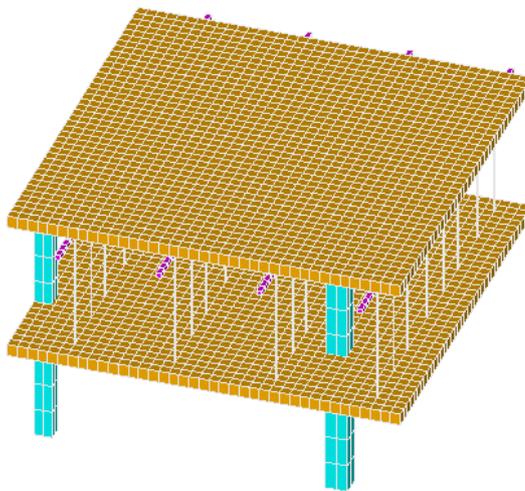
- d. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2). El cálculo del paso de carga 4 consiste en evaluar el comportamiento de la estructura teniendo los forjados 1 y 2 clareados. Para éste cálculo se desactivan el encofrado y sopandas intermedias con sus correspondientes puntales del sistema de cimbrado del forjado 2. La Figura 3.24 muestra el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón según su edad.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 28.71 GPa (6 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 30.59 GPa (12 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 31.42 GPa (13 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 33.05 GPa (24 días) |

Fig. 3.24 Clareado del forjado 2

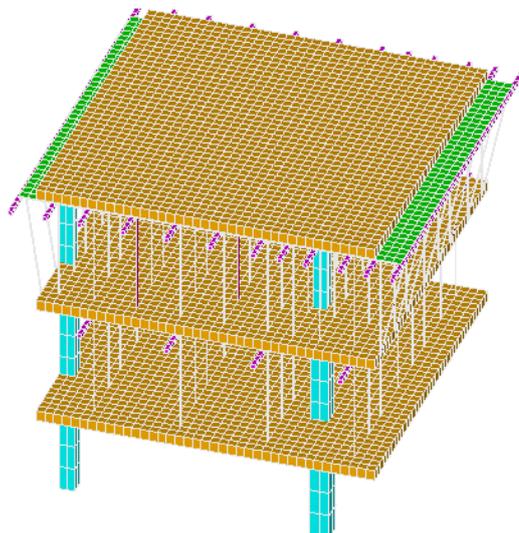
- e. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1). En este paso de carga se desactivan los puntales y sopandas bajo el forjado 1, quedando tan solo los puntales y sopandas bajo el forjado 2. Las propiedades de los elementos de hormigón evolucionan de acuerdo a su edad. En la Figura 3.25 se observa el modelo de EF que corresponde al descimbrado del forjado 1.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 29.06 GPa (7 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 30.84 GPa (13 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 31.59 GPa (14 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 33.16 GPa (25 días) |

Fig. 3.25 Descimbrado del forjado 1

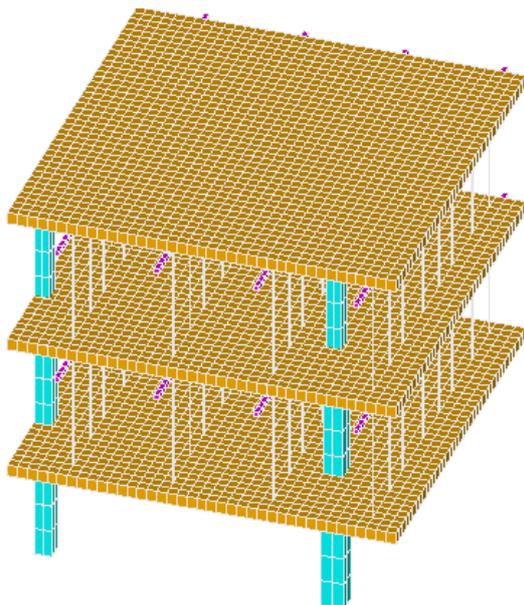
- f. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3). Partiendo del modelo de EF del paso de carga 5, en el modelo del paso de carga 6 se activan los elementos del forjado 3 incluyendo sus pilares y su sistema de cimbrado (encofrado, sopandas y puntales). De la misma forma que en los pasos de carga anteriores, los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón se evolucionan para la edad de cada uno de estos en el momento del hormigonado del forjado 3. La Figura 3.26 muestra el modelo de EF considerado en este paso de carga.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 0 GPa (0 días)      |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 27.46 GPa (4 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 30.01 GPa (10 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 31.42 GPa (16 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 32.10 GPa (17 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 34.08 GPa (28 días) |

Fig. 3.26 Hormigonado del forjado 3

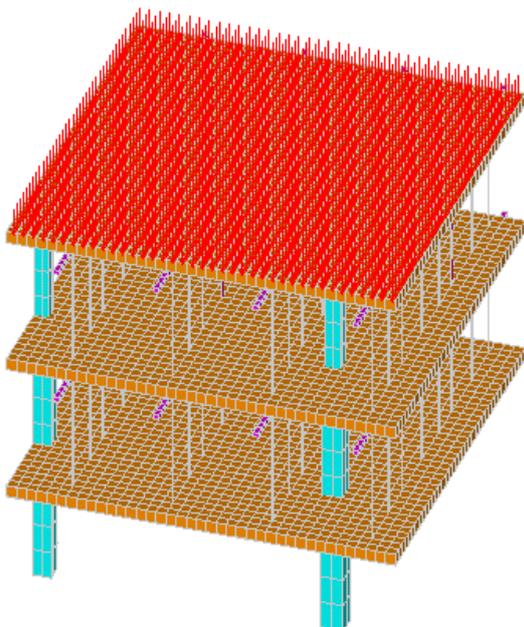
- g. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3). Para el cálculo de éste paso de carga se desactivan el encofrado, puntales y sopandas intermedias, simulando de ésta forma el clareado del tercer forjado. La Figura 3.27 muestra el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón para el momento del clareado del forjado 3.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 26.69 GPa (3 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 28.70 GPa (7 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 30.84 GPa (13 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 32.23 GPa (19 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 32.58 GPa (20 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 34.08 GPa (28 días) |

Fig. 3.27 Clareado del forjado 3

- h. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3). En el edificio experimental se aplicó en el forjado 3 una carga uniforme mediante balsas de agua. Para simular éste proceso en el modelo de EF, se aplica una carga uniforme en los elementos del forjado 3. La figura 3.28 muestra el modelo de elementos correspondiente al paso de carga 8, y los valores del módulo de elasticidad de los diferentes elementos de hormigón.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 28.70 GPa (7 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 30.63 GPa (11 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 31.58 GPa (17 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 32.80 GPa (23 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 33.05 GPa (24 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 34.14 GPa (28 días) |

Fig. 3.28 Carga en el forjado 3

- i. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2). El último paso de carga consiste en el descimbrado del forjado 2. Para simular éste proceso se desactivan los puntales y

sopandas bajo el forjado 2. En la Figura 3.29 se observa el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón para el paso de carga 9.

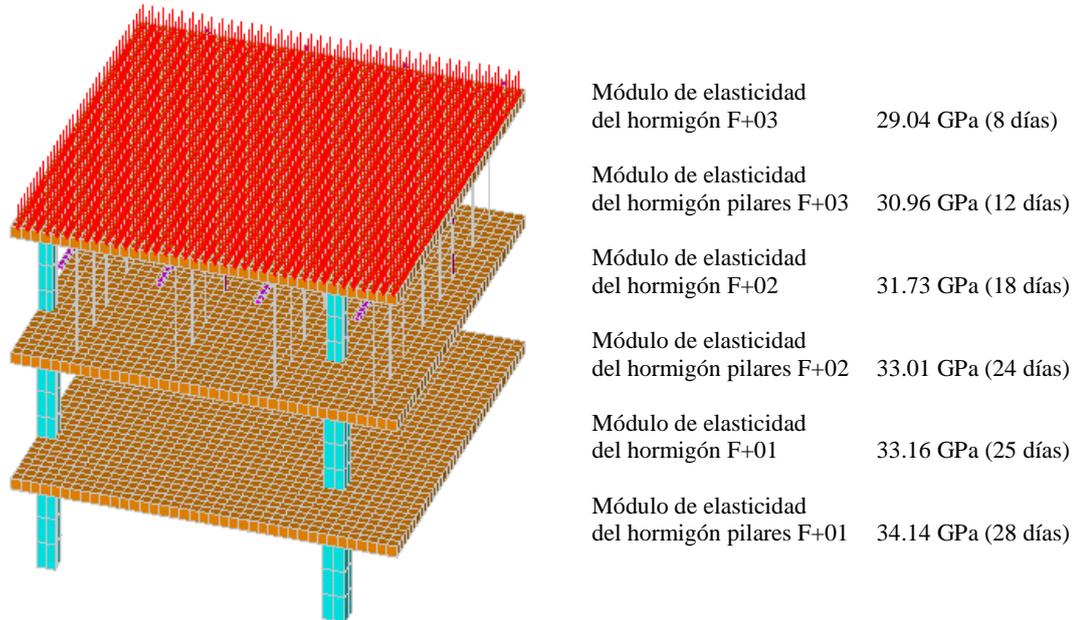


Fig. 3.29 Descimbrado del forjado 2

Para el cálculo de los modelos de EF se ha utilizado un ordenador con las siguientes características:

- ✓ Procesador Intel Core Duo a 1,60 GHz.
- ✓ Memoria RAM de 1 Giga Bytes.
- ✓ Disco duro de 80 Giga Bytes.

El tiempo de cálculo de un modelo de EF, incluyendo todos los pasos de carga, es de 45 minutos.

Tal y como se ha indicado con anterioridad, la modelación de la estructura está compuesta por 3 fases. Mientras que las dos primeras fases han sido expuestas con anterioridad, cabe mencionar que la tercera fase o post-proceso, consiste en extraer los resultados de cada uno de los pasos de carga considerados. Así, en los capítulos 4 y 5, se analizan los resultados obtenidos de los modelos planteados de EF.

### 3.6.3 Carga considerada para el edificio experimental

Debido, a que se trata de un edificio experimental con gran cantidad de puntales instrumentados, a que es más fiel a la realidad y a que en el momento del hormigonado de un forjado la carga que recibe un puntal es el peso correspondiente a su área tributaria; la carga considerada para este edificio es un valor alrededor del proporcionado por los puntales y que ha sido calibrado para el modelo en cuestión. El valor al que nos referimos es  $22,5 \left( \frac{KN}{m^3} \right) * h(m) = 22,5 * h \left( \frac{KN}{m^2} \right)$ , siendo h el canto del forjado expresado en metros.

# CAPÍTULO 4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

## 4.1 Introducción

En este capítulo, debido a la novedad que supone la introducción de los elementos de control de carga en puntales en la construcción de edificios, es necesario realizar un amplio estudio de los diversos factores representativos que intervienen en el modelo. Con ello, se podrá analizar la influencia que tiene cada factor de forma independiente y/o conjunta en el resultado, consiguiendo aislar los efectos de cada uno de ellos y obteniendo conclusiones fidedignas sobre la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales.

Una vez establecidos los factores que se van a estudiar, se procesarán una serie de modelos numéricos que relacionen todas las posibles combinaciones de factores posibles, obteniendo un amplio registro de resultados para cada uno de ellos. Además, también se podrán observar una serie de gráficos que corresponden a isolíneas de carga en puntales para el forjado 1 perteneciente al paso de carga del hormigonado del forjado 2 (paso de carga 3). Se han decidido mostrar únicamente estos gráficos debido a que: dicha planta en dicho proceso de carga es la más crítica respecto a los puntales, es la mejor elección para observar la influencia del elemento de control de carga y existen gran cantidad de modelos y plantas apuntaladas. En ellos se podrá observar, de forma cualitativa, la influencia del elemento de control de carga en puntales en combinación con los otros factores de una forma muy intuitiva.

## 4.2 Factores considerados

El factor más importante, puesto que da sentido al presente proyecto de fin de carrera, es el nivel de carga en el que los puntales empiezan a tener un comportamiento plástico. Es un parámetro que podemos controlar gracias a la incorporación del elemento de control de carga en puntales, como ya se ha citado anteriormente (apartado 3.4.2 del Capítulo 3).

Vistas las cargas que tendrán que soportar los puntales de la primera planta en el hormigonado del segundo forjado considerando un comportamiento elástico en los puntales, se ha decidido establecer cuatro niveles de plastificación como parámetros de estudio. Por lo que, un puntal pasará a tener un comportamiento plástico cuando la carga a la que se vea sometido llegue a valores de:

- ✓ 20 KN (a)
- ✓ 18 KN (b)
- ✓ 16 KN (c)
- ✓ 14 KN (d)

El siguiente factor considerado es el canto del forjado. Cabe destacar, que el edificio experimental se construyó para un canto de 25 cm. y que el modelo fue calibrado para este mismo (Y.A. Alvarado 2009). Se ha considerado este factor debido a la influencia que tiene en las cargas de los puntales al introducir una gran variación de peso propio. Los cantos de los forjados considerados, más utilizados en edificación, son:

- ✓ 20 cm.
- ✓ 25 cm.
- ✓ 30 cm.
- ✓ 35 cm.

Otro factor que se ha considerado oportuno evaluar es el intervalo de tiempo transcurrido entre una operación constructiva y otra. A priori, puede ser un factor importante debido a que, con la introducción del elemento de control de carga, incrementamos las cargas absorbidas por los forjados a edades tempranas cuando el hormigón aún no ha adquirido la totalidad de sus características mecánicas. Variar los intervalos de tiempo entre operaciones constructivas permite, a edades jóvenes del hormigón, analizar si los forjados tienen buen comportamiento al variar sus propiedades mecánicas con el tiempo. Se han considerado los siguientes intervalos de tiempo entre operaciones constructivas:

- ✓ Mismos intervalos de tiempo que los experimentales para los que se ha calibrado el modelo. Son los expuestos en el apartado 3.3 del Capítulo 3.
- ✓ Incremento positivo de los intervalos de tiempo en un día.
- ✓ Incremento negativo de los intervalos de tiempo en un día.

Así, para los distintos planes de obra, la duración del proceso constructivo es de 25 días, 33 días y 17 días respectivamente.

También cabe decir que no se han considerado factores como la dimensión de los pilares porque su influencia es escasa al aportar muy poca rigidez en comparación al sistema de apuntalamiento y a los forjados. Esta consideración se ve reafirmada por muchos de los autores citados en el capítulo 2.

### 4.3 Modelos a realizar y resultados registrados

Considerando todos los factores con sus parámetros correspondientes debidamente combinados, se obtienen 60 modelos distintos. Los podemos observar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Modelos a realizar para el análisis paramétrico. Referencias utilizadas.

| 60 modelos  |        | Plan de obra real |        |        |        | Plan de obra + 1 día |        |        |        | Plan de obra - 1 día |         |         |         |
|---|--------|-------------------|--------|--------|--------|----------------------|--------|--------|--------|----------------------|---------|---------|---------|
|   |        | Cantos (cm)       |        |        |        | Cantos (cm)          |        |        |        | Cantos (cm)          |         |         |         |
|   |        | 20 (1)            | 25 (2) | 30 (3) | 35 (4) | 20 (5)               | 25 (6) | 30 (7) | 35 (8) | 20 (9)               | 25 (10) | 30 (11) | 35 (12) |
| Sin plastificación en puntales                    |        | ✓                 | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓       | ✓       | ✓       |
| Nivel de carga de plastificación en puntales (kN) | 20 (a) | ✓                 | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓       | ✓       | ✓       |
|   | 18 (b) | ✓                 | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓       | ✓       | ✓       |
|   | 16 (c) | ✓                 | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓       | ✓       | ✓       |
|   | 14 (d) | ✓                 | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓      | ✓      | ✓      | ✓                    | ✓       | ✓       | ✓       |

Donde, por ejemplo, cuando se haga referencia al Modelo c6, se tratará de un modelo con 25 cm. de canto, nivel de plastificación de puntales de 16 KN e incremento positivo de los intervalos entre pasos de carga de 1 día. Los modelos que no lleven letra asociada se referirán a modelos con respuesta elástica-lineal de los puntales para cualquier carga.

En cuanto a los resultados registrados de cada modelo, se ha decidido obtener los valores siguientes:

- ✓ Ubicación del puntal más cargado para cada planta apuntalada. Para ubicar dichos puntales se mostrará para cada paso de carga la distribución de puntales en planta en la que cada uno de los puntales tendrá una referencia.
- ✓ Carga de dicho puntal.
- ✓ Máxima flecha elástica de cada uno de los forjados. Nos referimos a flecha elástica al tener un comportamiento elástico y lineal en el forjado, como se ha mencionado en el apartado 3.6.1 del Capítulo 3. Sabiendo que este valor no es correcto, puesto que se debería realizar un análisis no lineal mecánico de las propiedades del hormigón de los forjados excediendo el ámbito de este Proyecto Final de Carrera, se ha creído conveniente registrarlos porque proporciona a nivel cualitativo un dato muy importante en la comparación entre los modelos con comportamiento elástico-lineal en puntales con los de comportamiento elasto-plástico debido al elemento de control de carga. De todos modos, al tratarse de fisuración muy reducida, los valores no diferirán en exceso de los obtenidos aquí. Cabe anotar, que los valores de flecha máxima vienen referenciados respecto a la posición original sin deformar con independencia de que se haya realizado un cálculo no lineal geométrico.
- ✓ Coeficiente de forjado ( $C_f$ ) de cada uno de los forjados.
- ✓ Coeficiente de puntales ( $C_p$ ) de cada planta apuntalada.
- ✓ Momento positivo máximo ( $M+ CL$ ) de cada uno de los forjados.
- ✓ Momento negativo máximo en apoyos ( $M- AP$ ) de cada uno de los forjados.

Estos resultados se mostrarán en forma de tablas en las que aparecerán dichos resultados en el mismo orden expuesto. Además, para cada forjado se aportarán también los valores del momento de fisuración para la edad correspondiente del forjado ( $M_{cr}$ ) y, en caso de que este fisure, la máxima abertura de fisura existente ( $w_k$ ).

Para el cálculo de la fisuración se ha utilizado como marco de referencia la normativa española EHE-08. Se pueden observar los criterios seguidos para el cálculo así como para la limitación de la abertura en el Apéndice IV.

#### **4.4 Análisis de los modelos de elementos finitos**

A continuación, se presentan una serie de tablas con los resultados registrados mencionados anteriormente, en las que se podrá comparar la influencia de los distintos factores controlados así como la combinación de estos. El orden que se seguirá será siempre el mismo: primero, se hará una referencia a qué proceso de carga pertenecen dichas tablas (según apartado 3.6.2.2 del Capítulo 3); y segundo, para qué canto de forjado están calculadas.

#### 4.4.1 Paso de carga 1 (PC1-Hormigonado del forjado 1)

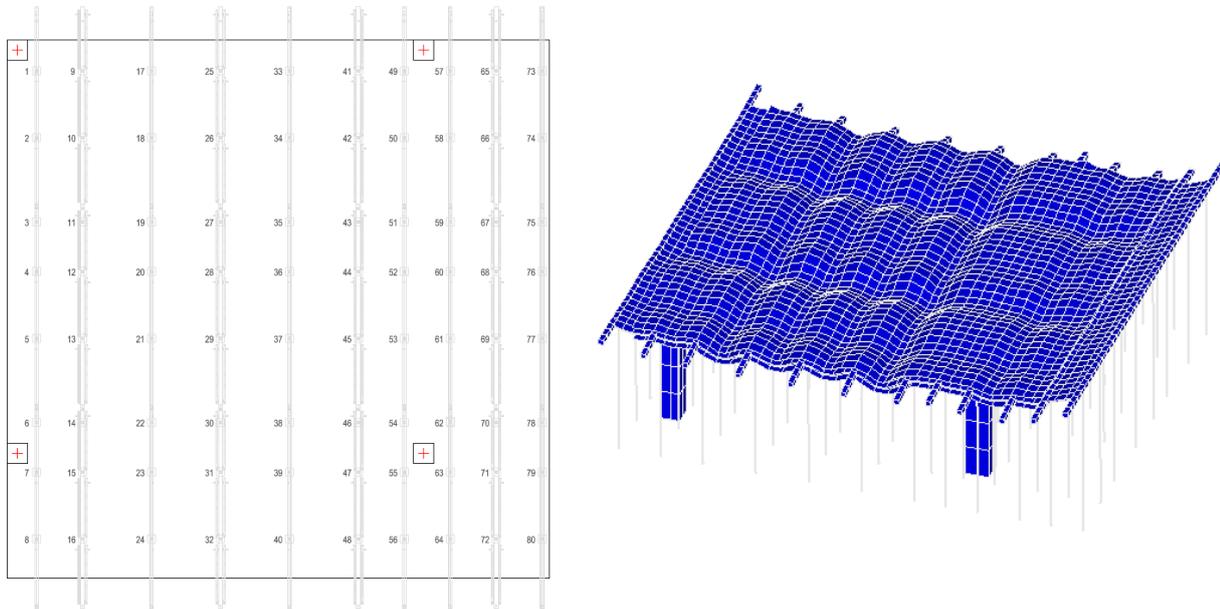


Fig. 4.1 Distribución de puntales del forjado 1 y deformada tipo. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

Como se puede observar, la Figura 4.1 muestra la deformada tipo y la distribución de puntales en el forjado 1. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

En las Tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, se puede observar los resultados obtenidos para todos los modelos en el caso particular que se está tratando. Cabe destacar, además de las particularidades descritas en el apartado 4.3, que los momentos, tanto positivos como negativos, están expresados en unidades de KN\*m; que las referencias a 0, +1 y -1, se refieren a los intervalos de tiempo entre pasos de carga; y que la referencia PC (número) se refiere al paso de carga en cuestión. Todas estas particularidades, expresadas tanto en el apartado 4.3 como aquí, serán una constante a lo largo de este registro de resultados.

Además, cuando un modelo cualquiera no suponga variación alguna de los resultados respecto al modelo anteriormente calculado, en el registro de resultados se expresará mediante el símbolo (“). En este caso concreto, al aparecer cargas máximas en los puntales, inferiores a los niveles de plastificación establecidos, no existen diferencias entre los modelos propuestos.

También cabe recalcar que no existen diferencias de carga en los puntales para un mismo canto de forjado debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga puesto que estamos ante el primer paso de carga y el hormigón permanece en estado líquido sin influir este factor. Por el contrario, para cantos de forjado mayores, las cargas en los puntales y las máximas flechas se incrementan debido al mayor peso propio que supone.

Tanto el valor del coeficiente de forjado ( $C_f$ ) como el de puntales ( $C_p$ ) están expresados respecto a la carga aplicada (en este caso la carga calibrada en el modelo experimental). Así pues, si por ejemplo el  $C_p$  toma el valor de 1, como ocurre en este caso, significa que el sistema de apuntalamiento absorbe la totalidad de la carga aplicada.

4.4.1.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|    |              | Forjado 1          |           |                    |    |    |      |      |     |          |         |
|----|--------------|--------------------|-----------|--------------------|----|----|------|------|-----|----------|---------|
|    |              | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf | Cp | M+CL | M-AP | Mcr | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 1E    | 37                 | 5842.2    | 0.37               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo a1 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b1 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c1 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d1 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| +1 | Modelo 5E    | 37                 | 5842.2    | 0.37               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo a5 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b5 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c5 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d5 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| -1 | Modelo 9E    | 37                 | 5842.2    | 0.37               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo a9 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b9 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c9 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d9 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |

Tabla 4.2 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 1.

4.4.1.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|     |               | Forjado 1          |           |                    |    |    |      |      |     |          |         |
|-----|---------------|--------------------|-----------|--------------------|----|----|------|------|-----|----------|---------|
|     |               | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf | Cp | M+CL | M-AP | Mcr | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0   | Modelo 2 E    | 37                 | 6852.7    | 0.47               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|     | Modelo a2 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo b2 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo c2 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| +1  | Modelo d2 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo 6 E    | 37                 | 6852.7    | 0.47               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|     | Modelo a6 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo b6 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| -1  | Modelo c6 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo d6 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo 10 E   | 37                 | 6852.7    | 0.47               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|     | Modelo a10 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| PC1 | Modelo b10 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo c10 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|     | Modelo d10 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |

Tabla 4.3 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 1.

4.4.1.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|    |               | Forjado 1          |           |                    |    |    |      |      |     |          |         |
|----|---------------|--------------------|-----------|--------------------|----|----|------|------|-----|----------|---------|
|    |               | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf | Cp | M+CL | M-AP | Mcr | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 3 E    | 37                 | 8223.2    | 0.35               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo a3 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b3 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c3 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d3 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| +1 | Modelo 7 E    | 37                 | 8223.2    | 0.35               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo a7 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b7 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c7 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d7 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
| -1 | Modelo 11 E   | 37                 | 8223.2    | 0.35               | 0  | 1  | 0    | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo a11 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b11 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c11 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d11 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "    | "    | "   | "        | "       |

Tabla 4.4 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 1.

4.4.1.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|      |               | Forjado 1          |           |                    |    |    |       |       |     |          |         |
|------|---------------|--------------------|-----------|--------------------|----|----|-------|-------|-----|----------|---------|
|      |               | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf | Cp | M+ CL | M- AP | Mer | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0    | Modelo 4 E    | 37                 | 9593.7    | 0.56               | 0  | 1  | 0     | 0     | -   | -        | -       |
|      | Modelo a4 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo b4 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo c4 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
| + 1  | Modelo d4 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo 8 E    | 37                 | 9593.7    | 0.56               | 0  | 1  | 0     | 0     | -   | -        | -       |
|      | Modelo a8 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo b8 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
| - 1  | Modelo c8 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo d8 EP  | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo 12 E   | 37                 | 9593.7    | 0.56               | 0  | 1  | 0     | 0     | -   | -        | -       |
|      | Modelo a12 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
| PC 1 | Modelo b12 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo c12 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |
|      | Modelo d12 EP | "                  | "         | "                  | "  | "  | "     | "     | "   | "        | "       |

Tabla 4.5 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 1.

#### 4.4.2 Paso de carga 2 (PC2-Clareado del forjado 1)

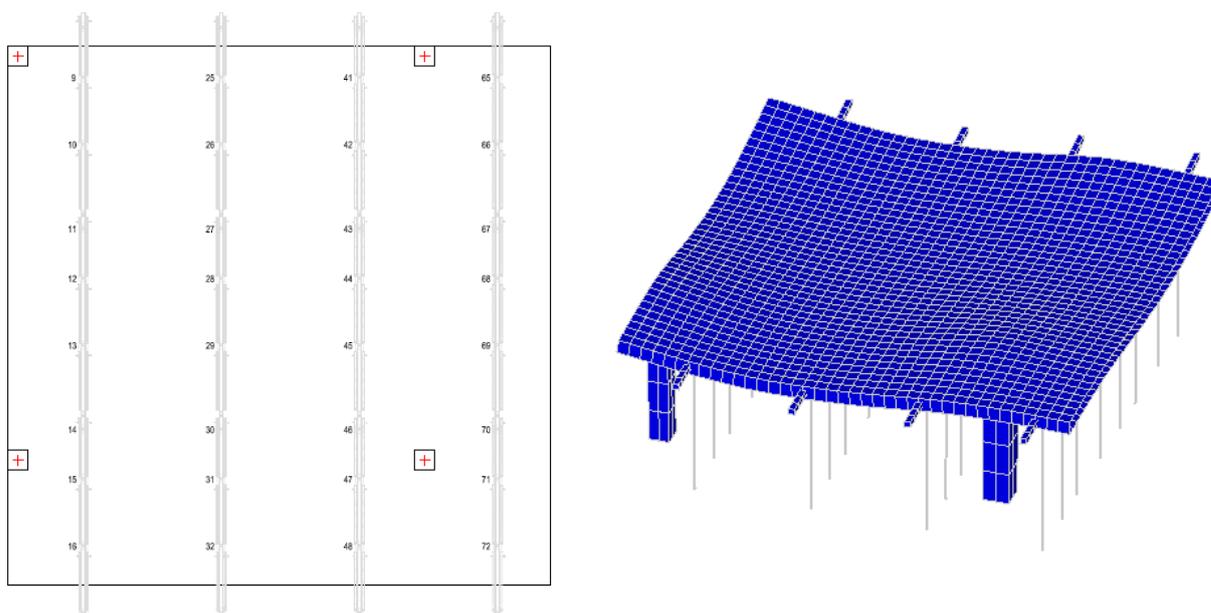


Fig. 4.2 Distribución de puntales del forjado 1 y deformada tipo. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

Como se puede observar, la Figura 4.2 muestra la distribución de puntales en el forjado 1 y la deformada tipo. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

En las Tablas 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9, se puede observar el registro de resultados para este proceso de carga. Del mismo modo que para el primer paso de carga, al aparecer cargas máximas en los puntales, inferiores a los niveles de plastificación establecidos, no existen diferencias en los resultados debidas a este factor.

En cuanto a la carga en los puntales para un mismo canto de forjado, debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga, la carga máxima varía, aumentando si los intervalos disminuyen y viceversa. De forma intuitiva, el sistema de apuntalamiento ( $C_p$ ) absorbe más carga para intervalos de tiempo entre pasos de carga menores, debido a que la rigidez del sistema de apuntalamiento es mayor respecto a la del forjado, que tiene menor módulo de elasticidad al ser un hormigón más joven. Además, las máximas flechas aumentan debido también al mismo fenómeno.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez, como se ha mencionado en el anterior párrafo, de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el forjado asume mayor proporción de carga pasando de un 30 % de la carga aplicada para un canto de 20 cm. hasta un 55 % para un canto de 35 cm. Por ello, las cargas máximas en los puntales aunque se incrementan debido al mayor peso propio, no lo hacen de forma excesiva puesto que el sistema de apuntalamiento absorbe menos proporción de carga. Esta máxima carga no varía su ubicación bajo ningún factor considerado.

También se puede observar, como para este paso de carga, no existe fisuración en ningún punto del forjado debido a que los momentos existentes son inferiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ).

4.4.2.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|    |              | Forjado 1 (3/4/2 días) |           |                    |      |      |      |      |       |          |         |
|----|--------------|------------------------|-----------|--------------------|------|------|------|------|-------|----------|---------|
|    |              | Puntal más cargado     | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+CL | M-AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 1E    | 27                     | 9472.2    | 0.46               | 0.29 | 0.71 | 2.93 | 6.20 | 14.45 | NO       | -       |
|    | Modelo a1 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo b1 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo c1 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo d1 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
| +1 | Modelo 5E    | 27                     | 9441.8    | 0.46               | 0.30 | 0.70 | 3.00 | 6.33 | 16.15 | NO       | -       |
|    | Modelo a5 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo b5 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo c5 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo d5 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
| -1 | Modelo 9E    | 27                     | 9513.5    | 0.47               | 0.28 | 0.72 | 2.87 | 6.00 | 11.77 | NO       | -       |
|    | Modelo a9 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo b9 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo c9 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |
|    | Modelo d9 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "    | "     | "        | "       |

Tabla 4.6 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 2.

4.4.2.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|    |                    | Forjado 1 (3/4/2 días) |           |                    |      |      |      |       |       |          |         |
|----|--------------------|------------------------|-----------|--------------------|------|------|------|-------|-------|----------|---------|
|    |                    | Puntal más cargado     | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+CL | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | <b>Modelo 2 E</b>  | 27                     | 10913     | 0.53               | 0.39 | 0.61 | 5.00 | 10.83 | 21.78 | NO       | -       |
|    | Modelo a2 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b2 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c2 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo d2 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
| +1 | <b>Modelo 6 E</b>  | 27                     | 10834     | 0.52               | 0.39 | 0.61 | 5.10 | 11.04 | 24.34 | NO       | -       |
|    | Modelo a6 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b6 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c6 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo d6 EP       | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
| -1 | <b>Modelo 10 E</b> | 27                     | 11024     | 0.53               | 0.38 | 0.62 | 4.90 | 10.57 | 17.73 | NO       | -       |
|    | Modelo a10 EP      | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b10 EP      | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c10 EP      | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo d10 EP      | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |

Tabla 4.7 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 2.

4.4.2.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|    |               | Forjado 1 (3/4/2 días) |           |                    |      |      |      |       |       |          |         |
|----|---------------|------------------------|-----------|--------------------|------|------|------|-------|-------|----------|---------|
|    |               | Puntal más cargado     | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+CL | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 3 E    | 27                     | 11660     | 0.56               | 0.48 | 0.52 | 8.48 | 16.20 | 30.20 | NO       | -       |
|    | Modelo a3 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b3 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c3 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo d3 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
| +1 | Modelo 7 E    | 27                     | 11586     | 0.55               | 0.48 | 0.52 | 8.70 | 16.35 | 33.75 | NO       | -       |
|    | Modelo a7 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b7 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c7 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo d7 EP  | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
| -1 | Modelo 11 E   | 27                     | 11841     | 0.57               | 0.47 | 0.53 | 8.33 | 15.83 | 24.58 | NO       | -       |
|    | Modelo a11 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b11 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c11 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo d11 EP | "                      | "         | "                  | "    | "    | "    | "     | "     | "        | "       |

Tabla 4.8 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 2.

4.4.2.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf   | Cp   | Forjado 1 (3/4/2 días) |       |       |          |         |
|----|--------------------|-----------|--------------------|------|------|------------------------|-------|-------|----------|---------|
|    |                    |           |                    |      |      | M+CL                   | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | <b>Modelo 4 E</b>  | 27        | 11889              | 0.57 | 0.45 | 12.66                  | 21.44 | 39.52 | NO       | -       |
|    | Modelo a4 EP       | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b4 EP       | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c4 EP       | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
| +1 | <b>Modelo 8 E</b>  | 27        | 11725              | 0.56 | 0.44 | 12.76                  | 21.64 | 44.17 | NO       | -       |
|    | Modelo a8 EP       | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b8 EP       | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c8 EP       | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
| -1 | <b>Modelo 12 E</b> | 27        | 12128              | 0.58 | 0.46 | 12.45                  | 21.03 | 32.17 | NO       | -       |
|    | Modelo a12 EP      | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo b12 EP      | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |
|    | Modelo c12 EP      | "         | "                  | "    | "    | "                      | "     | "     | "        | "       |

Tabla 4.9 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 2.

#### 4.4.3 Paso de carga 3 (PC3-Hormigonado del forjado 2)

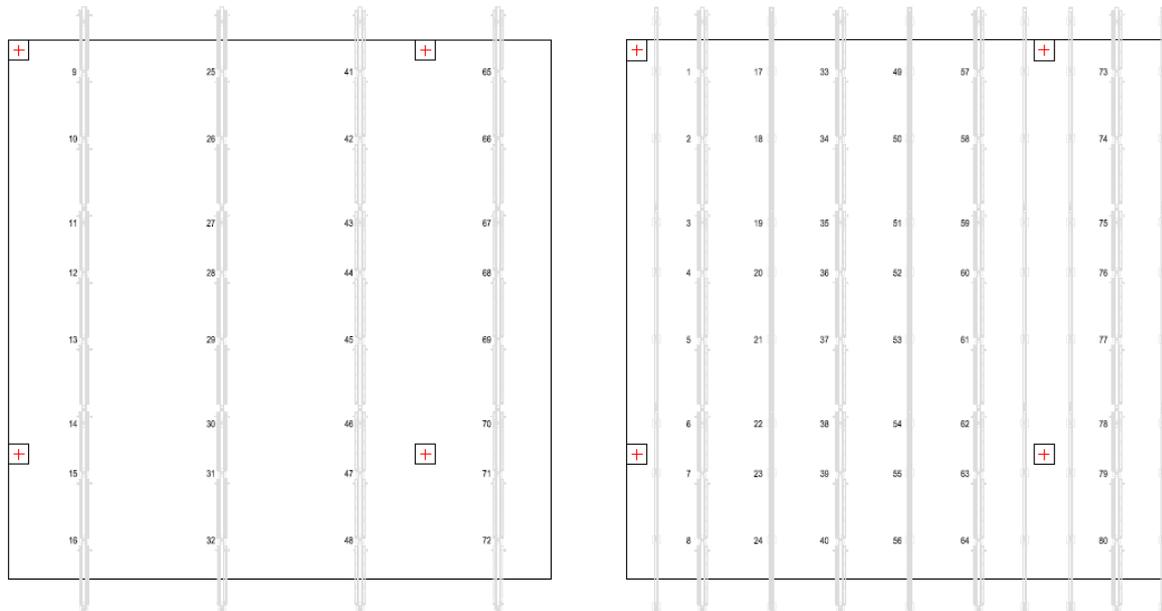


Fig. 4.3 Distribución de puntales en forjados 1 y 2. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

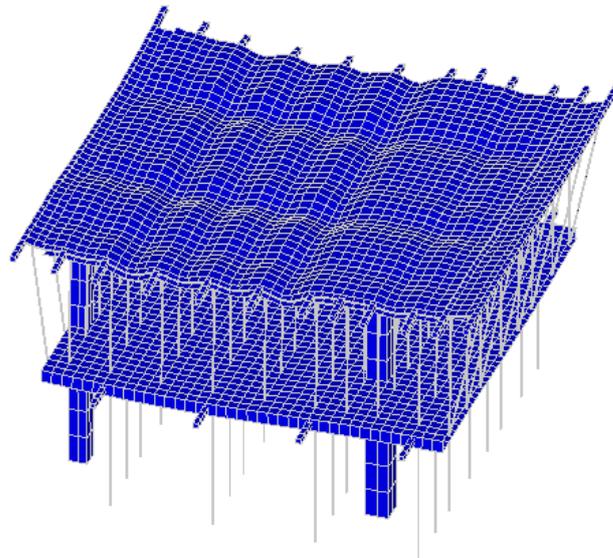


Fig. 4.4 Deformada tipo. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

Como se puede observar, las Figuras 4.3 y 4.4 muestran la distribución de puntales en el forjado 1 y 2, y la deformada tipo respectivamente. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

En cuanto a la tipografía, de ahora en adelante, el color rojo indica que uno o varios puntales han alcanzado el nivel de plastificación; el color azul expresa los resultados de los modelos donde no se han introducido los niveles de plastificación en puntales (comportamiento elástico y lineal de los puntales) que nos sirven de referencia y comparación de resultados; y la separación por los símbolos “/” o “\_” indica las distintas plantas apuntaladas o los distintos forjados existentes en cada caso.

4.4.3.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|    |              | Forjado 1 (7/9/5 días)  |              |                    |           |           |      |       |       |          |         | Forjado 2 |      |     |          |         |
|----|--------------|-------------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|------|-------|-------|----------|---------|-----------|------|-----|----------|---------|
|    |              | Puntal más cargado      | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf        | Gp        | M+CL | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) | M+CL      | M-AP | Mcr | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 1 E   | 27/37                   | 18769/5475.8 | 0.91_1.25          | 0.62/0.00 | 1.38/1.00 | 6.30 | 13.13 | 19.01 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo b1 EP | "                       | "            | "                  | "         | "         | 6.30 | 13.13 | 19.01 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b1 EP | 27-28/37                | 18000/5476.4 | 0.92_1.25          | 0.62/0.00 | 1.38/1.00 | 6.30 | 13.13 | 19.01 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c1 EP | 10-13,26-30,43-44/37    | 16000/5476.4 | 1.05_1.36          | 0.62/0.00 | 1.38/1.00 | 6.50 | 13.33 | 19.01 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d1 EP | 10-13,25-32,42-45/37    | 14000/5476.6 | 1.50_1.76          | 0.67/0.00 | 1.33/1.00 | 8.50 | 15.00 | 19.01 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
| +1 | Modelo 5 E   | 27/37                   | 18750/5475.7 | 0.91_1.25          | 0.62/0.00 | 1.38/1.00 | 6.37 | 13.20 | 20.11 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo b5 EP | "                       | "            | "                  | "         | "         | 6.37 | 13.20 | 20.11 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b5 EP | 27-28/37                | 18000/5476.3 | 0.92_1.25          | 0.62/0.00 | 1.38/1.00 | 6.37 | 13.20 | 20.11 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c5 EP | 10-13,26-29,43-44/37    | 16000/5476.2 | 1.05_1.36          | 0.65/0.00 | 1.38/1.00 | 6.57 | 13.40 | 20.11 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d5 EP | 10-13,25-32,42-45/37    | 14000/5476.4 | 1.49_1.75          | 0.68/0.00 | 1.32/1.00 | 8.50 | 15.07 | 20.11 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
| -1 | Modelo 9 E   | 27/37                   | 18844/5475.6 | 0.92_1.25          | 0.60/0.00 | 1.40/1.00 | 6.17 | 12.80 | 17.36 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        | -       |
|    | Modelo b9 EP | "                       | "            | "                  | "         | "         | 6.17 | 12.80 | 17.36 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo b9 EP | 27-28/37                | 18000/5476.3 | 0.93_1.26          | 0.60/0.00 | 1.40/1.00 | 6.17 | 12.80 | 17.36 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo c9 EP | 10-13,26-30,43-44/37    | 16000/5476.3 | 1.09_1.39          | 0.61/0.00 | 1.39/1.00 | 6.43 | 13.07 | 17.36 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |
|    | Modelo d9 EP | 10-14,25-32,42-45,67/37 | 14000/5476.4 | 1.57_1.81          | 0.67/0.00 | 1.34/1.00 | 8.47 | 14.80 | 17.36 | NO       | -       | "         | "    | "   | "        | "       |

Tabla 4.10 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 3.

En la Tabla 4.10, se puede observar el registro de resultados para este paso de carga y para un canto de 20 cm. Del mismo modo que ocurría anteriormente, al aparecer cargas máximas en los puntales inferiores a los niveles de plastificación establecidos, no existen diferencias en los resultados debidas a este factor entre los modelos con comportamiento elástico en los puntales y los modelos con niveles de plastificación de 20 KN.

En cuanto a la carga en los puntales, debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga, la carga máxima varía, aumentando si los intervalos disminuyen y viceversa como ya se ha explicado anteriormente. Se puede apreciar en los modelos con comportamiento elástico en los puntales puesto que en el resto la carga viene condicionada por el nivel de plastificación. Además, las máximas flechas aumentan debido también al mismo fenómeno.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. También se puede observar que no existe fisuración en ningún punto del forjado debido a que los momentos existentes son inferiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ).

Respecto a los valores de la segunda planta, como es una planta recién hormigonada, las cargas en los puntales no varían sustancialmente puesto que cada puntal resiste aproximadamente la carga de su área tributaria. Las máximas flechas sí se ven modificadas debido al cambio que tienen las flechas del primer forjado.

Como bien es sabido, en este paso de carga, aparece la situación más crítica para el sistema de apuntalamiento en el caso CCD (Cimbrado-Clareado-Descimbrado) para dos juegos de puntales. Por ello, y porque en este paso de carga existe la mayor influencia del elemento de control de carga en puntales, se realizará mayor énfasis en el análisis de resultados.

En primer lugar, si centramos la atención en el caso en el que se consideran los mismo intervalos entre pasos de carga que en el edificio experimental (0), se puede observar que a medida que se imponen menores niveles de plastificación, mayor es el número de puntales que pasan a tener un comportamiento plástico debido al elemento de control de carga puesto que existe una redistribución de cargas a través del forjado hacia los pilares. De forma claramente intuitiva, se han obtenido gráficos de isolíneas de carga en puntales donde se puede ver de forma cualitativa las cargas que recibirán los puntales, la ubicación de éstos y la zona en la que los puntales que aparezcan en ella aparecerán con comportamiento plástico debido al elemento de control de carga. Todo ello aparece en las Figs. 4.5 y 4.6.

Se puede apreciar, además, que debido a imponer niveles de carga en puntales más restrictivos, se consigue una redistribución clara de cargas a través del forjado hacia los pilares sin un aumento considerable ni del coeficiente de forjado ni de las máximas flechas. De forma cuantitativa, para el caso más restrictivo, disminuyendo la carga máxima que recibe un puntal en aproximadamente un 25 % solo aumenta el momento máximo en un 12,5 % y la flecha máxima en 0.59 mm, siendo estos valores admisibles y no ocasionando fisuración en el forjado a causa de la redistribución de cargas.

En segundo lugar, si se presta atención al caso en el que los intervalos entre pasos de carga se incrementan en un día, a nivel cualitativo y cuantitativo, se puede apreciar que ocurre lo mismo. Las

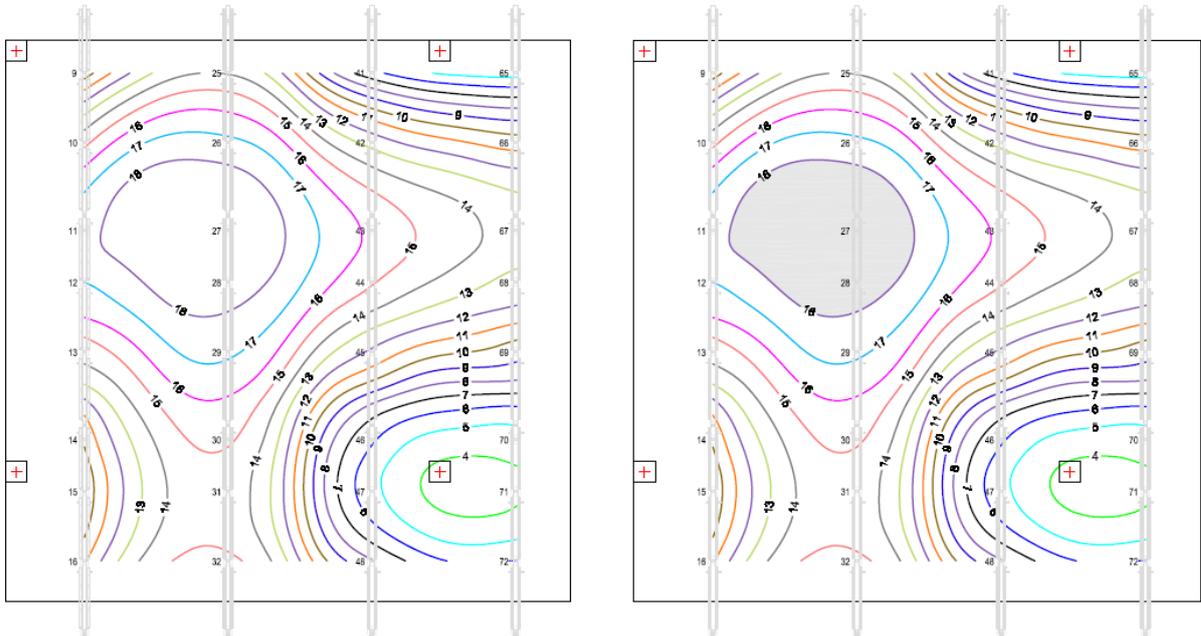


Fig. 4.5 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 18 KN.

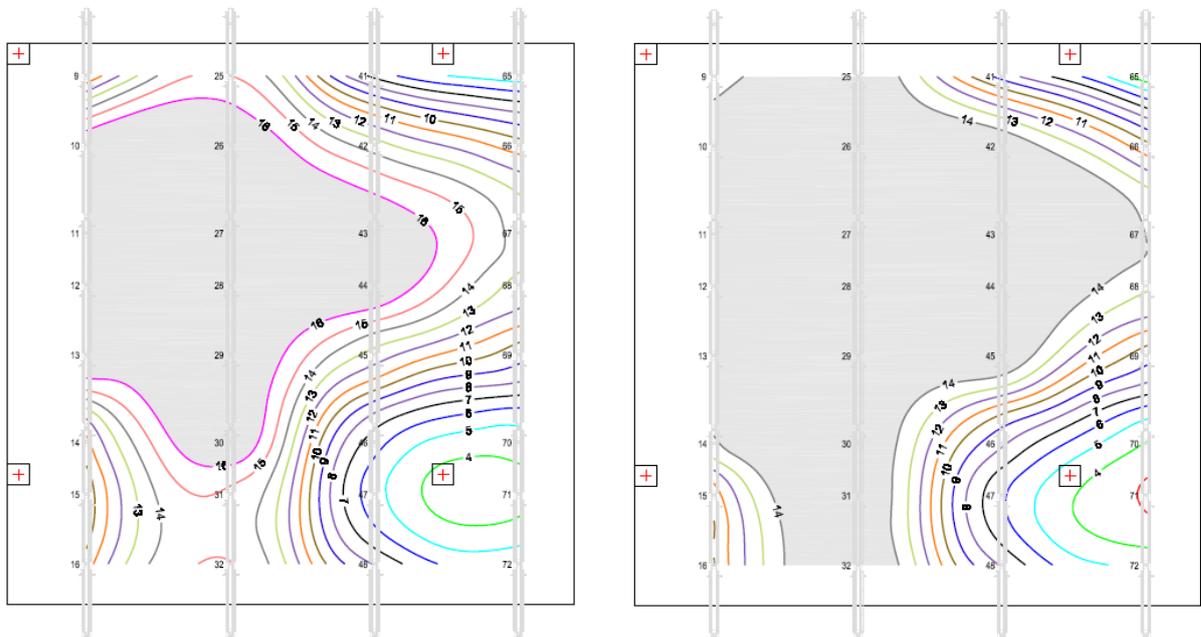


Fig. 4.6 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 16 KN y con nivel de plastificación de 14 KN.

diferencias existentes son debidas al fenómeno anteriormente explicado sobre la rigidez del forjado que en este caso es mayor debido a la mayor edad del hormigón. Puede observarse que, debido a ello, existen mayores coeficientes de forjado (por lo que menores coeficientes de puntales) que ocasiona que haya menos puntales con comportamiento plástico que en el caso anterior. De la misma forma, los momentos máximos se incrementan de forma despreciable por lo que tampoco se ocasiona la fisuración del forjado.

En las Figs. 4.7 y 4.8 de isolíneas de carga se puede observar para este caso, la redistribución de carga a través del forjado hacia los pilares, las cargas de los puntales, la zona en la que los puntales tienen comportamiento plástico debido al empleo del elemento de control de carga en puntales y como a medida que se restringe más la carga admitida por los puntales mayor es el número de éstos que pasan a tener un comportamiento plástico.

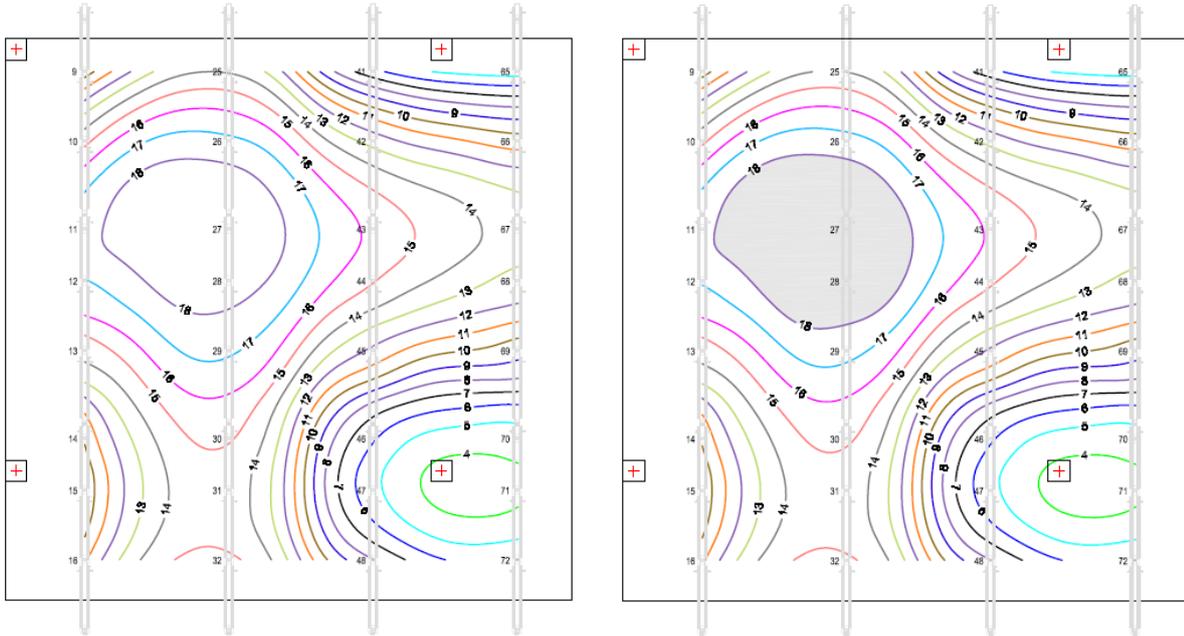


Fig. 4.7 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 18 KN.

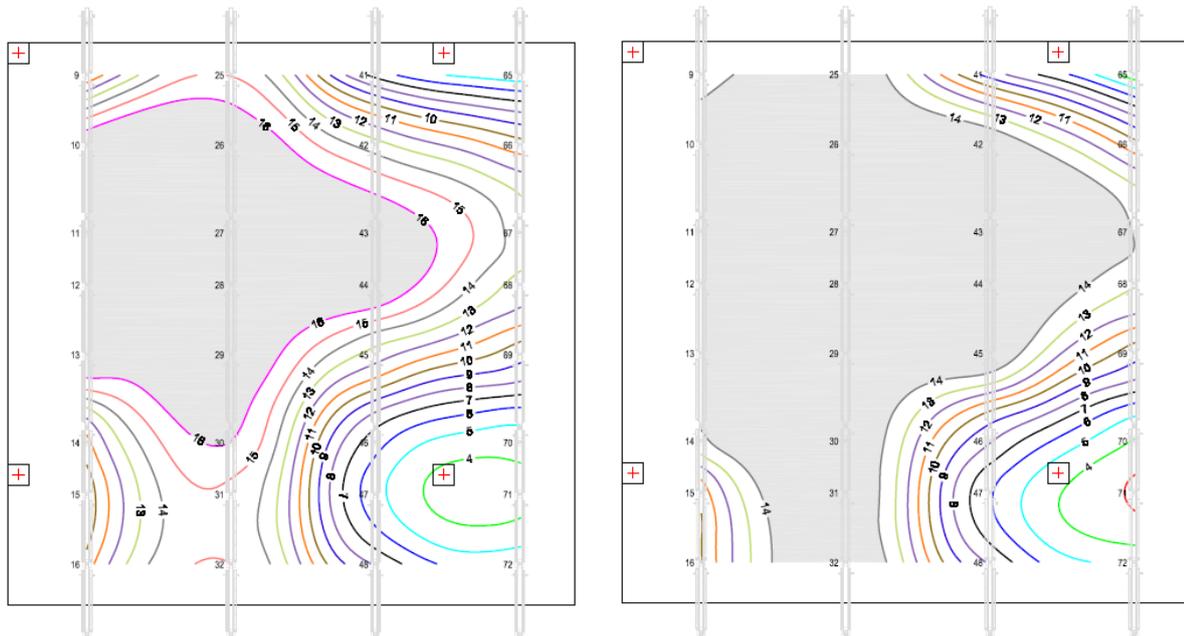


Fig. 4.8 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 16 KN y con nivel de plastificación de 14 KN.

Por último, centrándose en el caso en el que los intervalos entre pasos de carga se disminuyen en un día, se pueden obtener conclusiones similares. En cambio, como la rigidez del forjado, en este caso, es inferior debido a que el hormigón es más joven, los coeficientes de forjado disminuyen y las cargas en los puntales aumentan, por lo que se obtiene un número mayor de puntales con comportamiento plástico (Fig. 4.9 y 4.10). También es intuitivo que el valor del momento sea inferior.

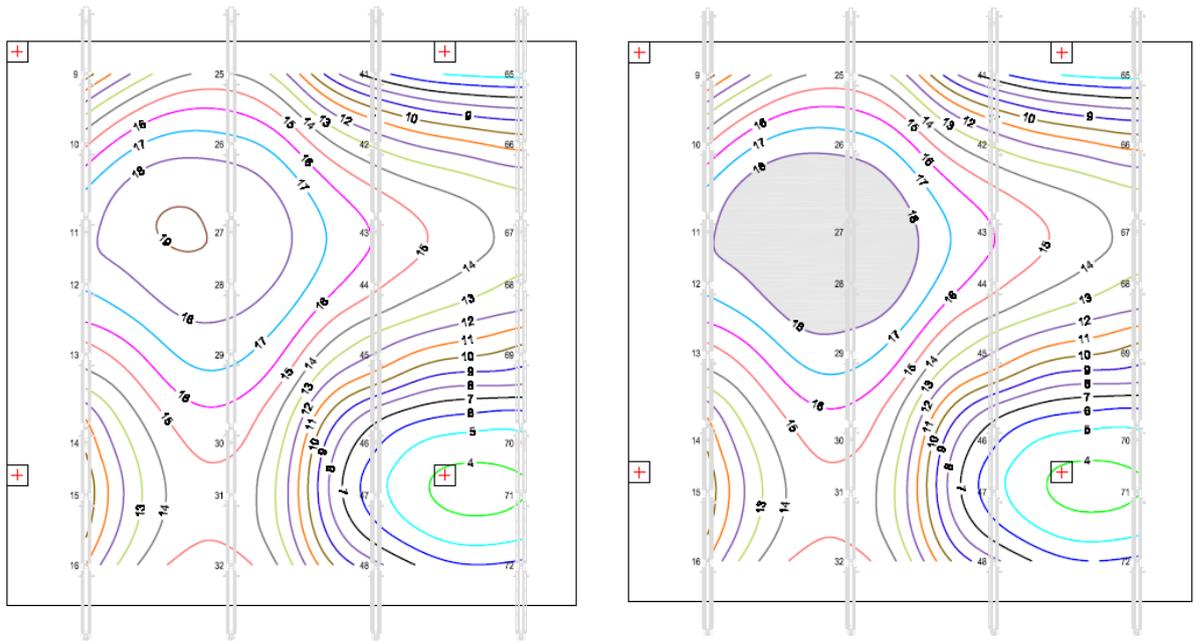


Fig. 4.9 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 18 KN.

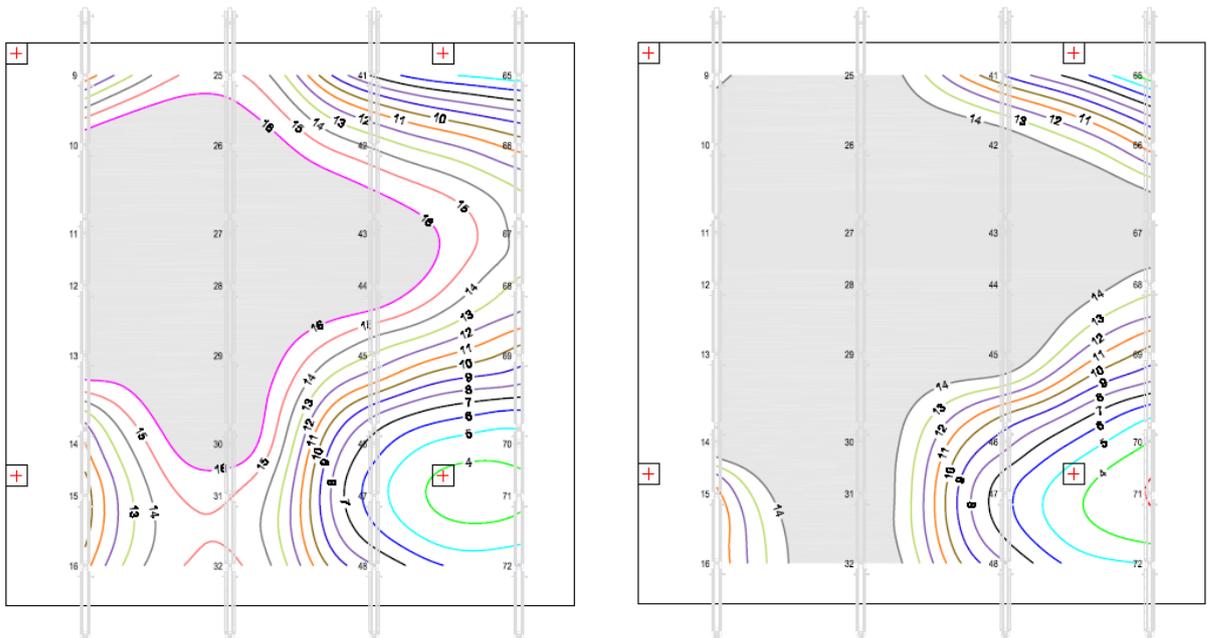


Fig. 4.10 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 20 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 16 KN y con nivel de plastificación de 14 KN.

4.4.3.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|     |               | Forjado 1 (7/9/5 días)    |              |                    |        |        |       |       |       |          |         | Forjado 2 |      |     |          |
|-----|---------------|---------------------------|--------------|--------------------|--------|--------|-------|-------|-------|----------|---------|-----------|------|-----|----------|
|     |               | Puntal más cargado        | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf     | Cp     | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) | M+CL      | M-AP | Mcr | ¿Fisura? |
| 0   | Modelo 2 E    | 27/37                     | 21372/6848.5 | 1.03_1.45          | 0.83/0 | 1.19/1 | 11.09 | 22.81 | 28.64 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        |
|     | Modelo a2 EP  | 27-28/37                  | 20000/6849.9 | 1.05_1.46          | 0.93/0 | 1.07/1 | 11.15 | 22.86 | 28.64 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo b2 EP  | 11-12,26-29,43/37         | 18000/6848.9 | 1.13_1.52          | 0.82/0 | 1.18/1 | 11.41 | 23.13 | 28.64 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo c2 EP  | 10-13,25-31,42-44/37      | 16000/6849.0 | 1.34_1.71          | 0.86/0 | 1.14/1 | 13.23 | 24.17 | 28.64 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo d2 EP  | 9-14,25-32,42-45,67-68/37 | 14000/6848.7 | 1.67_2.00          | 0.94/0 | 1.06/1 | 16.04 | 26.93 | 28.64 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo 6 E    | 27/37                     | 21324/6848.5 | 1.03_1.44          | 0.82/0 | 1.18/1 | 11.15 | 22.97 | 30.30 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        |
| + 1 | Modelo a6 EP  | 27-28/37                  | 20000/6848.8 | 1.04_1.45          | 0.82/0 | 1.18/1 | 11.20 | 23.02 | 30.30 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo b6 EP  | 11-12,26-29,43/37         | 18000/6848.7 | 1.12_1.51          | 0.83/0 | 1.17/1 | 11.51 | 23.23 | 30.30 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo c6 EP  | 10-13,25-31,42-44/37      | 16000/6848.9 | 1.33_1.70          | 0.86/0 | 1.14/1 | 13.23 | 24.27 | 30.30 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo d6 EP  | 9-14,25-32,42-45,67-68/37 | 14000/6848.6 | 1.65_1.98          | 0.94/0 | 1.06/1 | 16.04 | 27.03 | 30.30 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo 10 E   | 27/37                     | 21552/6838.4 | 1.04_1.46          | 0.79/0 | 1.20/1 | 10.83 | 22.40 | 26.16 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        |
|     | Modelo a10 EP | 27-28/37                  | 20000/6848.9 | 1.06_1.47          | 0.80/0 | 1.20/1 | 10.89 | 22.40 | 26.16 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
| - 1 | Modelo b10 EP | 11-12,26-29,43/37         | 18000/6848.8 | 1.15_1.54          | 0.81/0 | 1.19/1 | 11.20 | 22.71 | 26.16 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo c10 EP | 10-13,25-32,42-45/37      | 16000/6848.9 | 1.39_1.75          | 0.85/0 | 1.15/1 | 13.18 | 23.91 | 26.16 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |
|     | Modelo d10 EP | 9-14,25-32,42-45,67-68/37 | 14000/6848.6 | 1.74_2.06          | 0.93/0 | 1.07/1 | 16.04 | 26.82 | 26.16 | SI       | 0.017   | -         | -    | -   | -        |

Tabla 4.11 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 3.

En la Tabla 4.11, se puede observar el registro de resultados para este proceso de carga y para un canto de 25 cm. En este caso, al tener mayor carga aplicada porque el peso propio de la estructura es mayor, aparecen mayores cargas máximas, mayores esfuerzos, mayores flechas y más puntales con comportamiento plástico.

Comparando estos resultados con los del anterior canto (20 cm.), se puede observar que sin variar el sistema de apuntalamiento, al incrementar la carga aplicada, aumenta la proporción de carga asumida por el forjado pasando del 60-65% al 80-85%, aumentando por tanto, los esfuerzos en el forjado y disminuyendo la carga asumida por el sistema de apuntalamiento en la misma proporción. Por ello, las cargas máximas en los puntales aunque se incrementan debido al mayor peso propio, no lo hacen de forma excesiva puesto que los puntales absorben menos proporción de carga.

En este caso, en cuanto a la carga en los puntales, debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga, la carga máxima varía, aumentando si los intervalos disminuyen y viceversa como ya se ha explicado anteriormente. Se puede apreciar en los modelos con comportamiento elástico en los puntales puesto que en el resto la carga viene condicionada por el nivel de plastificación. Además, las máximas flechas aumentan o disminuyen del mismo modo debido también al mismo fenómeno.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. También se puede observar que no existe fisuración en ningún modelo (salvo en uno) debido a que los momentos existentes son inferiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). La fisuración existente es puntual y muy reducida, casi despreciable y muy inferior al valor límite impuesto por el tipo de ambiente.

Respecto a los valores de la segunda planta, como es una planta recién hormigonada, las cargas en los puntales no varían sustancialmente puesto que cada puntal resiste aproximadamente la carga de su área tributaria. Las máximas flechas sí se ven modificadas debido al cambio que tienen las flechas del primer forjado.

En primer lugar, si centramos la atención en el caso en el que se consideran los mismos intervalos entre pasos de carga que en el edificio experimental (0), se puede observar que a medida que se imponen menores niveles de plastificación, mayor es el número de puntales que pasan a tener un comportamiento plástico debido al elemento de control de carga puesto que existe una redistribución de cargas a través del forjado hacia los pilares como ya se había mencionado anteriormente. De forma claramente intuitiva, en las Figs. 4.11, 4.12 y 4.13 se pueden ver de forma cualitativa las cargas que recibirán los puntales, la ubicación de éstos y la zona en la que los puntales que aparezcan en ella aparecerán con comportamiento plástico debido al elemento de control de carga.

Se puede apreciar, además, que debido a imponer niveles de carga en puntales más restrictivos, se consigue una redistribución clara de cargas a través del forjado hacia los pilares sin un aumento considerable ni del coeficiente de forjado ni de las máximas flechas. De forma cuantitativa, para el caso más restrictivo, disminuyendo la carga máxima que recibe un puntal en aproximadamente un 35 % solo aumenta el momento máximo en un 18 % y la flecha máxima en 0'6 mm., siendo estos valores admisibles y no ocasionando fisuración en el forjado a causa de la redistribución de cargas.

*Influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales*

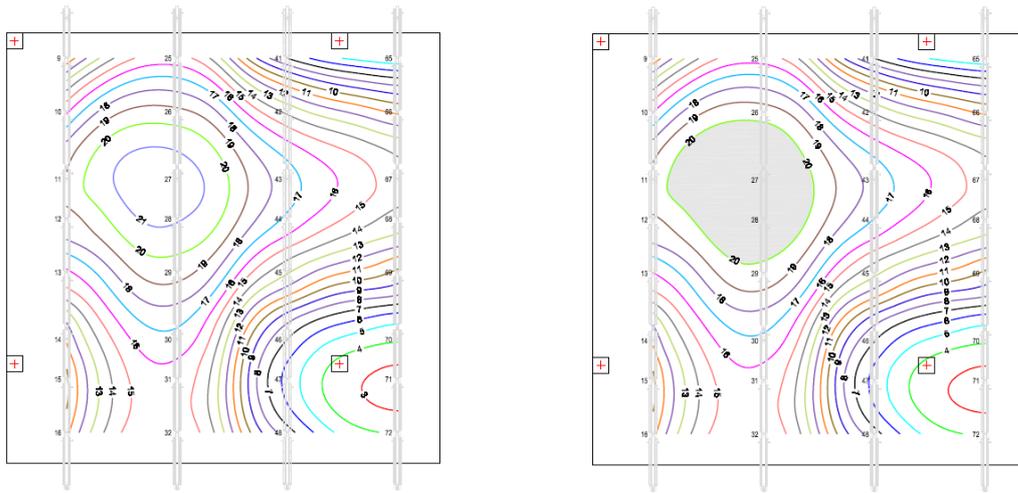


Fig. 4.11 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

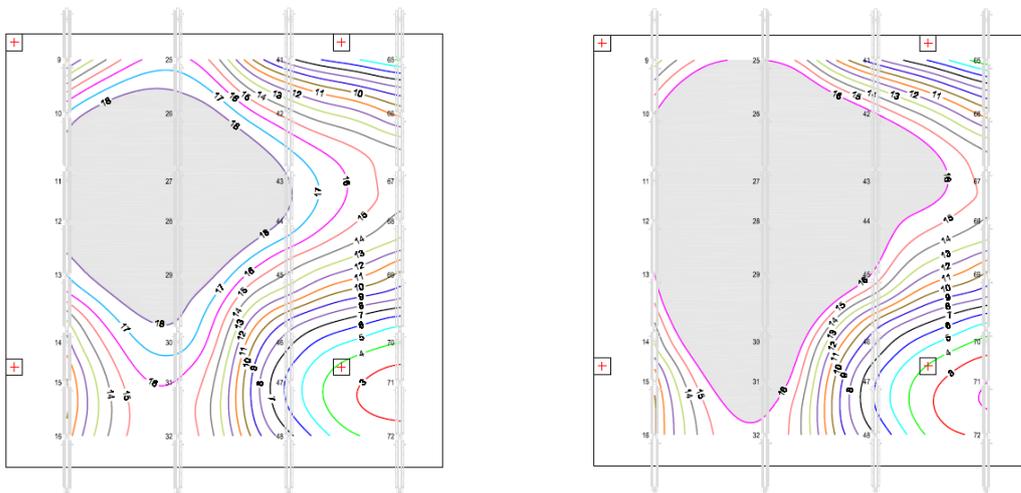


Fig. 4.12 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

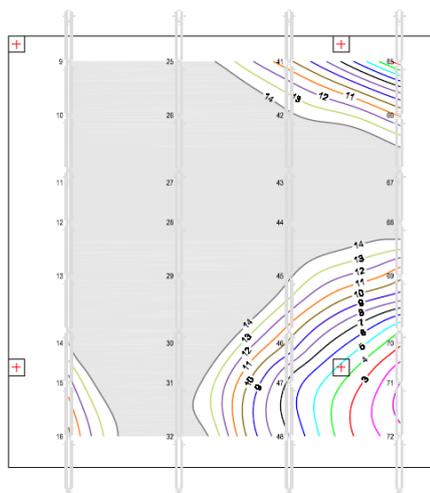


Fig. 4.13 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

En segundo lugar, si se presta atención al caso en el que los intervalos entre pasos de carga se incrementan en un día, a nivel cualitativo y cuantitativo, se puede apreciar que ocurre lo mismo. Las diferencias existentes son debidas al fenómeno anteriormente explicado sobre la rigidez del forjado que en este caso es mayor debido a la mayor edad del hormigón. Puede observarse que, debido a ello, existen mayores coeficientes de forjado (por lo que menores coeficientes de puntales) que ocasiona que haya menos puntales con comportamiento plástico que en el caso anterior. De la misma forma, los momentos máximos se incrementan de forma despreciable por lo que tampoco se ocasiona la fisuración del forjado.

En las Fig. 4.14, 4.15 y 4.16 de isolíneas de carga se puede observar para este caso, la redistribución de carga a través del forjado hacia los pilares, las cargas de los puntales, la zona en la que los puntales tienen comportamiento plástico debido al empleo del elemento de control de carga en puntales y como a medida que se restringe más la carga admitida por los puntales mayor es el número de éstos que pasan a tener un comportamiento plástico.

Por último, centrándose en el caso en el que los intervalos entre pasos de carga se disminuyen en un día, se pueden obtener conclusiones similares. En cambio, como la rigidez del forjado, en este caso, es inferior debido a que el hormigón es más joven, los coeficientes de forjado disminuyen y las cargas en los puntales aumentan, por lo que se obtienen un número mayor de puntales con comportamiento plástico (Fig. 4.17, 4.18 y 4.19). También es intuitivo que el valor de los momentos sea inferior.

En este caso, existe un modelo (Modelo d10 con nivel de plastificación 14 KN) en el que aparece fisuración. Es debido a, entre otras razones, que se está imponiendo un nivel de plastificación en puntales que ocasiona mayor deformación y que es más exigente para el forjado; que la carga aplicada en este caso es mayor por el mayor peso propio respecto al forjado con canto 20 cm.; y que el hormigón es más joven respecto a los demás intervalos entre pasos de carga considerados por lo que su resistencia es menor.

Aún así, si se observa el momento que aparece y ocasiona la fisuración ( $26'82 \text{ KN}\cdot\text{m}$ ), es muy cercano al que produce la fisuración ( $M_{cr} = 26'16$ ) y se encuentra en la zona de apoyos en la que la ley de momentos varía considerablemente de un punto a otro. Por ello, se puede afirmar, que la fisuración, si existe, es muy reducida y localizada casi de forma puntual en la zona del apoyo interior. La abertura de fisura mostrada,  $0'017 \text{ mm.}$ , es muy inferior al límite impuesto por el tipo de ambiente existente en la zona del edificio experimental por lo que no ocasionaría ningún tipo de problema.

*Influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales*

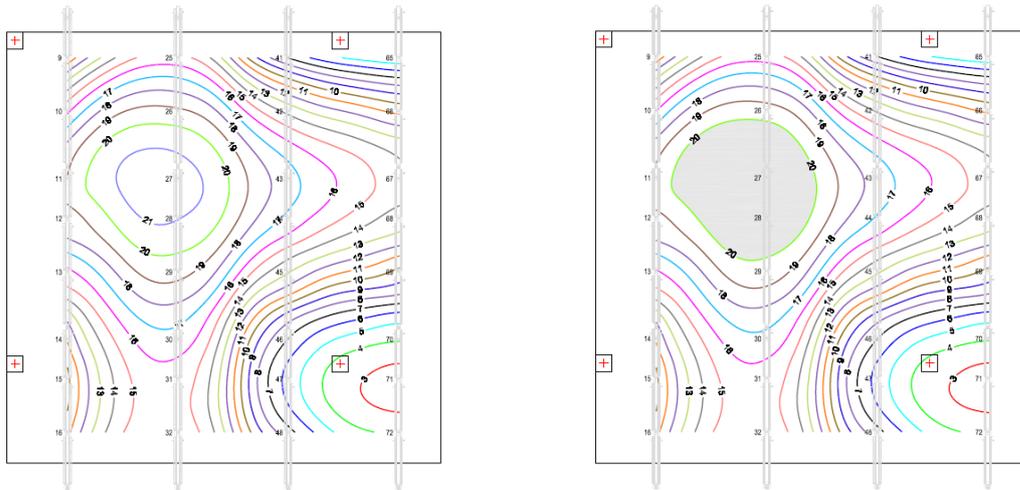


Fig. 4.14 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

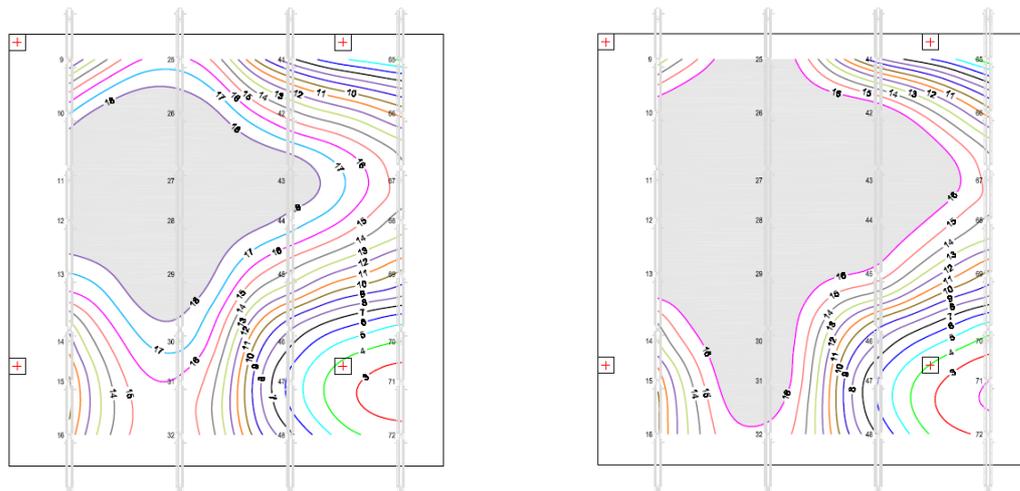


Fig. 4.15 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

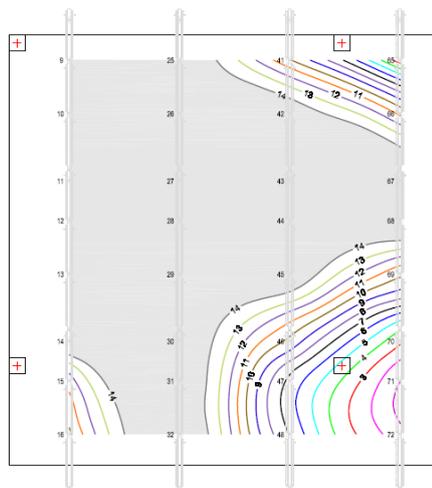


Fig. 4.16 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

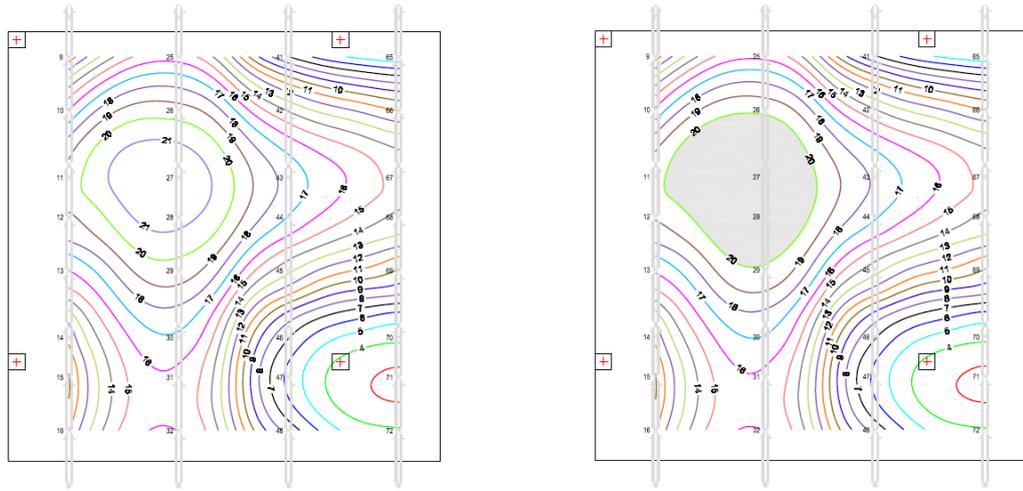


Fig. 4.17 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

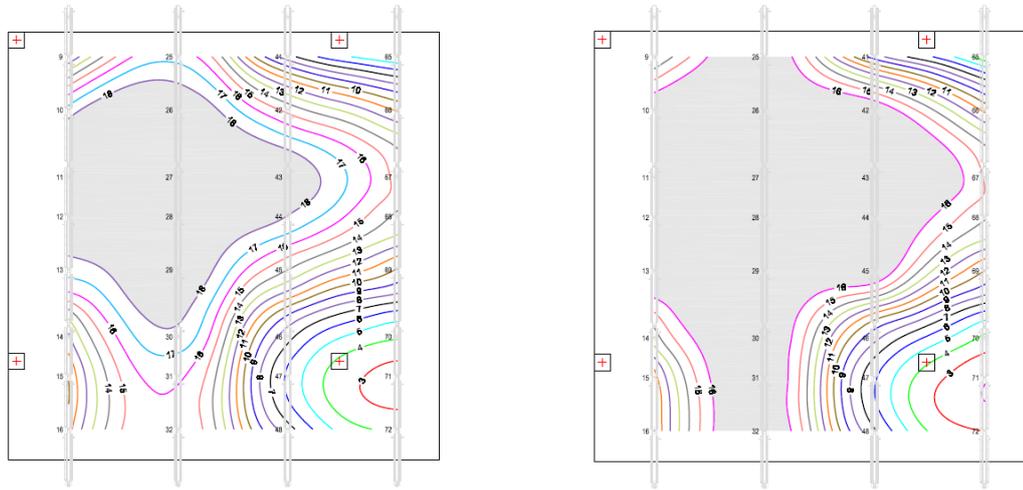


Fig. 4.18 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

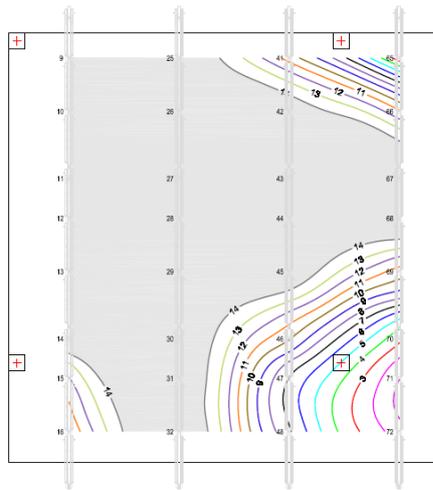


Fig. 4.19 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 25 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

4.4.3.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|    |               | Forjado 1 (7/9/5 días)    |              |                    |        |           |       |       |       |          |         | Forjado 2 |      |     |          |         |
|----|---------------|---------------------------|--------------|--------------------|--------|-----------|-------|-------|-------|----------|---------|-----------|------|-----|----------|---------|
|    |               | Puntal más cargado        | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf     | Cp        | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) | M+CL      | M-AP | Mcr | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 3 E    | 27/37                     | 22598/8220.3 | 1.08_1.59          | 0.99/0 | 1.01/1.00 | 18.15 | 33.53 | 39.71 | NO       | -       | 0         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo a3 EP  | 11-26-29/37               | 20000/8220.5 | 1.12_1.61          | 1.00/0 | 1.00/1.00 | 18.23 | 33.68 | 39.71 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo b3 EP  | 10-12-26-30-43-44/37      | 18000/8220.4 | 1.20_1.66          | 1.01/0 | 0.99/1.00 | 18.98 | 34.13 | 39.71 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo c3 EP  | 10-13-25-31-42-45/37      | 16000/8220.4 | 1.37_1.80          | 1.06/0 | 0.94/1.00 | 21.23 | 35.48 | 39.71 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo d3 EP  | 9-14-25-32-42-45-67-68/37 | 14000/8220.2 | 1.58_1.99          | 1.13/0 | 0.87/1.00 | 24.23 | 38.03 | 39.71 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
| +1 | Modelo 7 E    | 27/37                     | 22522/8220.2 | 1.08_1.58          | 1.00/0 | 1.00/1.00 | 18.23 | 33.68 | 42.02 | NO       | -       | 0         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo a7 EP  | 11-26-29/37               | 20000/8220.4 | 1.11_1.61          | 1.00/0 | 1.00/1.00 | 18.38 | 33.83 | 42.02 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo b7 EP  | 11-12-26-30-43-44/37      | 18000/8220.3 | 1.19_1.66          | 1.02/0 | 0.98/1.00 | 19.05 | 34.28 | 42.02 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo c7 EP  | 10-13-25-31-42-45/37      | 16000/8220.4 | 1.35_1.79          | 1.06/0 | 0.94/1.00 | 21.23 | 35.55 | 42.02 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo d7 EP  | 9-14-25-32-42-45-67-68/37 | 14000/8220.2 | 1.56_1.97          | 1.13/0 | 0.87/1.00 | 24.23 | 38.03 | 42.02 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
| -1 | Modelo 11 E   | 27/37                     | 22879/8220.2 | 1.10_1.60          | 0.98/0 | 1.02/1.00 | 17.85 | 33.00 | 36.27 | NO       | -       | 0         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo a11 EP | 11-12-26-29/37            | 20000/8220.4 | 1.14_1.63          | 0.98/0 | 1.02/1.00 | 17.93 | 33.15 | 36.27 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo b11 EP | 10-13-26-30-43-44/37      | 18000/8220.4 | 1.23_1.69          | 1.00/0 | 1.00/1.00 | 18.83 | 33.75 | 36.27 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo c11 EP | 10-13-25-31-42-45/37      | 16000/8220.4 | 1.42_1.85          | 1.05/0 | 0.95/1.00 | 21.15 | 35.18 | 36.27 | NO       | -       | -         | -    | -   | -        |         |
|    | Modelo d11 EP | 9-14-25-32-42-45-67-68/37 | 14000/8220.2 | 1.64_2.04          | 1.13/0 | 0.87/1.00 | 24.15 | 37.88 | 36.27 | SI       | 0.020   | -         | -    | -   | -        |         |

Tabla 4.12 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 3.

En la Tabla 4.12, se puede observar el registro de resultados para este proceso de carga y para un canto de 30 cm. En este caso, al tener mayor carga aplicada porque el peso propio de la estructura es mayor, aparecen mayores cargas máximas, mayores esfuerzos, mayores flechas y más puntales con comportamiento plástico.

Comparando estos resultados con los de los anteriores cantos (20 y 25 cm.), se puede observar que sin variar el sistema de apuntalamiento, al incrementar la carga aplicada, aumenta la proporción de carga asumida por el forjado pasando del 60-65% para el forjado de 20 cm. al 80-85% para el forjado de 25 cm. hasta el 100-110% para el forjado en cuestión, aumentando por tanto, los esfuerzos en el forjado y disminuyendo la carga asumida por el sistema de apuntalamiento en la misma proporción. Por ello, las cargas máximas en los puntales aunque se incrementan debido al mayor peso propio, no lo hacen de forma excesiva puesto que el sistema de apuntalamiento absorbe menos carga.

En este caso, en cuanto a la carga en los puntales, debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga, la carga máxima varía, aumentando si los intervalos disminuyen y viceversa como ya se ha explicado anteriormente. Se puede apreciar en los modelos con comportamiento elástico en los puntales puesto que en el resto la carga viene condicionada por el nivel de plastificación. Además, las máximas flechas aumentan o disminuyen del mismo modo debido también al mismo fenómeno.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. También se puede observar que no existe fisuración en ningún modelo salvo en uno debido a que los momentos existentes son inferiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). La fisuración existente es puntual y muy reducida, casi despreciable y muy inferior al valor límite impuesto por el tipo de ambiente.

Respecto a los valores de la segunda planta, como es una planta recién hormigonada, las cargas en los puntales no varían sustancialmente puesto que cada puntal resiste aproximadamente la carga de su área tributaria. Las máximas flechas sí se ven modificadas debido al cambio que tienen las flechas del primer forjado.

En primer lugar, si centramos la atención en el caso en el que se consideran los mismos intervalos entre pasos de carga que en el edificio experimental (0), se puede observar que a medida que se imponen menores niveles de plastificación, mayor es el número de puntales que pasan a tener un comportamiento plástico debido al elemento de control de carga puesto que existe una redistribución de cargas a través del forjado hacia los pilares como ya se había mencionado anteriormente. De forma claramente intuitiva, en las Fig. 4.20, 4.21 y 4.22 se pueden ver de forma cualitativa las cargas que recibirán los puntales, la ubicación de éstos y la zona en la que los puntales que aparezcan en ella aparecerán con comportamiento plástico debido al elemento de control de carga.

Se puede apreciar, además, que debido a imponer niveles de carga en puntales más restrictivos, se consigue una redistribución clara de cargas a través del forjado hacia los pilares sin un aumento considerable ni del coeficiente de forjado ni de las máximas flechas.

*Influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales*

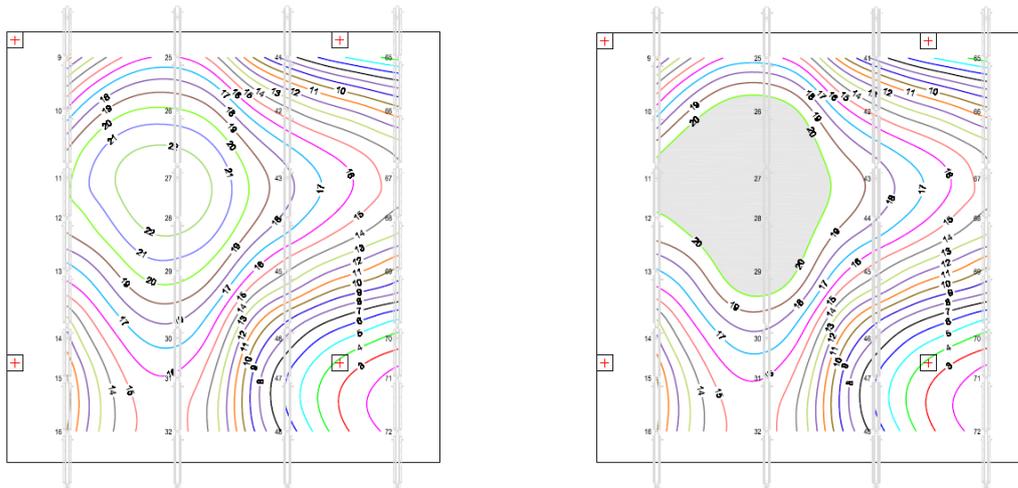


Fig. 4.20 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

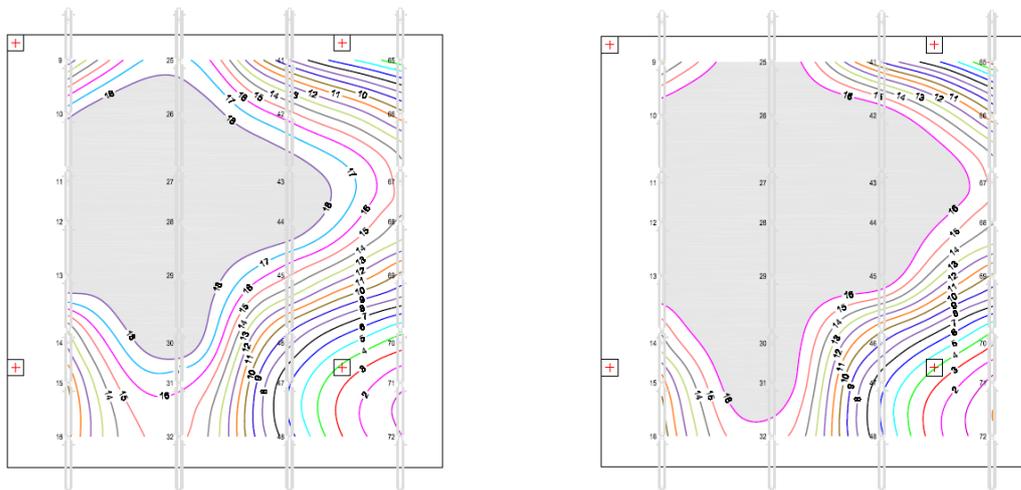


Fig. 4.21 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

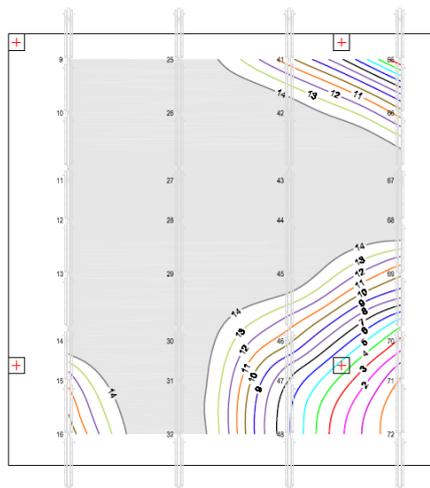


Fig. 4.22 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

De forma cuantitativa, para el caso más restrictivo, disminuyendo la carga máxima que recibe un puntal en aproximadamente un 40 % solo aumenta el momento máximo en un 13,5 % y la flecha máxima en 0'5 mm., siendo estos valores admisibles y no ocasionando fisuración en el forjado a causa de la redistribución de cargas. Se puede apreciar como ante una reducción mayor de la máxima carga que recibe un puntal los incrementos de momentos y flechas son inferiores que en los anteriores casos (cantos de 20 y 25 cm.) debido a la influencia que tiene el canto del forjado.

En segundo lugar, si se presta atención al caso en el que los intervalos entre pasos de carga se incrementan en un día, a nivel cualitativo y cuantitativo, se puede apreciar que ocurre lo mismo. Las diferencias existentes son debidas al fenómeno anteriormente explicado sobre la rigidez del forjado que en este caso es mayor debido a la mayor edad del hormigón. Puede observarse que, debido a ello, existen mayores coeficientes de forjado (por lo que menores coeficientes de puntales) que ocasiona que haya menos puntales con comportamiento plástico que en el caso anterior. De la misma forma, los momentos máximos se incrementan de forma despreciable por lo que tampoco se ocasiona la fisuración del forjado. La influencia de este factor se puede considerar mínima.

En las Fig. 4.23, 4.24 y 4.25 de isóneas de carga se puede observar para este caso, la redistribución de carga a través del forjado hacia los pilares, las cargas de los puntales, la zona en la que los puntales tienen comportamiento plástico debido al empleo del elemento de control de carga en puntales y como a medida que se restringe más la carga admitida por los puntales mayor es el número de éstos que pasan a tener un comportamiento plástico.

Por último, centrándose en el caso en el que los intervalos entre pasos de carga se disminuyen en un día, se pueden obtener conclusiones similares. En cambio, como la rigidez del forjado, en este caso, es inferior debido a que el hormigón es más joven, los coeficientes de forjado disminuyen y las cargas en los puntales aumentan, por lo que se obtienen un número mayor de puntales con comportamiento plástico (Fig. 4.26, 4.27 y 4.28). También es intuitivo que el valor de los momentos sea inferior.

En este caso, existe un modelo (Modelo d11 con nivel de plastificación 14 KN) en el que aparece fisuración. Es debido a, entre otras razones, que se está imponiendo un nivel de plastificación en puntales que ocasiona mayor deformación y que es más exigente para el forjado; que la carga aplicada en este caso es mayor por el mayor peso propio respecto al forjado con canto 20 cm. y al forjado con canto 25 cm.; y que el hormigón es más joven respecto a los demás intervalos entre pasos de carga considerados por lo que su resistencia es menor.

Aún así, si se observa el momento que ocasiona la fisuración (37,88 KN\*m), es muy cercano al que produce la fisuración ( $M_{cr} = 36,27$  KN\*m) y se encuentra en la zona de apoyos en la que la ley de momentos varía considerablemente de un punto a otro. Por ello, se puede afirmar, que la fisuración, si existe, es muy reducida y localizada casi de forma puntual en la zona del apoyo interior. La abertura de fisura mostrada, 0'020 mm., es muy inferior al límite impuesto por el tipo de ambiente existente en la zona del edificio experimental por lo que no ocasionaría ningún tipo de problema.

*Influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales*

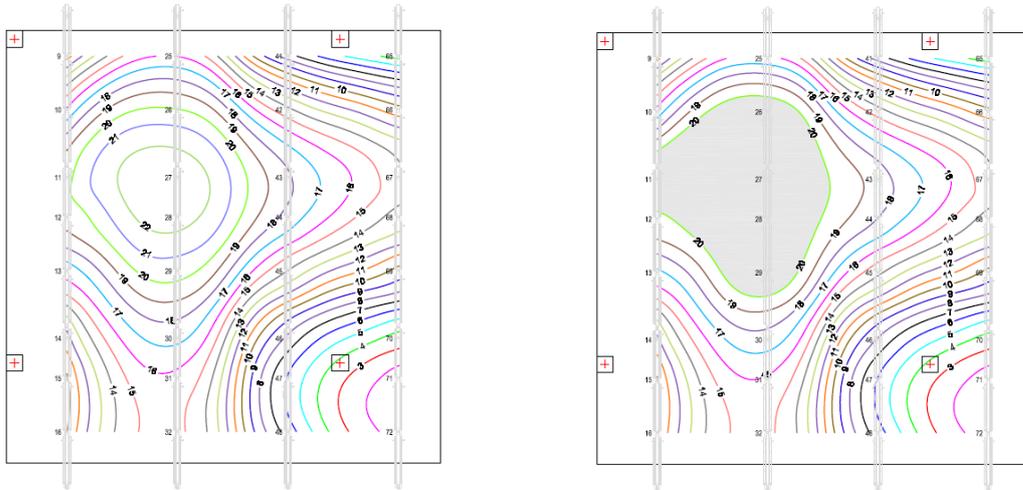


Fig. 4.23 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

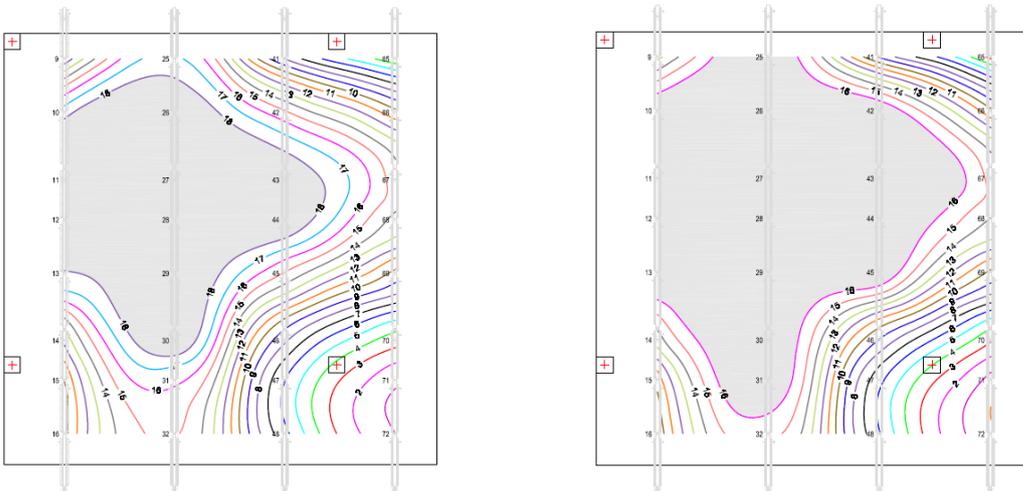


Fig. 4.24 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

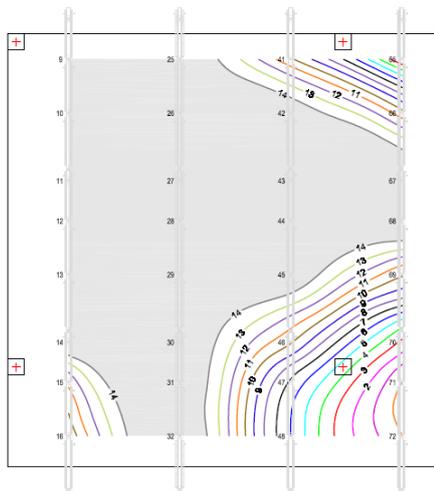


Fig. 4.25 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

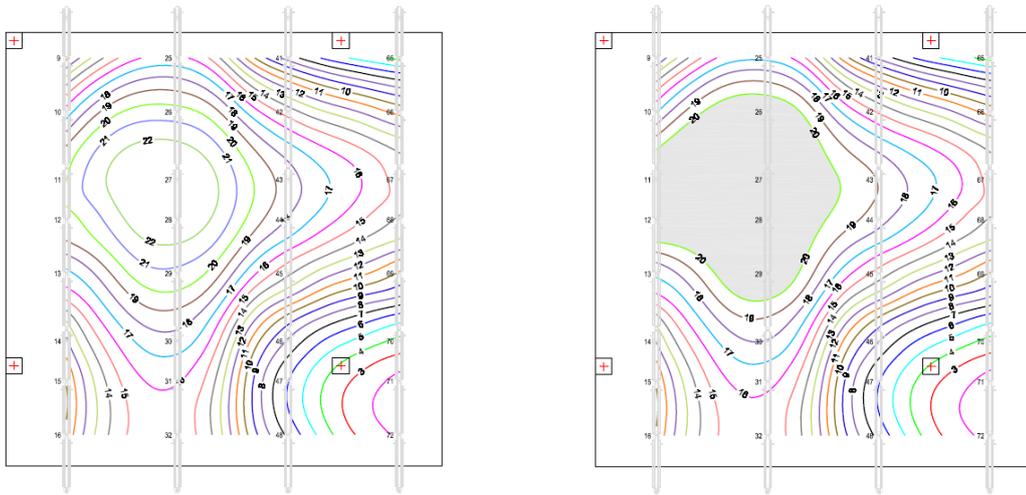


Fig. 4.26 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

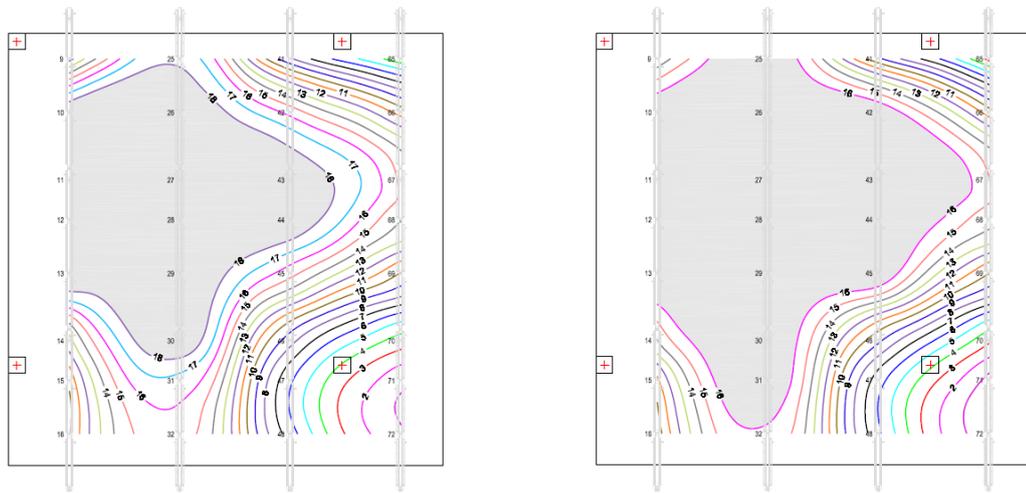


Fig. 4.27 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

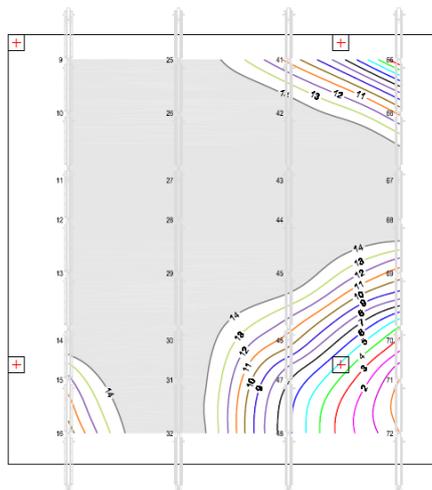


Fig. 4.28 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 30 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

4.4.3.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp        | Forjado 1 (7/9/5 días) |       |       |          |         | Forjado 2 |      |     |          |         |
|----|--------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|------------------------|-------|-------|----------|---------|-----------|------|-----|----------|---------|
|    |                    |              |                    |           |           | M+Cl                   | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) | M+Cl      | M-AP | Mcr | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 4 E         | 22830/9591.5 | 1.09_1.69          | 1.15/0.00 | 0.85/1.00 | 26.13                  | 43.90 | 51.98 | NO       | -       | 0         | 0    | -   | -        |         |
|    | Modelo a4 EP       | 20000/9591.6 | 1.12_1.71          | 1.15/0.00 | 0.85/1.00 | 26.34                  | 44.10 | 51.98 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo b4 EP       | 18000/9591.6 | 1.18_1.75          | 1.17/0.00 | 0.83/1.00 | 27.46                  | 44.51 | 51.98 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo c4 EP       | 16000/9591.5 | 1.30_1.83          | 1.21/0.00 | 0.79/1.00 | 29.91                  | 45.63 | 51.98 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo d4 EP       | 14000/9591.4 | 1.44_1.92          | 1.27/0.00 | 0.73/1.00 | 33.08                  | 47.67 | 51.98 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
| +1 | Modelo 8 E         | 22732/9591.4 | 1.09_1.68          | 1.15/0.00 | 0.85/1.00 | 26.24                  | 44.10 | 55.00 | NO       | -       | 0         | 0    | -   |          |         |
|    | Modelo a8 EP       | 20000/9591.5 | 1.12_1.70          | 1.16/0.00 | 0.84/1.00 | 26.44                  | 44.30 | 55.00 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo b8 EP       | 18000/9591.5 | 1.17_1.74          | 1.17/0.00 | 0.83/1.00 | 27.46                  | 44.71 | 55.00 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo c8 EP       | 16000/9591.5 | 1.28_1.82          | 1.21/0.00 | 0.79/1.00 | 29.91                  | 45.73 | 55.00 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo d8 EP       | 14000/9591.4 | 1.42_1.92          | 1.27/0.00 | 0.73/1.00 | 33.08                  | 47.67 | 55.00 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
| -1 | Modelo 12 E        | 23192/9591.4 | 1.11_1.70          | 1.13/0.00 | 0.87/1.00 | 25.73                  | 43.49 | 47.47 | NO       | -       | 0         | 0    | -   |          |         |
|    | Modelo a12 EP      | 20000/9591.5 | 1.15_1.73          | 1.14/0.00 | 0.86/1.00 | 26.03                  | 43.69 | 47.47 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo b12 EP      | 18000/9591.5 | 1.22_1.78          | 1.16/0.00 | 0.84/1.00 | 27.26                  | 44.20 | 47.47 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo c12 EP      | 16000/9591.5 | 1.34_1.86          | 1.20/0.00 | 0.80/1.00 | 29.81                  | 45.43 | 47.47 | NO       | -       | -         | -    | -   |          |         |
|    | Modelo d12 EP      | 14000/9591.4 | 1.49_1.98          | 1.26/0.00 | 0.74/1.00 | 32.87                  | 47.67 | 47.47 | SI       | 0.020   | -         | -    | -   |          |         |

Tabla 4.13 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 3.

En la Tabla 4.13, se puede observar el registro de resultados para este proceso de carga y para un canto de 35 cm. En este caso, al tener mayor carga aplicada porque el peso propio de la estructura es mayor, aparecen mayores cargas máximas, mayores esfuerzos, mayores flechas y más puntales con comportamiento plástico.

Comparando estos resultados con los de los anteriores cantos (20, 25 y 30 cm.), se puede observar que sin variar el sistema de apuntalamiento, al incrementar la carga aplicada, aumenta la proporción de carga asumida por el forjado pasando del 60-65% para el forjado de 20 cm.; 80-85% para el forjado de 25 cm.; 100-110% para el forjado de 30 cm.; hasta el 115-125% para el forjado en cuestión, aumentando por tanto, los esfuerzos en el forjado y disminuyendo la carga asumida por el sistema de apuntalamiento en la misma proporción. Por ello, las cargas máximas en los puntales aunque se incrementan debido al mayor peso propio, no lo hacen de forma excesiva puesto que el sistema de apuntalamiento absorbe menos proporción de carga.

En este caso, en cuanto a la carga en los puntales, debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga, la carga máxima varía, aumentando si los intervalos disminuyen y viceversa como ya se ha explicado anteriormente. Se puede apreciar en los modelos con comportamiento elástico en los puntales puesto que en el resto la carga viene condicionada por el nivel de plastificación. Además, las máximas flechas aumentan o disminuyen del mismo modo debido también al mismo fenómeno.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. También se puede observar que no existe fisuración en ningún modelo salvo en uno debido a que los momentos existentes son inferiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). La fisuración existente es puntual y muy reducida, casi despreciable y muy inferior al valor límite impuesto por el tipo de ambiente.

Respecto a los valores de la segunda planta, como es una planta recién hormigonada, las cargas en los puntales no varían sustancialmente puesto que cada puntal resiste aproximadamente la carga de su área tributaria. Las máximas flechas sí se ven modificadas debido al cambio que tienen las flechas del primer forjado.

En primer lugar, si centramos la atención en el caso en el que se consideran los mismos intervalos entre pasos de carga que en el edificio experimental (0), se puede observar que a medida que se imponen menores niveles de plastificación, mayor es el número de puntales que pasan a tener un comportamiento plástico debido al elemento de control de carga puesto que existe una redistribución de cargas a través del forjado hacia los pilares como ya se había mencionado anteriormente. De forma claramente intuitiva, en las Fig. 4.29, 4.30 y 4.31 se pueden ver de forma cualitativa las cargas que recibirán los puntales, la ubicación de éstos y la zona en la que los puntales que aparezcan en ella aparecerán con comportamiento plástico debido al elemento de control de carga.

Se puede apreciar, además, que debido a imponer niveles de carga en puntales más restrictivos, se consigue una redistribución clara de cargas a través del forjado hacia los pilares sin un aumento considerable ni del coeficiente de forjado ni de las máximas flechas.

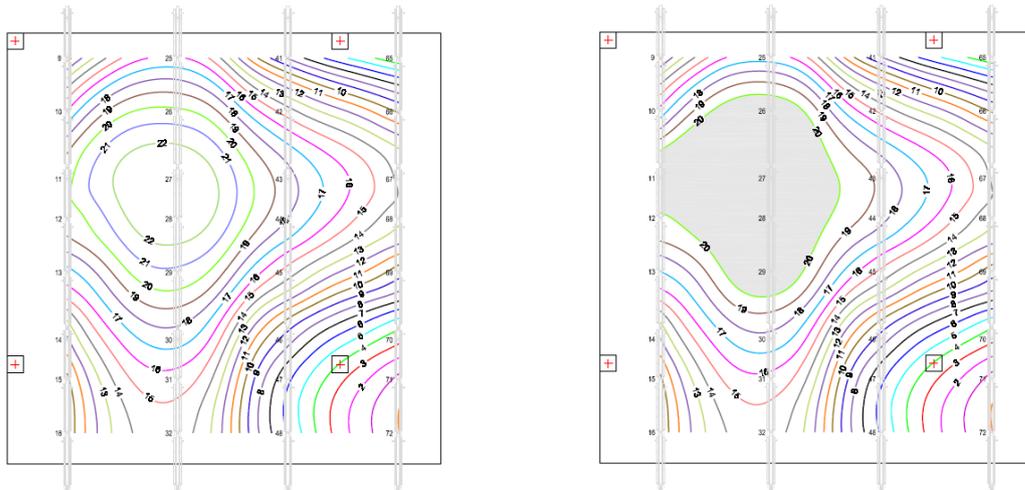


Fig. 4.29 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

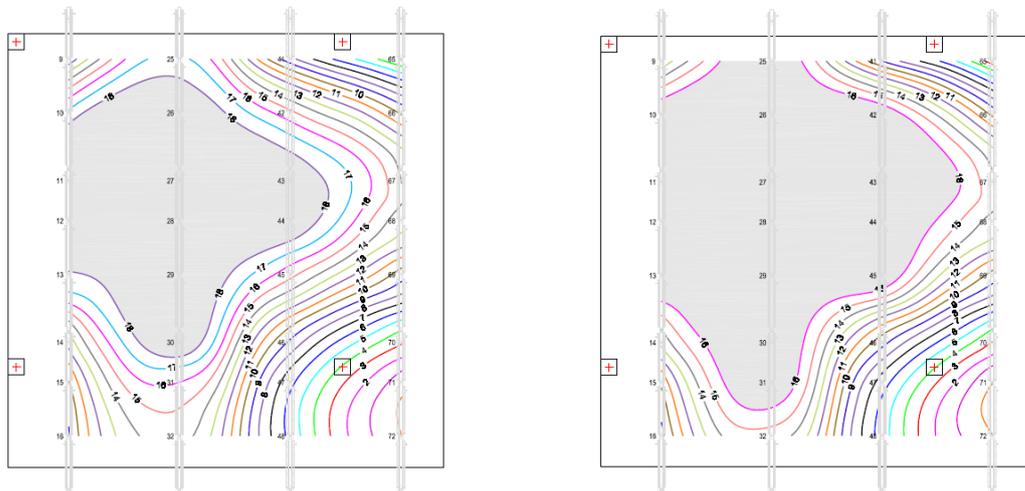


Fig. 4.30 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

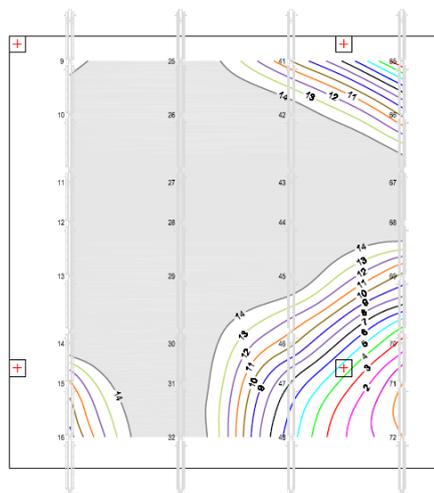


Fig. 4.31 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga neutros. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

De forma cuantitativa, para el caso más restrictivo, disminuyendo la carga máxima que recibe un puntal en aproximadamente un 40 % solo aumenta el momento máximo en un 9 % y la flecha máxima en 0'35 mm., siendo estos valores admisibles y no ocasionando fisuración en el forjado a causa de la redistribución de cargas. Se puede apreciar como ante una reducción mayor de la máxima carga que recibe un puntal los incrementos de momentos y flechas son inferiores que en los anteriores casos (cantos de 20, 25 y 30 cm.) debido a la influencia que tiene el canto del forjado.

En segundo lugar, si se presta atención al caso en el que los intervalos entre pasos de carga se incrementan en un día, a nivel cualitativo y cuantitativo, se puede apreciar que ocurre lo mismo. Las diferencias existentes son debidas al fenómeno anteriormente explicado sobre la rigidez del forjado que en este caso es mayor debido a la mayor edad del hormigón. Puede observarse que, debido a ello, existen mayores coeficientes de forjado (por lo que menores coeficientes de puntales) que ocasiona que haya menos puntales con comportamiento plástico que en el caso anterior. De la misma forma, los momentos máximos se incrementan de forma despreciable por lo que tampoco se ocasiona la fisuración del forjado. La influencia de este factor se puede considerar mínima.

En las Fig. 4.32, 4.33 y 4.34 de isóneas de carga se puede observar para este caso, la redistribución de carga a través del forjado hacia los pilares, las cargas de los puntales, la zona en la que los puntales tienen comportamiento plástico debido al empleo del elemento de control de carga en puntales y como a medida que se restringe más la carga admitida por los puntales mayor es el número de éstos que pasan a tener un comportamiento plástico.

Por último, centrándose en el caso en el que los intervalos entre pasos de carga se disminuyen en un día, se pueden obtener conclusiones similares. En cambio, como la rigidez del forjado, en este caso, es inferior debido a que el hormigón es más joven, los coeficientes de forjado disminuyen y las cargas en los puntales aumentan, por lo que se obtienen un número mayor de puntales con comportamiento plástico (Fig. 4.35, 4.36 y 4.37). También es intuitivo que el valor de los momentos sea inferior.

En este caso, existe un modelo (Modelo d12 con nivel de plastificación 14 KN) en el que aparece fisuración. Es debido a, entre otras razones, que se está imponiendo un nivel de plastificación en puntales que ocasiona mayor deformación y que es más exigente para el forjado; que la carga aplicada en este caso es mayor por el mayor peso propio respecto a los forjados con canto 20, 25 y 30 cm.; y que el hormigón es más joven respecto a los demás intervalos entre pasos de carga considerados por lo que su resistencia es menor.

Aún así, si se observa el momento que aparece y ocasiona la fisuración (47,67 KN\*m), es muy cercano al que produce la fisuración ( $M_{cr} = 47,47$  KN\*m) y se encuentra en la zona de apoyos en la que la ley de momentos varía considerablemente de un punto a otro. Por ello, se puede afirmar, que la fisuración, si existe, es muy reducida y localizada casi de forma puntual en la zona del apoyo interior. La abertura de fisura mostrada, 0'020 mm., es muy inferior al límite impuesto por el tipo de ambiente existente en la zona del edificio experimental por lo que no ocasionaría ningún tipo de problema.

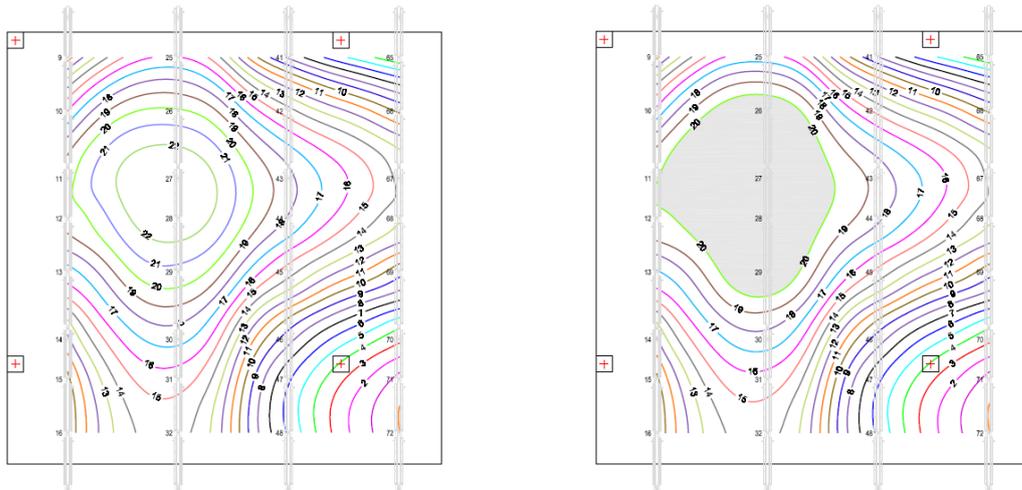


Fig. 4.32 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

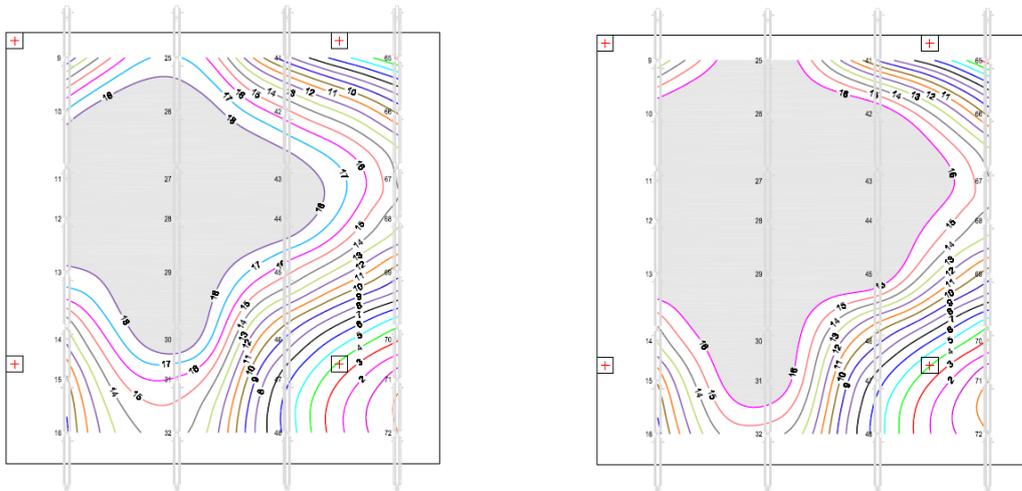


Fig. 4.33 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

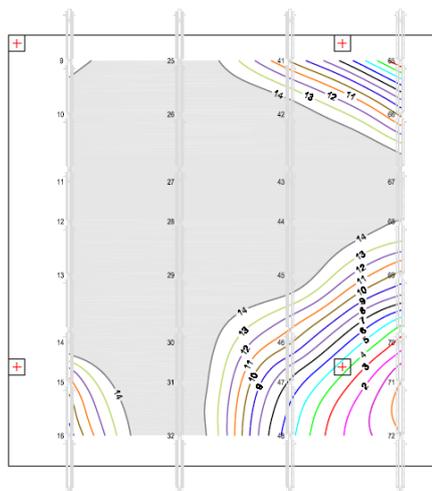


Fig. 4.34 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga +1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

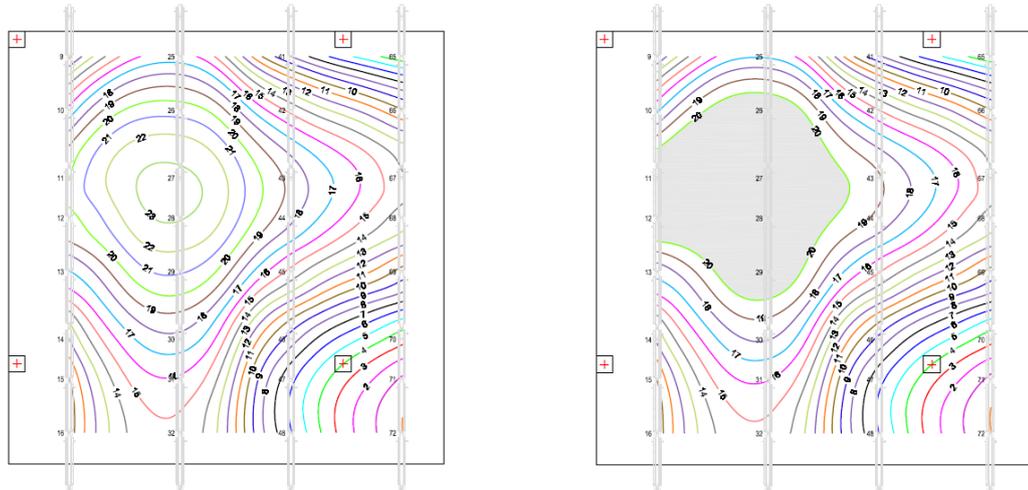


Fig. 4.35 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales y con nivel de plastificación de 20 KN.

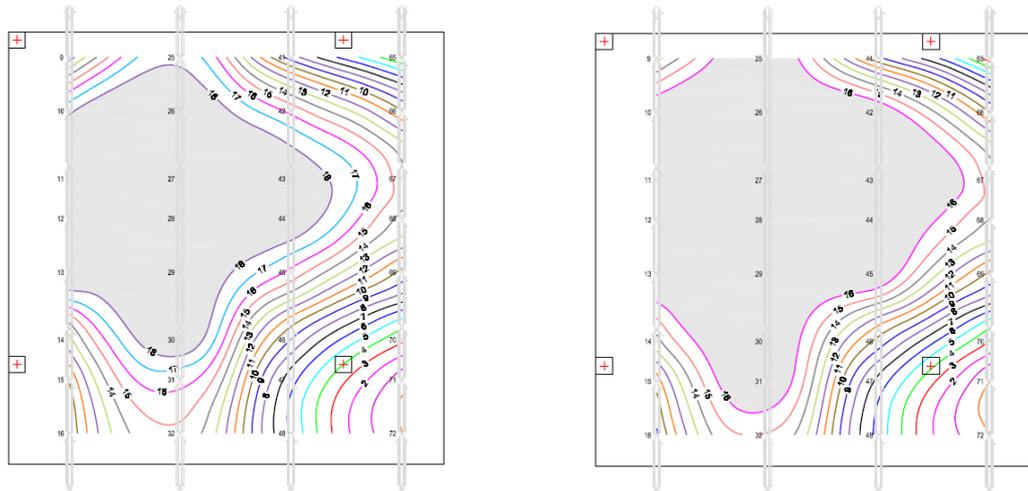


Fig. 4.36 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 18 KN y con nivel de plastificación de 16 KN.

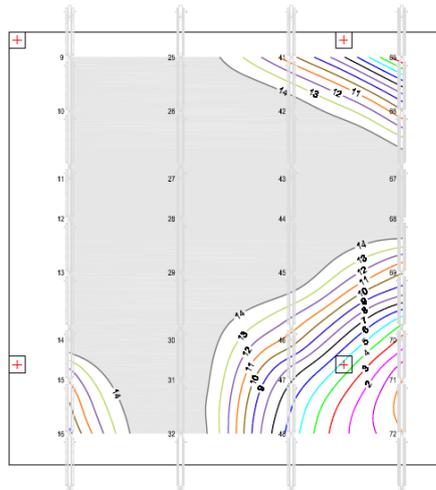


Fig. 4.37 Distribución de cargas en puntales del forjado 1. PC3-Hormigonado del forjado 2. Canto 35 cm. e intervalos entre pasos de carga -1. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 14 KN.

#### 4.4.4 Paso de carga 4 (PC4-Clareado del forjado 2)

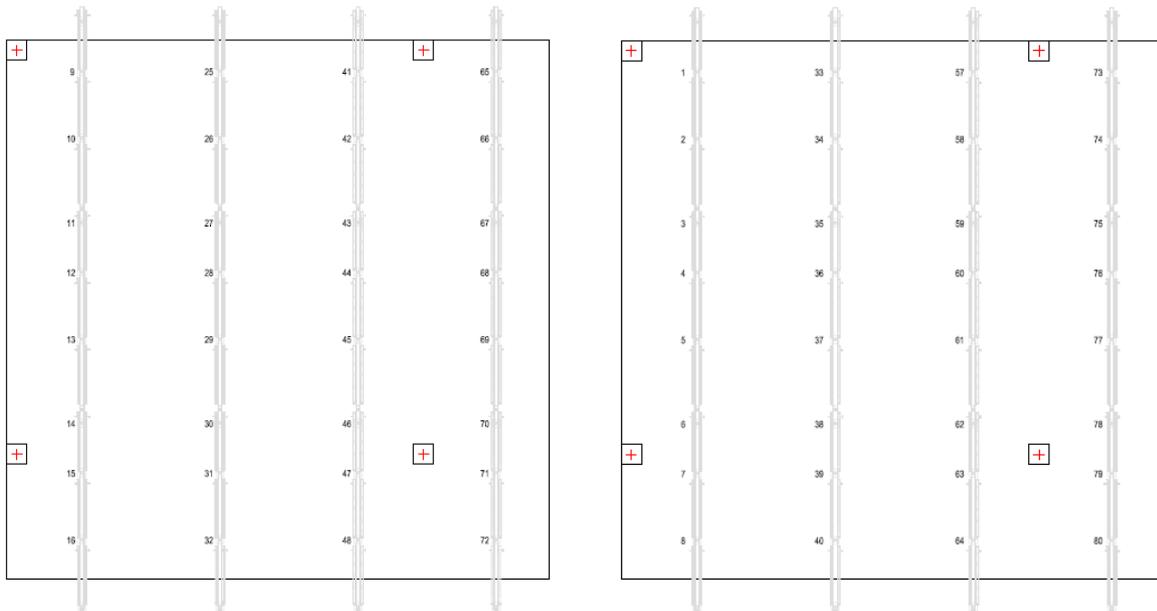


Fig. 4.38 Distribución de puntales en forjados 1 y 2. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

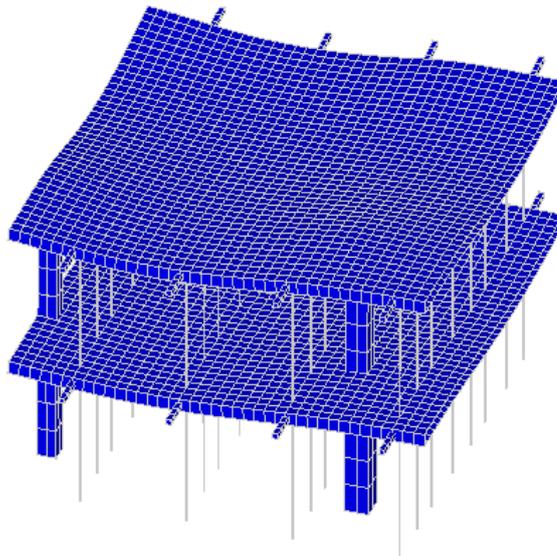


Fig. 4.39 Deformada tipo. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

Como se puede observar, las Figuras 4.38 y 4.39 muestran la distribución de puntales en el forjado 1 y 2, y la deformada tipo respectivamente. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

Al producirse el clareado del forjado 2, se induce una descarga de los puntales de la primera planta que ocasiona el descenso de la carga de los puntales por debajo de los niveles de plastificación. Aunque el forjado en el anterior paso de carga seguía comportándose de forma elástico-lineal, los puntales tuvieron comportamiento plástico, por lo que la flecha remanente no se recupera y afecta a este paso de carga. Por ello, aunque en este paso de carga el conjunto cimbra-estructura se comporte

de forma elástico-lineal, no es posible inducir los esfuerzos ni las flechas debido a que se ha realizado un análisis no lineal geométrico y evolutivo en el tiempo.

Refiriéndonos al forjado de la primera planta se puede apreciar que, al realizar el clareado del segundo forjado, ha disminuido su carga asumida entre un 20 y un 40 % para los cantos de 20 cm. a 35 cm. Por esta razón, junto con la anterior expuesta sobre la descarga de puntales, se explica la pequeña recuperación de flecha que ha tenido este forjado.

En cuanto a la carga en los puntales para un mismo canto de forjado, si se presta atención a un caso particular de tiempo entre pasos de carga, se puede observar que a medida que el nivel de plastificación es más restrictivo, la carga de los puntales de la primera y segunda planta disminuye así como también el coeficiente de puntales. Por el contrario, y por condición de equilibrio, el coeficiente de forjado aumenta. Ello es debido a las mayores flechas experimentadas por el forjado en el anterior paso de carga a medida que se restringía más el nivel de plastificación. De esta forma, en este paso de carga, a medida que se restringe más el nivel de plastificación, el forjado tiene mayor rigidez respecto al sistema de apuntalamiento puesto que su recuperación del anterior paso de carga y su capacidad de absorción de carga es mayor.

Respecto al coeficiente de forjado de la segunda planta, cabe decir que ha aumentado considerablemente del anterior paso de carga a este debido a que el hormigón ha pasado de estado líquido a tener una vida de 6 días y empezar a resistir parte de la carga aplicada.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el primer forjado asume mayor proporción de carga pasando de un 45 % de la carga aplicada para un canto de 20 cm.; un 60 % para un canto de 25 cm.; un 70 % para un canto de 30 cm.; y hasta un 78 % para un canto de 35 cm. Por ello, las cargas máximas en los puntales no siguen un patrón proporcional a la carga aplicada puesto que el sistema de apuntalamiento absorbe menos carga y están presentes los fenómenos anteriormente tratados. Tampoco coincide ni se puede saber a priori cual es la posición del puntal más cargado.

Siguiendo el mismo razonamiento, a priori es intuitivo decir que como los forjados a medida que se aumenta el canto de forjado aumentan la carga absorbida, las flechas máximas deberán ser mayores. Por el contrario, también es lógico pensar que como cada vez el canto es mayor, y éste tiene gran influencia en la flecha, las flechas máximas cada vez serán menores. Pues bien, se puede observar como la flecha máxima aumenta al pasar de un canto de 20 cm. a uno de 25 cm. pero, por el contrario, disminuye a partir de éste, para los cantos de 30 y 35 cm. Se debe, entre otras razones, a que es mayor la influencia sobre la flecha máxima que tiene el variar el canto a la que tiene la absorción mayor de carga que experimenta el forjado.

También se puede observar, como para este paso de carga, no existe fisuración en ningún punto del forjado debido a que los momentos existentes son inferiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). No existe fisuración como consecuencia de haberse descargado el forjado de la primera planta por el fraguado del forjado de la segunda planta y no cargar de forma excesiva este último para la poca edad que tiene el forjado.

4.4.4.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp        | Forjado 1 (13/16/10 días) |       |       |          | Forjado 2 (6/7/5 días) |      |      |       |          |         |
|----|--------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|------------------------|------|------|-------|----------|---------|
|    |                    |              |                    |           |           | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                | M+CL | M-AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 1 E         | 16940/8402.9 | 0.82_1.22          | 0.44/0.38 | 1.18/0.62 | 4.73                      | 10.27 | 21.55 | NO       | -                      | 4.07 | 8.40 | 18.28 | NO       | -       |
|    | Modelo a1 EP       | "            | "                  | "         | "         | 4.73                      | 10.27 | 21.55 | NO       | -                      | 4.07 | 8.40 | 18.28 | NO       | -       |
|    | Modelo b1 EP       | 16255/8304.4 | 0.83_1.23          | 0.44/0.38 | 1.18/0.62 | 4.73                      | 10.27 | 21.55 | NO       | -                      | 4.07 | 8.40 | 18.28 | NO       | -       |
|    | Modelo c1 EP       | 14086/7710.2 | 0.94_1.32          | 0.44/0.39 | 1.17/0.61 | 5.00                      | 10.53 | 21.55 | NO       | -                      | 4.30 | 8.60 | 18.28 | NO       | -       |
|    | Modelo d1 EP       | 12057/6475.6 | 1.34_1.65          | 0.49/0.44 | 1.07/0.56 | 7.03                      | 12.07 | 21.55 | NO       | -                      | 5.77 | 9.60 | 18.28 | NO       | -       |
| +1 | Modelo 5 E         | 16877/8380.7 | 0.81_1.22          | 0.44/0.38 | 1.17/0.62 | 4.73                      | 10.37 | 22.27 | NO       | -                      | 4.13 | 8.47 | 19.01 | NO       | -       |
|    | Modelo a5 EP       | "            | "                  | "         | "         | 4.73                      | 10.37 | 22.27 | NO       | -                      | 4.13 | 8.47 | 19.01 | NO       | -       |
|    | Modelo b5 EP       | 16214/8285.7 | 0.82_1.23          | 0.44/0.39 | 1.17/0.61 | 4.73                      | 10.37 | 22.27 | NO       | -                      | 4.13 | 8.53 | 19.01 | NO       | -       |
|    | Modelo c5 EP       | 14045/7700.4 | 0.94_1.31          | 0.45/0.39 | 1.16/0.61 | 5.00                      | 10.60 | 22.27 | NO       | -                      | 4.33 | 8.67 | 19.01 | NO       | -       |
|    | Modelo d5 EP       | 12037/6452.8 | 1.32_1.63          | 0.49/0.44 | 1.06/0.56 | 7.07                      | 12.13 | 22.27 | NO       | -                      | 5.77 | 9.70 | 19.01 | NO       | -       |
| -1 | Modelo 9 E         | 16919/8337.0 | 0.82_1.22          | 0.43/0.38 | 1.18/0.62 | 4.67                      | 10.13 | 20.55 | NO       | -                      | 4.13 | 8.50 | 17.36 | NO       | -       |
|    | Modelo a9 EP       | "            | "                  | "         | "         | 4.67                      | 10.13 | 20.55 | NO       | -                      | 4.13 | 8.50 | 17.36 | NO       | -       |
|    | Modelo b9 EP       | 16158/8224.2 | 0.83_1.23          | 0.43/0.39 | 1.18/0.61 | 4.67                      | 10.20 | 20.55 | NO       | -                      | 4.13 | 8.53 | 17.36 | NO       | -       |
|    | Modelo c9 EP       | 13932/7559.0 | 0.96_1.33          | 0.44/0.40 | 1.16/0.60 | 5.00                      | 10.40 | 20.55 | NO       | -                      | 4.47 | 8.73 | 17.36 | NO       | -       |
|    | Modelo d9 EP       | 12015/6291.1 | 1.38_1.67          | 0.49/0.45 | 1.06/0.55 | 7.13                      | 12.13 | 20.55 | NO       | -                      | 6.03 | 9.87 | 17.36 | NO       | -       |

Tabla 4.14 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 4.

4.4.4.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|     |               | Puntal más cargado | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp        | Forjado 1 (13/16/10 días) |       |       |          |         | Forjado 2 (6/7/5 días) |       |       |          |         |
|-----|---------------|--------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------|------------------------|-------|-------|----------|---------|
|     |               |                    |              |                    |           |           | M+ CL                     | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) | M+ CL                  | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0   | Modelo 2 E    | 27/35              | 17923/9246.0 | 0.86_1.30          | 0.56/0.48 | 0.96/0.52 | 7.81                      | 16.93 | 32.47 | NO       | -       | 6.82                   | 13.13 | 27.54 | NO       | -       |
|     | Modelo a2 EP  | 28/35              | 16626/9100.1 | 0.88_1.31          | 0.56/0.48 | 0.96/0.52 | 7.92                      | 16.98 | 32.47 | NO       | -       | 6.88                   | 13.13 | 27.54 | NO       | -       |
|     | Modelo b2 EP  | 43/35              | 14731/8634.0 | 0.95_1.36          | 0.57/0.49 | 0.94/0.51 | 8.54                      | 17.19 | 32.47 | NO       | -       | 7.29                   | 13.23 | 27.54 | NO       | -       |
|     | Modelo c2 EP  | 43/35              | 13102/7691.9 | 1.13_1.49          | 0.60/0.51 | 0.88/0.49 | 10.42                     | 18.23 | 32.47 | NO       | -       | 8.44                   | 13.75 | 27.54 | NO       | -       |
|     | Modelo d2 EP  | 9/35               | 11381/6345.7 | 1.40_1.71          | 0.67/0.56 | 0.76/0.44 | 12.92                     | 20.83 | 32.47 | NO       | -       | 10.05                  | 14.95 | 27.54 | NO       | -       |
|     | Modelo 6 E    | 27/35              | 17814/9194.2 | 0.85_1.30          | 0.57/0.48 | 0.95/0.52 | 7.92                      | 16.98 | 33.55 | NO       | -       | 6.93                   | 13.23 | 28.64 | NO       | -       |
| + 1 | Modelo a6 EP  | 28/35              | 16567/9054.4 | 0.87_1.30          | 0.57/0.48 | 0.95/0.52 | 8.02                      | 16.98 | 33.55 | NO       | -       | 6.98                   | 13.23 | 28.64 | NO       | -       |
|     | Modelo b6 EP  | 43/35              | 14708/8598.6 | 0.94_1.35          | 0.57/0.49 | 0.93/0.51 | 8.65                      | 17.29 | 33.55 | NO       | -       | 7.34                   | 13.44 | 28.64 | NO       | -       |
|     | Modelo c6 EP  | 42/35              | 13011/7670.6 | 1.11_1.48          | 0.60/0.52 | 0.88/0.48 | 10.52                     | 18.33 | 33.55 | NO       | -       | 8.49                   | 13.85 | 28.64 | NO       | -       |
|     | Modelo d6 EP  | 9/35               | 11361/6329.7 | 1.38_1.69          | 0.67/0.57 | 0.76/0.43 | 12.92                     | 20.83 | 33.55 | NO       | -       | 10.16                  | 15.00 | 28.64 | NO       | -       |
| - 1 | Modelo 10 E   | 27/35              | 17923/9158.3 | 0.86_1.30          | 0.56/0.48 | 0.96/0.52 | 7.71                      | 16.77 | 30.96 | NO       | -       | 6.93                   | 13.18 | 26.16 | NO       | -       |
|     | Modelo a10 EP | 28/35              | 16440/8987.5 | 0.88_1.31          | 0.56/0.48 | 0.96/0.52 | 7.81                      | 16.77 | 30.96 | NO       | -       | 6.98                   | 13.23 | 26.16 | NO       | -       |
|     | Modelo b10 EP | 44/35              | 14772/8467.9 | 0.96_1.36          | 0.57/0.49 | 0.94/0.51 | 8.54                      | 17.08 | 30.96 | NO       | -       | 7.50                   | 13.33 | 26.16 | NO       | -       |
|     | Modelo c10 EP | 45/35              | 13295/7422.1 | 1.16_1.51          | 0.60/0.52 | 0.87/0.48 | 10.63                     | 18.23 | 30.96 | NO       | -       | 8.80                   | 13.96 | 26.16 | NO       | -       |
|     | Modelo d10 EP | 9/40               | 11168/6197.5 | 1.45_1.73          | 0.67/0.58 | 0.75/0.42 | 13.13                     | 20.94 | 30.96 | NO       | -       | 10.57                  | 15.21 | 26.16 | NO       | -       |

Tabla 4.15 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 4.

4.4.4.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp        | Forjado 1 (13/16/10 días) |       |       |          | Forjado 2 (6/7/5 días) |       |       |       |          |         |
|----|--------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|------------------------|-------|-------|-------|----------|---------|
|    |                    |              |                    |           |           | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 3 E         | 17794/9643.5 | 0.85_1.31          | 0.66/0.56 | 0.78/0.44 | 12.45                     | 23.40 | 45.02 | NO       | -                      | 10.73 | 17.70 | 38.19 | NO       | -       |
|    | Modelo a3 EP       | 15563/9362.6 | 0.88_1.33          | 0.67/0.56 | 0.77/0.44 | 12.60                     | 23.63 | 45.02 | NO       | -                      | 10.80 | 17.78 | 38.19 | NO       | -       |
|    | Modelo b3 EP       | 14122/8842.8 | 0.95_1.37          | 0.68/0.57 | 0.75/0.43 | 13.80                     | 24.15 | 45.02 | NO       | -                      | 11.33 | 17.93 | 38.19 | NO       | -       |
|    | Modelo c3 EP       | 12690/7911.5 | 1.09_1.46          | 0.72/0.60 | 0.69/0.40 | 16.05                     | 25.35 | 45.02 | NO       | -                      | 12.60 | 18.30 | 38.19 | NO       | -       |
|    | Modelo d3 EP       | 10925/6760.6 | 1.26_1.58          | 0.78/0.63 | 0.59/0.37 | 18.60                     | 27.75 | 45.02 | NO       | -                      | 14.10 | 19.13 | 38.19 | NO       | -       |
| +1 | Modelo 7 E         | 17649/9561.7 | 0.85_1.30          | 0.67/0.56 | 0.77/0.44 | 12.45                     | 23.55 | 46.53 | NO       | -                      | 10.88 | 17.85 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo a7 EP       | 15507/9296.5 | 0.87_1.32          | 0.67/0.57 | 0.76/0.43 | 12.60                     | 23.70 | 46.53 | NO       | -                      | 10.95 | 17.93 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo b7 EP       | 13987/8786.4 | 0.94_1.36          | 0.68/0.58 | 0.74/0.42 | 13.80                     | 24.15 | 46.53 | NO       | -                      | 11.48 | 18.08 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo c7 EP       | 12663/7872.3 | 1.07_1.45          | 0.72/0.60 | 0.68/0.40 | 16.05                     | 25.35 | 46.53 | NO       | -                      | 12.68 | 18.45 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo d7 EP       | 10905/6726.7 | 1.24_1.56          | 0.78/0.63 | 0.59/0.37 | 18.60                     | 27.75 | 46.53 | NO       | -                      | 14.18 | 19.20 | 39.71 | NO       | -       |
| -1 | Modelo 11 E        | 17826/9549.9 | 0.85_1.31          | 0.66/0.56 | 0.78/0.44 | 12.15                     | 23.25 | 42.93 | NO       | -                      | 10.80 | 17.70 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo a11 EP      | 15378/9199.5 | 0.89_1.33          | 0.66/0.56 | 0.77/0.44 | 12.60                     | 23.40 | 42.93 | NO       | -                      | 11.03 | 17.78 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo b11 EP      | 13856/8620.9 | 0.97_1.38          | 0.68/0.58 | 0.75/0.42 | 13.95                     | 24.00 | 42.93 | NO       | -                      | 11.63 | 18.00 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo c11 EP      | 12467/7598.7 | 1.11_1.48          | 0.72/0.60 | 0.68/0.40 | 16.35                     | 25.50 | 42.93 | NO       | -                      | 13.05 | 18.45 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo d11 EP      | 10668/6377.0 | 1.29_1.60          | 0.78/0.64 | 0.58/0.36 | 18.90                     | 28.05 | 42.93 | NO       | -                      | 14.63 | 19.28 | 36.27 | NO       | -       |

Tabla 4.16 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 4.

4.4.4.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|     | Puntal más cargado | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp        | Forjado 1 (13/16/10 días) |       |       |          | Forjado 2 (6/7/5 días) |       |       |       |          |         |
|-----|--------------------|--------------|--------------------|-----------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|------------------------|-------|-------|-------|----------|---------|
|     |                    |              |                    |           |           | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0   | Modelo 4 E         | 17097/9762.4 | 0.82_1.29          | 0.74/0.62 | 0.64/0.38 | 17.76                     | 28.99 | 58.92 | NO       | -                      | 14.90 | 22.05 | 49.98 | NO       | -       |
|     | Modelo a4 EP       | 14866/9498.7 | 0.84_1.30          | 0.74/0.62 | 0.63/0.38 | 17.97                     | 29.40 | 58.92 | NO       | -                      | 15.11 | 22.05 | 49.98 | NO       | -       |
|     | Modelo b4 EP       | 13514/9041.9 | 0.89_1.32          | 0.76/0.63 | 0.61/0.37 | 19.40                     | 29.81 | 58.92 | NO       | -                      | 15.72 | 22.15 | 49.98 | NO       | -       |
|     | Modelo c4 EP       | 12258/8272.8 | 0.98_1.38          | 0.79/0.65 | 0.56/0.35 | 21.64                     | 30.83 | 58.92 | NO       | -                      | 16.84 | 22.46 | 49.98 | NO       | -       |
| +1  | Modelo d4 EP       | 10689/7325.2 | 1.09_1.44          | 0.84/0.67 | 0.49/0.33 | 24.30                     | 32.87 | 58.92 | NO       | -                      | 18.07 | 22.87 | 49.98 | NO       | -       |
|     | Modelo 8 E         | 16928/9653.5 | 0.81_1.27          | 0.74/0.62 | 0.64/0.38 | 17.76                     | 28.99 | 60.90 | NO       | -                      | 15.11 | 22.15 | 51.98 | NO       | -       |
|     | Modelo a8 EP       | 14723/9405.4 | 0.83_1.28          | 0.74/0.63 | 0.63/0.37 | 17.97                     | 29.40 | 60.90 | NO       | -                      | 15.31 | 22.25 | 51.98 | NO       | -       |
|     | Modelo b8 EP       | 13405/8962.7 | 0.88_1.31          | 0.76/0.64 | 0.61/0.36 | 19.40                     | 29.81 | 60.90 | NO       | -                      | 15.82 | 22.25 | 51.98 | NO       | -       |
| -1  | Modelo c8 EP       | 12228/8212.1 | 0.97_1.36          | 0.79/0.65 | 0.56/0.35 | 21.64                     | 30.83 | 60.90 | NO       | -                      | 16.84 | 22.56 | 51.98 | NO       | -       |
|     | Modelo d8 EP       | 10664/7271.4 | 1.08_1.42          | 0.84/0.68 | 0.49/0.32 | 24.30                     | 32.87 | 60.90 | NO       | -                      | 18.17 | 22.97 | 51.98 | NO       | -       |
|     | Modelo 12 E        | 17161/9674.6 | 0.82_1.28          | 0.73/0.62 | 0.65/0.38 | 17.56                     | 28.79 | 56.18 | NO       | -                      | 15.11 | 21.95 | 47.47 | NO       | -       |
|     | Modelo a12 EP      | 14693/9335.2 | 0.85_1.30          | 0.74/0.63 | 0.64/0.37 | 17.97                     | 29.20 | 56.18 | NO       | -                      | 15.41 | 22.05 | 47.47 | NO       | -       |
| PC4 | Modelo b12 EP      | 13357/8828.6 | 0.91_1.33          | 0.75/0.64 | 0.61/0.36 | 19.40                     | 29.81 | 56.18 | NO       | -                      | 16.03 | 22.15 | 47.47 | NO       | -       |
|     | Modelo c12 EP      | 12016/7974.7 | 1.01_1.39          | 0.79/0.65 | 0.55/0.35 | 21.85                     | 31.03 | 56.18 | NO       | -                      | 17.25 | 22.46 | 47.47 | NO       | -       |
|     | Modelo d12 EP      | 10568/6981.6 | 1.12_1.46          | 0.84/0.68 | 0.48/0.32 | 24.50                     | 32.66 | 56.18 | NO       | -                      | 18.58 | 22.87 | 47.47 | NO       | -       |

Tabla 4.17 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 4.

#### 4.4.5 Paso de carga 5 (PC5-Descimbrado del forjado 1)

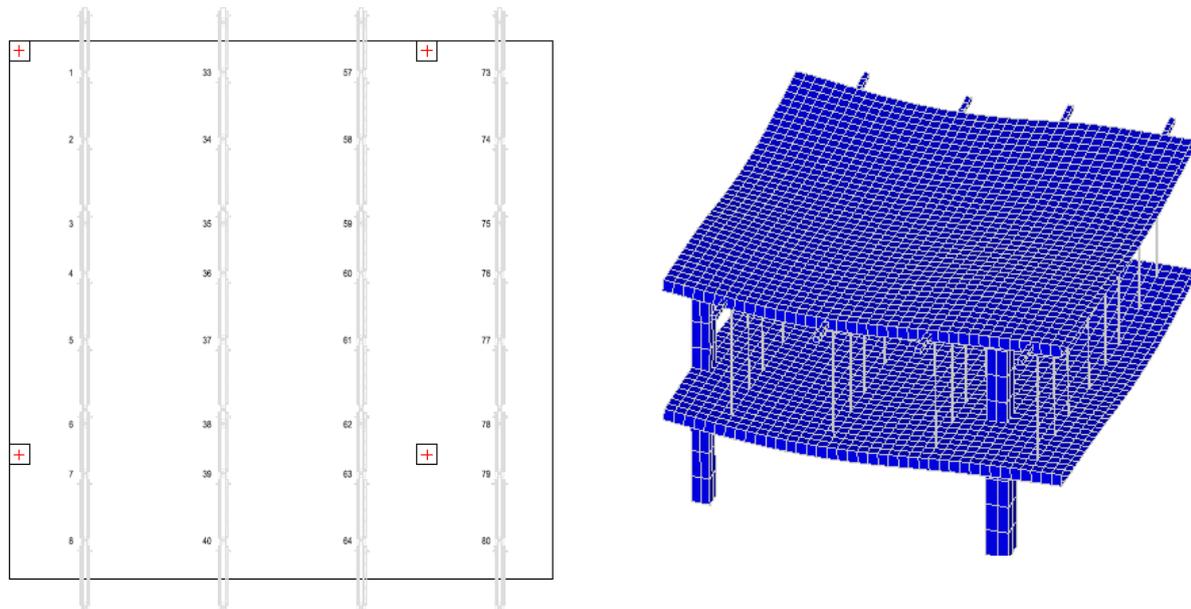


Fig. 4.40 Distribución de puntales del forjado 2 y deformada tipo. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

Como se puede observar, la Figura 4.40 muestra la distribución de puntales en el forjado 2, y la deformada tipo. A continuación, se muestran y analizan las tablas de este paso de carga.

Al producirse el descimbrado del forjado 1, el conjunto cimbra-estructura vuelve a tener un comportamiento elástico-lineal e intuitivo debido a que los únicos elementos que no tenían un comportamiento elástico y lineal han sido retirados y a que el forjado se ha comportado de forma elástica y lineal hasta este paso de carga, o lo que es lo mismo, no ha fisurado. Por ello, puesto que el nivel de plastificación en puntales no es un factor influyente en este paso de carga, se puede afirmar que al uniformizar todos los modelos los resultados coinciden. Consecuencia que se podrá apreciar en los siguientes pasos de carga.

Refiriéndonos al forjado de la primera planta se puede apreciar que, al realizar el descimbrado del primer forjado, ha aumentado su carga asumida entre un 45 % y un 68 % para los cantos de 35 cm. y 20 cm. respectivamente. Por tanto, debido a descimbrar el forjado de la primera planta, éste debe absorber mayor proporción de carga, correspondiente a la carga aplicada al forjado ( $C_f = 1$ ) más la parte de carga que baja por los puntales del forjado inmediatamente superior. Por ello estos forjados absorben más carga que la que se les aplica.

Respecto al coeficiente de forjado de la segunda planta, cabe decir que ha aumentado considerablemente del anterior paso de carga a este debido a que el hormigón tiene mayor edad, por lo que mayor rigidez, y a que se induce más flecha debido al descimbrado, hecho que proporciona mayor absorción de carga por parte del forjado debido a la compatibilidad de desplazamientos.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el primer forjado asume mayor proporción de

carga pasando de un 113 % de la carga aplicada para un canto de 20 cm.; un 117 % para un canto de 25 cm.; un 119 % para un canto de 30 cm.; y hasta un 120 % para un canto de 35 cm.

Siguiendo el mismo razonamiento, a priori es intuitivo decir que como los forjados a medida que se aumenta el canto de forjado, aumentan la carga absorbida, las flechas máximas deberán ser mayores. Por el contrario, también es lógico pensar que como cada vez el canto es mayor, y éste tiene gran influencia en la flecha, las flechas máximas cada vez serán menores. Pues bien, se puede observar como la flecha máxima disminuye a medida que se aumenta el canto. Se debe, entre otras razones, a que es mayor la influencia que tiene el variar el canto en la flecha máxima que la absorción mayor de carga que experimenta el forjado.

Respecto a los puntales, conforme se aumenta el canto del forjado, se puede ver como la carga que absorbe el sistema de apuntalamiento es mayor (pasa de un 13 % a un 20 %) aunque no se manifiesta de forma considerable.

También se puede observar, como para este paso de carga, existe fisuración en ciertos modelos debido a que los momentos existentes son superiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). Aparece la fisuración debido a que los forjados absorben mucha más carga que en el anterior paso de carga y la edad del hormigón no es suficiente como para poder resistir los esfuerzos que aparecen sin fisurar.

Además, se puede observar, como a medida que se aumenta el canto, la resistencia que proporciona dicho aumento es mayor que los esfuerzos que aparecen. Por lo que, conforme se aumenta el canto del forjado, la fisuración se reduce e incluso llega a no producirse debido a que los momentos que aparecen son inferiores al momento que produce la fisuración ( $M_{cr}$ ).

Centrando el análisis en el caso particular de los forjados de canto 20 cm., puede observarse como el forjado 1 aparece fisurado en todos los modelos solamente en la zona del apoyo interior. Como ya se ha expuesto, la ley de momentos en apoyos tiene una gran pendiente, lo que conlleva a una zona de fisuración reducida. El forjado 2 también aparece fisurado en la zona del apoyo interior aunque de forma mucho más limitada. Ello conlleva a que, aumentando los intervalos entre pasos de carga en un día (factor que no influye demasiado), aumente la resistencia del forjado debido a la mayor edad del hormigón e implica que no se produzca la fisuración. En los casos en que aparece fisuración, se puede observar como a medida que aumentan los intervalos entre pasos de carga, disminuye la abertura de fisura debido a la mayor resistencia de un hormigón con mayor edad.

Pasando a analizar el caso de los forjados de canto 25 cm. puede observarse que solo aparece fisurado el forjado 1 en la zona del apoyo interior por lo que conllevará una fisuración muy reducida como se ha mencionado anteriormente. Como bien se ha explicado, la abertura de fisura disminuye a medida que aumentan los intervalos entre pasos de carga. Por último, no se produce fisuración para los forjados de canto 30 y 35 cm. debido a la mayor resistencia que proporciona el aumento de canto.

En definitiva, la fisuración existente en los diversos modelos analizados cumple con la normativa al tener una abertura de fisura mucho menor al límite establecido y no ha sido ocasionada por la influencia del elemento de control de carga puesto que en este paso de carga es despreciable. También se produce en una zona muy restringida y es muy reducida.

4.4.5.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|              |              | Forjado 1 (14/18/10 días) |           |           |           |           |           | Forjado 2 (17/19/5 días) |       |       |          |         |       |       |       |       |   |
|--------------|--------------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|-------|-------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|---|
|              |              | M+CL                      | M-AP      | Mcr       | ¿Fisura?  | wk (mm)   | ¿Fisura?  | M+CL                     | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |       |       |       |       |   |
| 0            | Modelo 1 E   | 1857.7                    | 3.54_3.57 | 1.13/0.87 | Cf        | Cp        | 15.87     | 28.70                    | 21.81 | SI    | 0.0321   | 13.20   | 19.80 | 19.01 | SI    | 0.017 |   |
|              | Modelo a1 EP | "                         | "         | "         | "         | "         | 15.87     | 28.70                    | 21.81 | SI    | 0.0321   | 13.20   | 19.80 | 19.01 | SI    | 0.017 |   |
|              | Modelo b1 EP | 1850.2                    | 3.55_3.57 | 1.13/0.87 | 1.13/0.87 | 1.13/0.87 | 15.87     | 28.70                    | 21.81 | SI    | 0.0321   | 13.20   | 19.80 | 19.01 | SI    | 0.017 |   |
|              | Modelo c1 EP | 1850.2                    | 3.55_3.57 | 1.13/0.87 | 1.13/0.87 | 1.13/0.87 | 15.87     | 28.70                    | 21.81 | SI    | 0.0321   | 13.20   | 19.80 | 19.01 | SI    | 0.017 |   |
|              | Modelo d1 EP | 1850.3                    | 3.55_3.57 | 1.13/0.87 | 1.13/0.87 | 1.13/0.87 | 15.87     | 28.70                    | 21.81 | SI    | 0.0321   | 13.20   | 19.80 | 19.01 | SI    | 0.017 |   |
|              | Modelo 5 E   | 1845.4                    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97     | 28.77                    | 22.65 | SI    | 0.0312   | 13.13   | 19.70 | 20.11 | NO    | -     |   |
|              | Modelo e5 EP | "                         | "         | "         | "         | "         | 15.97     | 28.77                    | 22.65 | SI    | 0.0312   | 13.13   | 19.70 | 20.11 | NO    | -     |   |
|              | Modelo b5 EP | 1837.9                    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97     | 28.77                    | 22.65 | SI    | 0.0312   | 13.13   | 19.70 | 20.11 | NO    | -     |   |
|              | Modelo c5 EP | 1837.9                    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97     | 28.77                    | 22.65 | SI    | 0.0312   | 13.13   | 19.70 | 20.11 | NO    | -     |   |
|              | Modelo d5 EP | 1837.9                    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97     | 28.77                    | 22.65 | SI    | 0.0312   | 13.13   | 19.70 | 20.11 | NO    | -     |   |
| +1           | Modelo 9 E   | 1856.3                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
|              | Modelo a9 EP | "                         | "         | "         | "         | "         | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
|              | Modelo b9 EP | 1850.9                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
|              | Modelo c9 EP | 1850.9                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
|              | Modelo d9 EP | 1850.9                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
|              | -1           | Modelo 5 E                | 1845.4    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97                    | 28.77 | 22.65 | SI       | 0.0312  | 13.13 | 19.70 | 20.11 | NO    | - |
|              |              | Modelo e5 EP              | "         | "         | "         | "         | "         | 15.97                    | 28.77 | 22.65 | SI       | 0.0312  | 13.13 | 19.70 | 20.11 | NO    | - |
|              |              | Modelo b5 EP              | 1837.9    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97                    | 28.77 | 22.65 | SI       | 0.0312  | 13.13 | 19.70 | 20.11 | NO    | - |
|              |              | Modelo c5 EP              | 1837.9    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97                    | 28.77 | 22.65 | SI       | 0.0312  | 13.13 | 19.70 | 20.11 | NO    | - |
|              |              | Modelo d5 EP              | 1837.9    | 3.49_3.52 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 1.14/0.86 | 15.97                    | 28.77 | 22.65 | SI       | 0.0312  | 13.13 | 19.70 | 20.11 | NO    | - |
| Modelo 9 E   |              | 1856.3                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
| Modelo a9 EP |              | "                         | "         | "         | "         | "         | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
| Modelo b9 EP |              | 1850.9                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
| Modelo c9 EP |              | 1850.9                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |
| Modelo d9 EP |              | 1850.9                    | 3.57_3.59 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 1.12/0.88 | 15.63     | 28.37                    | 20.55 | SI    | 0.0330   | 13.47   | 20.03 | 17.36 | SI    | 0.020 |   |

Tabla 4.18 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 5.

4.4.5.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|    |               | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp    | Forjado 1 (14/18/10 días) |       |       |          | Forjado 2 (7/9/5 días) |       |       |       |          |         |
|----|---------------|--------------------|-----------|--------------------|-----------|-------|---------------------------|-------|-------|----------|------------------------|-------|-------|-------|----------|---------|
|    |               |                    |           |                    |           |       | M+ CL                     | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                | M+ CL | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 2 E    | /40                | 2226.8    | 2.49_2.57          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.15                     | 35.68 | 32.87 | SI       | 0.024                  | 16.35 | 22.03 | 28.64 | NO       | -       |
|    | Modelo a2 EP  | /40                | 2225.3    | 2.49_2.57          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.15                     | 35.68 | 32.87 | SI       | 0.024                  | 16.35 | 22.03 | 28.64 | NO       | -       |
|    | Modelo b2 EP  | /40                | 2225.3    | 2.49_2.57          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.15                     | 35.68 | 32.87 | SI       | 0.024                  | 16.35 | 22.03 | 28.64 | NO       | -       |
|    | Modelo c2 EP  | /40                | 2225.3    | 2.49_2.57          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.15                     | 35.68 | 32.87 | SI       | 0.024                  | 16.35 | 22.03 | 28.64 | NO       | -       |
|    | Modelo d2 EP  | /40                | 2225.3    | 2.49_2.57          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.15                     | 35.68 | 32.87 | SI       | 0.024                  | 16.35 | 22.03 | 28.64 | NO       | -       |
|    | Modelo 6 E    | /40                | 2271.7    | 2.45_2.55          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.25                     | 35.73 | 34.13 | SI       | 0.023                  | 16.25 | 21.93 | 30.30 | NO       | -       |
| +1 | Modelo a6 EP  | /40                | 2270.2    | 2.45_2.53          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.25                     | 35.73 | 34.13 | SI       | 0.023                  | 16.25 | 21.93 | 30.30 | NO       | -       |
|    | Modelo b6 EP  | /40                | 2270.2    | 2.45_2.53          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.25                     | 35.73 | 34.13 | SI       | 0.023                  | 16.25 | 21.93 | 30.30 | NO       | -       |
|    | Modelo c6 EP  | /40                | 2270.2    | 2.45_2.53          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.25                     | 35.73 | 34.13 | SI       | 0.023                  | 16.25 | 21.93 | 30.30 | NO       | -       |
|    | Modelo d6 EP  | /40                | 2270.2    | 2.45_2.53          | 1.17/0.83 | /0.17 | 21.25                     | 35.73 | 34.13 | SI       | 0.023                  | 16.25 | 21.93 | 30.30 | NO       | -       |
| -1 | Modelo 10 E   | /64                | 2119.9    | 2.52_2.58          | 1.16/0.84 | /0.16 | 20.83                     | 35.42 | 30.96 | SI       | 0.026                  | 16.61 | 22.14 | 26.16 | NO       | -       |
|    | Modelo a10 EP | /64                | 2124.1    | 2.52_2.58          | 1.16/0.84 | /0.16 | 20.83                     | 35.42 | 30.96 | SI       | 0.026                  | 16.61 | 22.14 | 26.16 | NO       | -       |
|    | Modelo b10 EP | /64                | 2124.1    | 2.52_2.58          | 1.16/0.84 | /0.16 | 20.83                     | 35.42 | 30.96 | SI       | 0.026                  | 16.61 | 22.14 | 26.16 | NO       | -       |
|    | Modelo c10 EP | /64                | 2124.1    | 2.52_2.58          | 1.16/0.84 | /0.16 | 20.83                     | 35.42 | 30.96 | SI       | 0.026                  | 16.61 | 22.14 | 26.16 | NO       | -       |
|    |               | /64                | 2124.1    | 2.52_2.58          | 1.16/0.84 | /0.16 | 20.83                     | 35.42 | 30.96 | SI       | 0.026                  | 16.61 | 22.14 | 26.16 | NO       | -       |

Tabla 4.19 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 5.

4.4.5.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp     | Forjado 1 (14/18/10 días) |       |       |          | Forjado 2 (7/9/5 días) |       |       |       |          |         |
|----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|--------|---------------------------|-------|-------|----------|------------------------|-------|-------|-------|----------|---------|
|    |                    |           |                    |           |        | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 3 E         | 3186.1    | 1.91_2.04          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 45.57 | NO       | -                      | 19.58 | 24.23 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo a3 EP       | 3185.4    | 1.91_2.04          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 45.57 | NO       | -                      | 19.58 | 24.23 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo b3 EP       | 3185.4    | 1.91_2.04          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 45.57 | NO       | -                      | 19.58 | 24.23 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo c3 EP       | 3185.4    | 1.91_2.04          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 45.57 | NO       | -                      | 19.58 | 24.23 | 39.71 | NO       | -       |
| +1 | Modelo d3 EP       | 3185.4    | 1.91_2.04          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 45.57 | NO       | -                      | 19.58 | 24.23 | 39.71 | NO       | -       |
|    | Modelo 7 E         | 3207.1    | 1.88_2.01          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 47.33 | NO       | -                      | 19.58 | 24.15 | 42.02 | NO       | -       |
|    | Modelo a7 EP       | 3206.4    | 1.88_2.01          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 47.33 | NO       | -                      | 19.58 | 24.15 | 42.02 | NO       | -       |
|    | Modelo b7 EP       | 3206.4    | 1.88_2.01          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 47.33 | NO       | -                      | 19.58 | 24.15 | 42.02 | NO       | -       |
| -1 | Modelo c7 EP       | 3206.4    | 1.88_2.01          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 47.33 | NO       | -                      | 19.58 | 24.15 | 42.02 | NO       | -       |
|    | Modelo d7 EP       | 3206.4    | 1.88_2.01          | 1.19/0.81 | _/0.19 | 27.00                     | 41.63 | 47.33 | NO       | -                      | 19.58 | 24.15 | 42.02 | NO       | -       |
|    | Modelo 11 E        | 3089.6    | 1.93_2.05          | 1.18/0.82 | _/0.18 | 26.70                     | 41.48 | 42.93 | NO       | -                      | 19.88 | 24.23 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo a11 EP      | 3088.8    | 1.93_2.05          | 1.18/0.82 | _/0.18 | 26.70                     | 41.48 | 42.93 | NO       | -                      | 19.88 | 24.23 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo b11 EP      | 3088.8    | 1.93_2.05          | 1.18/0.82 | _/0.18 | 26.70                     | 41.48 | 42.93 | NO       | -                      | 19.88 | 24.23 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo c11 EP      | 3088.8    | 1.93_2.05          | 1.18/0.82 | _/0.18 | 26.70                     | 41.48 | 42.93 | NO       | -                      | 19.88 | 24.23 | 36.27 | NO       | -       |
|    | Modelo d11 EP      | 3088.8    | 1.93_2.05          | 1.18/0.82 | _/0.18 | 26.70                     | 41.48 | 42.93 | NO       | -                      | 19.88 | 24.23 | 36.27 | NO       | -       |

Tabla 4.20 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 5.

4.4.5.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf        | Cp   | Forjado 1 (14/18/10 días) |       |       |          | Forjado 2 (7/9/5 días) |       |       |       |          |         |
|----|--------------------|-----------|--------------------|-----------|------|---------------------------|-------|-------|----------|------------------------|-------|-------|-------|----------|---------|
|    |                    |           |                    |           |      | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 4 E         | 3880.5    | 1.54_1.72          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.18                     | 46.35 | 59.64 | NO       | -                      | 23.07 | 26.64 | 51.98 | NO       | -       |
|    | Modelo a4 EP       | 3880.9    | 1.54_1.72          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.18                     | 46.35 | 59.64 | NO       | -                      | 23.07 | 26.64 | 51.98 | NO       | -       |
|    | Modelo b4 EP       | 3880.9    | 1.54_1.72          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.18                     | 46.35 | 59.64 | NO       | -                      | 23.07 | 26.64 | 51.98 | NO       | -       |
|    | Modelo c4 EP       | 3880.9    | 1.54_1.72          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.18                     | 46.35 | 59.64 | NO       | -                      | 23.07 | 26.64 | 51.98 | NO       | -       |
|    | Modelo d4 EP       | 3880.9    | 1.54_1.72          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.18                     | 46.35 | 59.64 | NO       | -                      | 23.07 | 26.64 | 51.98 | NO       | -       |
|    | Modelo 8 E         | 3875.7    | 1.52_1.69          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.28                     | 46.35 | 61.94 | NO       | -                      | 22.97 | 26.64 | 55.00 | NO       | -       |
|    | Modelo a8 EP       | 3876.2    | 1.52_1.69          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.28                     | 46.35 | 61.94 | NO       | -                      | 22.97 | 26.64 | 55.00 | NO       | -       |
|    | Modelo b8 EP       | 3876.1    | 1.52_1.69          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.28                     | 46.35 | 61.94 | NO       | -                      | 22.97 | 26.64 | 55.00 | NO       | -       |
| +1 | Modelo c8 EP       | 3876.1    | 1.52_1.69          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.28                     | 46.35 | 61.94 | NO       | -                      | 22.97 | 26.64 | 55.00 | NO       | -       |
|    | Modelo d8 EP       | 3876.1    | 1.52_1.69          | 1.20/0.80 | 0.20 | 33.28                     | 46.35 | 61.94 | NO       | -                      | 22.97 | 26.64 | 55.00 | NO       | -       |
|    | Modelo 12 E        | 3825.4    | 1.57_1.73          | 1.19/0.81 | 0.19 | 32.87                     | 46.35 | 56.18 | NO       | -                      | 23.38 | 26.64 | 47.47 | NO       | -       |
|    | Modelo a12 EP      | 3825.7    | 1.57_1.73          | 1.19/0.81 | 0.19 | 32.87                     | 46.35 | 56.18 | NO       | -                      | 23.38 | 26.54 | 47.47 | NO       | -       |
| -1 | Modelo b12 EP      | 3825.7    | 1.57_1.73          | 1.19/0.81 | 0.19 | 32.87                     | 46.35 | 56.18 | NO       | -                      | 23.38 | 26.54 | 47.47 | NO       | -       |
|    | Modelo c12 EP      | 3825.7    | 1.57_1.73          | 1.19/0.81 | 0.19 | 32.87                     | 46.35 | 56.18 | NO       | -                      | 23.38 | 26.54 | 47.47 | NO       | -       |
|    | Modelo d12 EP      | 3825.7    | 1.57_1.73          | 1.19/0.81 | 0.19 | 32.87                     | 46.35 | 56.18 | NO       | -                      | 23.38 | 26.54 | 47.47 | NO       | -       |

Tabla 4.21 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 5.

#### 4.4.6 Paso de carga 6 (PC6-Hormigonado del forjado 3)

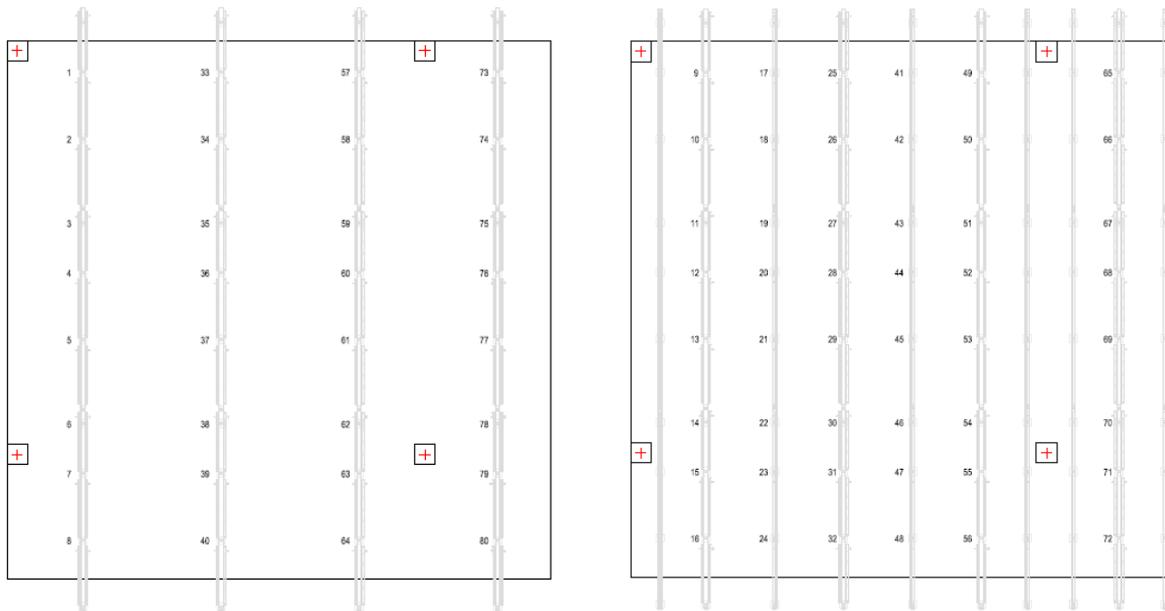


Fig. 4.41 Distribución de puntales en forjados 2 y 3. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

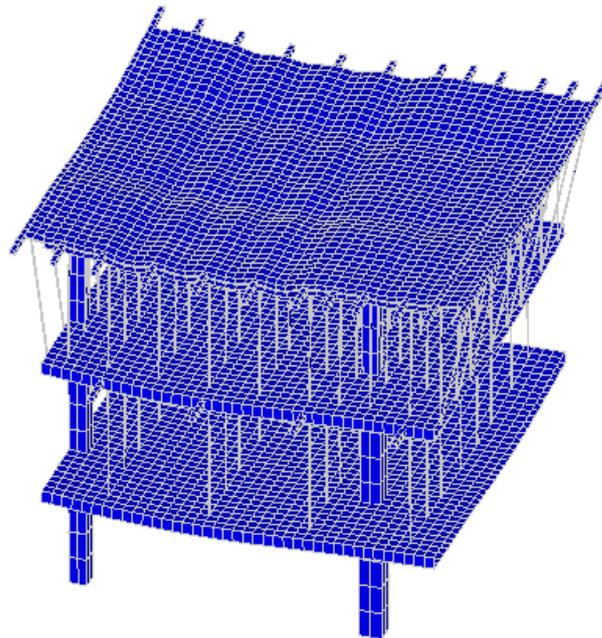


Fig. 4.42 Deformada tipo. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

Como se puede observar, las Figuras 4.41 y 4.42 muestran la distribución de puntales en el forjado 2 y 3, y la deformada tipo respectivamente. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

Al producirse el hormigonado del forjado 3, se transmiten más cargas a los forjados existentes. Refiriéndonos al forjado de la primera planta se puede apreciar que ha aumentado su carga asumida entre un 30 % y un 40 % de la carga aplicada en un forjado para los cantos de 35 cm. y 20 cm.

respectivamente. De forma intuitiva, el segundo forjado aumenta su carga asumida de forma complementaria a como lo hace el primer forjado debido a que el tercer forjado no tiene capacidad resistente. Respecto al coeficiente de forjado de la segunda planta, cabe decir que ha aumentado considerablemente del anterior paso de carga a este debido a que el hormigón tiene mayor edad, por lo que mayor rigidez, y fundamentalmente, a que se hormigona un nuevo forjado.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el primer forjado asume una similar proporción de carga siendo de un 154 % de la carga aplicada para un canto de 20 cm.; un 155 % para un canto de 25 cm.; un 153 % para un canto de 30 cm.; y un 151 % para un canto de 35 cm. Debido a ello, el sistema de apuntalamiento de la segunda planta absorbe también una similar proporción. El sistema de apuntalamiento de la tercera, absorbe la totalidad de la carga ( $C_p = 1$ ) debido a que el hormigón está en estado líquido y no resiste. Siguiendo el mismo razonamiento, a priori es intuitivo decir que como cada vez el canto es mayor, y éste tiene gran influencia en la flecha, las flechas máximas cada vez serán menores. Pues bien, se puede observar como la flecha máxima disminuye a medida que se aumenta el canto.

También se puede observar, como para este paso de carga, existe fisuración en diversos modelos debido a que los momentos existentes son superiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). Aparece la fisuración debido a que los forjados absorben más carga que en el anterior paso de carga y la edad del hormigón no es suficiente como para poder resistir los esfuerzos que aparecen sin fisurar. Además, se puede observar, como a medida que se aumenta el canto, la resistencia que proporciona dicho aumento es mayor que los esfuerzos que aparecen. Por lo que, conforme se aumenta el canto del forjado, la fisuración se reduce e incluso llega a no producirse debido a que los momentos que aparecen son inferiores al momento que produce la fisuración ( $M_{cr}$ ).

Centrando el análisis en el caso particular de los forjados de canto 20 cm. y de canto 25 cm., puede observarse como tanto el forjado 1 como el 2 aparecen fisurados en todos los modelos en la zona del apoyo interior y en varios de los de canto 20 cm. en el interior del vano. Como ya se ha expuesto, la ley de momentos en apoyos tiene una gran pendiente, lo que conlleva a una zona de fisuración reducida. No ocurre lo mismo en la zona interior del vano, aunque en este caso, la fisuración también será reducida al aparecer valores de momentos muy cercanos al que produce la fisuración ( $M_{cr}$ ). En los casos en que aparece fisuración, se puede observar como a medida que aumentan los intervalos entre pasos de carga, disminuye la abertura de fisura debido a la mayor resistencia de un hormigón con mayor edad.

Pasando a analizar el caso de los forjados de canto 30 cm. y 35 cm. puede observarse en las tablas los forjados que aparecen fisurados dependiendo del modelo. En todos ellos, la fisuración se localiza en el apoyo interior con las consecuencias que ello conlleva explicadas anteriormente. Como bien se ha explicado, la abertura de fisura disminuye a medida que aumentan los intervalos entre pasos de carga e incluso llega a desaparecer en ciertos grupos de modelos.

En definitiva, la fisuración existente cumple con la normativa al tener una abertura de fisura muy inferior al límite establecido. También se produce en una zona restringida y es muy reducida.

4.4.6.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|      | Puntal más cargado | Carga (N)     | Máxima flecha (mm) | Cf          | Cp        | Forjado 1 (17/22/12 días) |       |       |          | Forjado 2 (10/13/7 días) |       |       |       | Forjado 3 |         |      |      |     |
|------|--------------------|---------------|--------------------|-------------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|-------|-------|-------|-----------|---------|------|------|-----|
|      |                    |               |                    |             |           | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                  | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura?  | wk (mm) | M+CL | M-AP | Mcr |
| 0    | Modelo 1 E         | 6104.9/5474.6 | 5.03_5.29_5.52     | 1.54/1.45/0 | 0.54/1.00 | 23.20                     | 39.93 | 22.47 | SI       | 0.0528                   | 21.30 | 32.80 | 20.55 | SI        | 0.042   | 0    | -    | -   |
|      | Modelo a1 EF       | "             | "                  | "           | "         | 23.20                     | 39.93 | 22.47 | SI       | 0.0528                   | 21.30 | 32.80 | 20.55 | SI        | 0.042   | "    | "    | "   |
|      | Modelo b1 EF       | 6104.2/5475.1 | 5.03_5.29_5.52     | 1.54/1.46/0 | 0.54/1.00 | 23.17                     | 39.93 | 22.47 | SI       | 0.0528                   | 21.30 | 32.80 | 20.55 | SI        | 0.042   | "    | "    | "   |
|      | Modelo c1 EP       | 6104.2/5475.1 | 5.03_5.29_5.52     | 1.54/1.46/0 | 0.54/1.00 | 23.17                     | 39.93 | 22.47 | SI       | 0.0528                   | 21.30 | 32.80 | 20.55 | SI        | 0.042   | "    | "    | "   |
|      | Modelo d1 EP       | 6104.2/5475.1 | 5.03_5.29_5.52     | 1.54/1.46/0 | 0.54/1.00 | 23.17                     | 39.93 | 22.47 | SI       | 0.0528                   | 21.30 | 32.80 | 20.55 | SI        | 0.042   | "    | "    | "   |
| PC 6 | Modelo 5 E         | 6166.4/5474.8 | 4.91_5.18_5.42     | 1.55/1.45/0 | 0.55/1.00 | 23.30                     | 40.03 | 23.27 | SI       | 0.0522                   | 21.20 | 32.67 | 21.55 | SI        | 0.040   | 0    | -    | -   |
|      | Modelo a5 EP       | "             | "                  | "           | "         | 23.30                     | 40.03 | 23.27 | SI       | 0.0522                   | 21.20 | 32.67 | 21.55 | SI        | 0.040   | "    | "    | "   |
|      | Modelo b5 EP       | 6165.7/5475.2 | 4.92_5.19_5.42     | 1.55/1.45/0 | 0.55/1.00 | 23.27                     | 40.03 | 23.27 | SI       | 0.0522                   | 21.20 | 32.67 | 21.55 | SI        | 0.040   | "    | "    | "   |
|      | Modelo c5 EP       | 6165.7/5475.2 | 4.92_5.19_5.42     | 1.55/1.45/0 | 0.55/1.00 | 23.27                     | 40.03 | 23.27 | SI       | 0.0522                   | 21.20 | 32.67 | 21.55 | SI        | 0.040   | "    | "    | "   |
|      | Modelo d5 EP       | 6165.7/5475.2 | 4.92_5.19_5.42     | 1.55/1.45/0 | 0.55/1.00 | 23.27                     | 40.03 | 23.27 | SI       | 0.0522                   | 21.20 | 32.67 | 21.55 | SI        | 0.040   | "    | "    | "   |
| - 1  | Modelo 9 E         | 5861.6/5474.6 | 5.08_5.33_5.56     | 1.52/1.47/0 | 0.52/1.00 | 22.80                     | 39.43 | 21.25 | SI       | 0.0531                   | 21.63 | 33.13 | 19.01 | SI        | 0.044   | 0    | -    | -   |
|      | Modelo a9 EP       | "             | "                  | "           | "         | 22.80                     | 39.43 | 21.25 | SI       | 0.0531                   | 21.63 | 33.13 | 19.01 | SI        | 0.044   | "    | "    | "   |
|      | Modelo b9 EP       | 5860.6/5475.1 | 5.08_5.33_5.56     | 1.52/1.48/0 | 0.52/1.00 | 22.80                     | 39.47 | 21.25 | SI       | 0.0531                   | 21.63 | 33.13 | 19.01 | SI        | 0.044   | "    | "    | "   |
|      | Modelo c9 EP       | 5860.6/5475.1 | 5.08_5.33_5.56     | 1.52/1.48/0 | 0.52/1.00 | 22.80                     | 39.47 | 21.25 | SI       | 0.0531                   | 21.63 | 33.13 | 19.01 | SI        | 0.044   | "    | "    | "   |
|      | Modelo d9 EP       | 5860.6/5475.1 | 5.08_5.33_5.56     | 1.52/1.48/0 | 0.52/1.00 | 22.80                     | 39.47 | 21.25 | SI       | 0.0531                   | 21.63 | 33.13 | 19.01 | SI        | 0.044   | "    | "    | "   |

Tabla 4.22 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 6.

4.4.6.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|    | Puntal más cargado   | Carga (N)   | Máxima flecha (mm)   | Cf  | Op   | Forjado 1 (17/22/12 días)                 |   |   |                            | Forjado 2 (10/13/7 días)                  |   |   |   | Forjado 3                  |   |                       |                       |                       |
|----|--|---|--|---|--|---|---|---|----------------------------|---|---|---|---|----------------------------|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|    |  |   |  |   |  | M+CL                                      | M-AP                                      | Mcr                                       | ¿Fisura?                   | wk (mm)                                   | M+CL                                      | M-AP                                      | Mcr                                       | ¿Fisura?                   | wk (mm)                                   | M+CL                  | M-AP                  | Mcr                   |
| 0  | Modelo 2 E<br>Modelo b2 EP<br>Modelo b2 EP<br>Modelo c2 EP<br>Modelo d2 EP | 7636.8/6847.8<br>7637.1/6848.1<br>7637.1/6848.1<br>7637.1/6848.1<br>7637.1/6848.1 | 3.44_3.81_4.14<br>3.44_3.81_4.14<br>3.44_3.81_4.14<br>3.44_3.81_4.14<br>3.44_3.81_4.14 | 1.55/1.45/0<br>1.55/1.46/0<br>1.55/1.46/0<br>1.55/1.46/0<br>1.55/1.46/0 | 0.55/1<br>0.55/1<br>0.55/1<br>0.55/1<br>0.55/1 | 30.05<br>30.05<br>30.05<br>30.05<br>30.05 | 48.07<br>48.07<br>48.07<br>48.07<br>48.07 | 33.86<br>33.86<br>33.86<br>33.86<br>33.86 | SI<br>SI<br>SI<br>SI<br>SI | 0.043<br>0.043<br>0.043<br>0.043<br>0.043 | 27.19<br>27.19<br>27.19<br>27.19<br>27.19 | 38.54<br>38.54<br>38.54<br>38.54<br>38.54 | 30.96<br>30.96<br>30.96<br>30.96<br>30.96 | SI<br>SI<br>SI<br>SI<br>SI | 0.031<br>0.031<br>0.031<br>0.031<br>0.031 | 0<br>0<br>0<br>0<br>0 | -<br>-<br>-<br>-<br>- | -<br>-<br>-<br>-<br>- |
| +1 | Modelo 6 E<br>Modelo b6 EP<br>Modelo c6 EP<br>Modelo d6 EP                 | 7729.5/6847.9<br>7721.6/6848.2<br>7721.6/6848.2<br>7721.6/6848.2                  | 3.37_3.74_4.07<br>3.37_3.74_4.07<br>3.37_3.74_4.07<br>3.37_3.74_4.07                   | 1.55/1.45/0<br>1.55/1.45/0<br>1.55/1.45/0<br>1.55/1.45/0                | 0.55/1<br>0.55/1<br>0.55/1<br>0.55/1           | 30.16<br>30.16<br>30.16<br>30.16          | 48.07<br>48.07<br>48.07<br>48.07          | 35.05<br>35.05<br>35.05<br>35.05          | SI<br>SI<br>SI<br>SI       | 0.042<br>0.042<br>0.042<br>0.042          | 27.08<br>27.08<br>27.08<br>27.08          | 38.54<br>38.44<br>38.44<br>38.44          | 32.47<br>32.47<br>32.47<br>32.47          | SI<br>SI<br>SI<br>SI       | 0.030<br>0.030<br>0.030<br>0.030          | 0<br>0<br>0<br>0      | -<br>-<br>-<br>-      | -<br>-<br>-<br>-      |
| -1 | Modelo 10 E<br>Modelo b10 EP<br>Modelo c10 EP<br>Modelo d10 EP             | 7383.6/6847.8<br>7383.7/6848.1<br>7383.7/6848.1<br>7383.7/6848.1                  | 3.49_3.84_4.17<br>3.49_3.84_4.17<br>3.49_3.84_4.17<br>3.49_3.84_4.17                   | 1.53/1.46/0<br>1.53/1.47/0<br>1.53/1.47/0<br>1.53/1.47/0                | 0.53/1<br>0.53/1<br>0.53/1<br>0.53/1           | 29.64<br>29.58<br>29.58<br>29.58          | 47.66<br>47.66<br>47.66<br>47.66          | 32.02<br>32.02<br>32.02<br>32.02          | SI<br>SI<br>SI<br>SI       | 0.044<br>0.044<br>0.044<br>0.044          | 27.60<br>27.60<br>27.60<br>27.60          | 38.85<br>38.80<br>38.80<br>38.80          | 28.64<br>28.64<br>28.64<br>28.64          | SI<br>SI<br>SI<br>SI       | 0.034<br>0.034<br>0.034<br>0.034          | 0<br>0<br>0<br>0      | -<br>-<br>-<br>-      | -<br>-<br>-<br>-      |

Tabla 4.23 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 6.

4.4.6.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|   | Puntal más cargado | Carga (N)     | Máxima flecha (mm) | Cf          | Cp     | Forjado 1 (17/22/12 días) |       |       |          | Forjado 2 (10/13/7 días) |       |       |       | Forjado 3 |         |       |       |     |          |
|---|--------------------|---------------|--------------------|-------------|--------|---------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|-------|-------|-------|-----------|---------|-------|-------|-----|----------|
|   |                    |               |                    |             |        | M+ CL                     | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                  | M+ CL | M- AP | Mcr   | ¿Fisura?  | wk (mm) | M+ CL | M- AP | Mcr | ¿Fisura? |
| 0 | Modelo 3 E         | 9600.1/8219.7 | 2.57_3.03_3.46     | 1.53/1.46/0 | 0.53/1 | 37.20                     | 54.38 | 46.95 | SI       | 0.033                    | 33.75 | 44.48 | 42.93 | SI        | 0.023   | 0     | 0     | -   | -        |
|   | Modelo a3 EP       | 9589.8/8219.9 | 2.57_3.03_3.46     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.20                     | 54.38 | 46.95 | SI       | 0.033                    | 33.75 | 44.48 | 42.93 | SI        | 0.023   | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo b3 EP       | 9589.8/8219.9 | 2.57_3.03_3.46     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.20                     | 54.38 | 46.95 | SI       | 0.033                    | 33.75 | 44.48 | 42.93 | SI        | 0.023   | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo c3 EP       | 9589.8/8219.9 | 2.57_3.03_3.46     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.20                     | 54.38 | 46.95 | SI       | 0.033                    | 33.75 | 44.48 | 42.93 | SI        | 0.023   | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo d3 EP       | 9589.8/8219.9 | 2.57_3.03_3.46     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.20                     | 54.38 | 46.95 | SI       | 0.033                    | 33.75 | 44.48 | 42.93 | SI        | 0.023   | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo 7 E         | 9680.3/8219.8 | 2.52_2.98_3.41     | 1.53/1.46/0 | 0.53/1 | 37.35                     | 54.38 | 48.61 | SI       | 0.032                    | 33.68 | 44.48 | 45.02 | NO        | -       | 0     | 0     | -   | -        |
|   | Modelo e7 EP       | 9670.1/8220   | 2.52_2.98_3.41     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.35                     | 54.38 | 48.61 | SI       | 0.032                    | 33.68 | 44.40 | 45.02 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo b7 EP       | 9670.1/8220   | 2.52_2.98_3.41     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.35                     | 54.38 | 48.61 | SI       | 0.032                    | 33.68 | 44.40 | 45.02 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo c7 EP       | 9670.1/8220   | 2.52_2.98_3.41     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.35                     | 54.38 | 48.61 | SI       | 0.032                    | 33.68 | 44.40 | 45.02 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo d7 EP       | 9670.1/8220   | 2.52_2.98_3.41     | 1.53/1.47/0 | 0.53/1 | 37.35                     | 54.38 | 48.61 | SI       | 0.032                    | 33.68 | 44.40 | 45.02 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo 11 E        | 9289.8/8219.7 | 2.61_3.05_3.49     | 1.52/1.47/0 | 0.52/1 | 36.75                     | 54.08 | 44.40 | SI       | 0.035                    | 34.20 | 44.63 | 39.71 | SI        | 0.026   | 0     | 0     | -   | -        |
|   | Modelo b11 EP      | 9279.5/8219.9 | 2.61_3.05_3.49     | 1.52/1.48/0 | 0.52/1 | 36.75                     | 54.08 | 44.40 | SI       | 0.035                    | 34.20 | 44.48 | 39.71 | SI        | 0.026   | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo c11 EP      | 9279.5/8219.9 | 2.61_3.05_3.49     | 1.52/1.48/0 | 0.52/1 | 36.75                     | 54.08 | 44.40 | SI       | 0.035                    | 34.20 | 44.48 | 39.71 | SI        | 0.026   | "     | "     | "   | "        |
|   | Modelo d11 EP      | 9279.5/8219.9 | 2.61_3.05_3.49     | 1.52/1.48/0 | 0.52/1 | 36.75                     | 54.08 | 44.40 | SI       | 0.035                    | 34.20 | 44.48 | 39.71 | SI        | 0.026   | "     | "     | "   | "        |

Tabla 4.24 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 6.

4.4.6.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|    | Puntal más cargado      | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | CF             | Cp        | Forjado 1 (17/22/12 días) |       |       |          | Forjado 2 (10/13/7 días) |       |       |       | Forjado 3 |         |       |       |     |          |
|----|-------------------------|--------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|-------|-------|-------|-----------|---------|-------|-------|-----|----------|
|    |                         |              |                    |                |           | IM-CL                     | IM-AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                  | IM-CL | IM-AP | Mcr   | ¿Fisura?  | wk (mm) | IM-CL | IM-AP | Mcr | ¿Fisura? |
| 0  | Modelo 4 E<br>_36/45    | 11196/9591.1 | 2.03_2.57_3.10     | 1.51/1.48/0.00 | 0.51/1.00 | 44.51                     | 59.00 | 61.44 | NO       | -                        | 41.14 | 50.63 | 56.18 | NO        | -       | 0     | 0     | -   | -        |
|    | Modelo b4 EP<br>_36/45  | 11182/9591.2 | 2.03_2.56_3.09     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.41                     | 59.00 | 61.44 | NO       | -                        | 41.14 | 50.53 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo c4 EP<br>_36/45  | 11182/9591.2 | 2.03_2.57_3.09     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.41                     | 59.00 | 61.44 | NO       | -                        | 41.14 | 50.53 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo d4 EP<br>_36/45  | 11182/9591.2 | 2.03_2.57_3.09     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.41                     | 59.00 | 61.44 | NO       | -                        | 41.14 | 50.53 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo 8 E<br>_36/45    | 11248/9591.1 | 1.99_2.53_3.07     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.51                     | 58.90 | 63.62 | NO       | -                        | 41.14 | 50.53 | 56.18 | NO        | -       | 0     | 0     | -   | -        |
| +1 | Modelo 8 EP<br>_36/45   | 11234/9591.3 | 1.99_2.53_3.06     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.51                     | 58.90 | 63.62 | NO       | -                        | 41.04 | 50.63 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo b8 EP<br>_36/45  | 11234/9591.3 | 1.99_2.53_3.06     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.51                     | 58.90 | 63.62 | NO       | -                        | 41.04 | 50.63 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo c8 EP<br>_36/45  | 11234/9591.3 | 1.99_2.53_3.06     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.51                     | 58.90 | 63.62 | NO       | -                        | 41.04 | 50.63 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo d8 EP<br>_36/45  | 11234/9591.3 | 1.99_2.53_3.06     | 1.51/1.49/0.00 | 0.51/1.00 | 44.51                     | 58.90 | 63.62 | NO       | -                        | 41.04 | 50.63 | 56.18 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo 12 E<br>_36/45   | 10911/9591.1 | 2.07_2.59_3.12     | 1.50/1.49/0.00 | 0.50/1.00 | 44.10                     | 58.90 | 58.11 | SI       | 0.025                    | 41.55 | 50.63 | 51.98 | NO        | -       | 0     | 0     | -   | -        |
| -1 | Modelo a12 EP<br>_36/45 | 10897/9591.2 | 2.07_2.59_3.12     | 1.50/1.50/0.00 | 0.50/1.00 | 44.00                     | 58.90 | 58.11 | SI       | 0.025                    | 41.55 | 50.53 | 51.98 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo b12 EP<br>_36/45 | 10897/9591.2 | 2.07_2.59_3.12     | 1.50/1.50/0.00 | 0.50/1.00 | 44.00                     | 58.90 | 58.11 | SI       | 0.025                    | 41.55 | 50.53 | 51.98 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo c12 EP<br>_36/45 | 10897/9591.2 | 2.07_2.59_3.12     | 1.50/1.50/0.00 | 0.50/1.00 | 44.00                     | 58.90 | 58.11 | SI       | 0.025                    | 41.55 | 50.53 | 51.98 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |
|    | Modelo d12 EP<br>_36/45 | 10897/9591.2 | 2.07_2.59_3.12     | 1.50/1.50/0.00 | 0.50/1.00 | 44.00                     | 58.90 | 58.11 | SI       | 0.025                    | 41.55 | 50.53 | 51.98 | NO        | -       | "     | "     | "   | "        |

Tabla 4.25 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 6.

#### 4.4.7 Paso de carga 7 (PC7-Clareado del forjado 3)

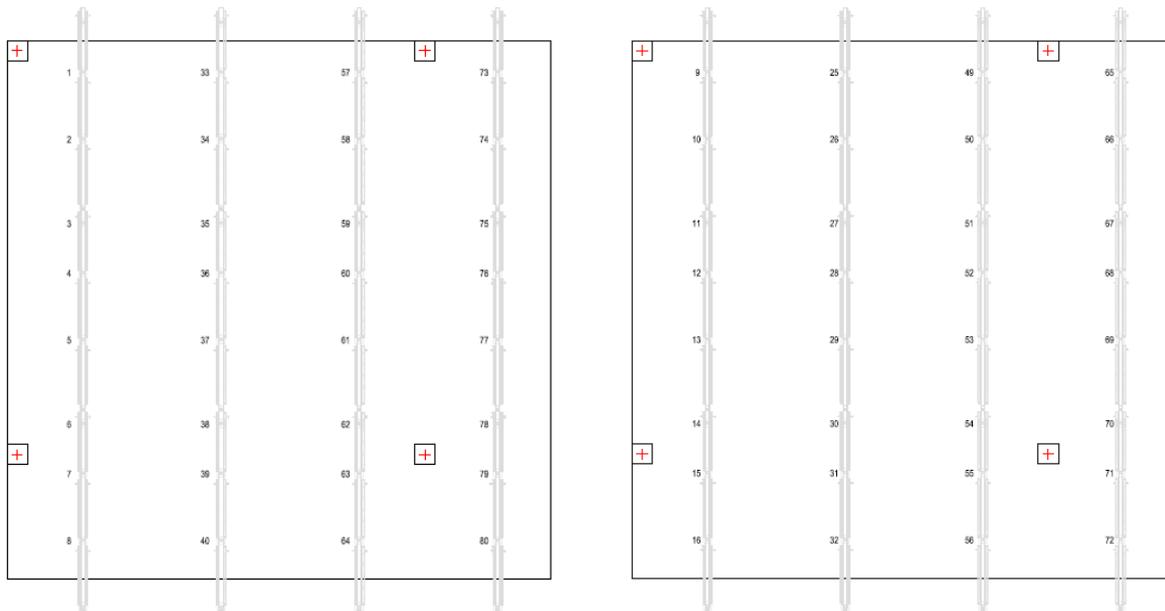


Fig. 4.43 Distribución de puntales en forjados 2 y 3. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

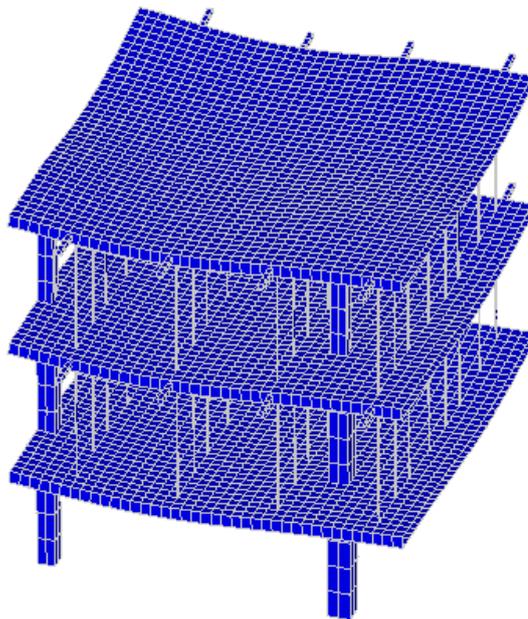


Fig. 4.44 Deformada tipo. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

Como se puede observar, las Figuras 4.43 y 4.44 muestran la distribución de puntales en el forjado 2 y 3, y la deformada tipo respectivamente. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

Al producirse el clareado del forjado 3 y adquirir resistencia dicho forjado, se transmiten menos cargas a los forjados inferiores. Refiriéndonos al forjado de la primera planta se puede apreciar que ha disminuido su carga asumida en aproximadamente un 5 % de la carga aplicada en un forjado.

El segundo forjado ha disminuido su carga asumida en un 30 % para el canto de 20 cm. y hasta un 45% para el canto de 35 cm. Respecto al coeficiente de forjado de la tercera planta, cabe decir que ha aumentado considerablemente del anterior paso de carga a este debido a que el hormigón ha pasado de estado líquido a tener una edad de 3 días, por lo que adquiere capacidad de absorción de cargas.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el primer forjado asume una similar proporción de carga. Debido a ello, el sistema de apuntalamiento de la segunda planta absorbe también una similar proporción. El segundo forjado absorbe cada vez menos carga debido a que el tercero absorbe más por la mayor rigidez. Ello ocasiona que el sistema de apuntalamiento de la tercera planta absorba cada vez menos carga pasando de un 55 a un 40 %. Siguiendo el mismo razonamiento, a priori es intuitivo decir que como cada vez el canto es mayor, y éste tiene gran influencia en la flecha, las flechas máximas cada vez serán menores. Pues bien, se puede observar como la flecha máxima disminuye a medida que se aumenta el canto.

También se puede observar, como para este paso de carga, existe fisuración en algunos modelos debido a que los momentos existentes son superiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). Aparece la fisuración debido a que la edad del hormigón no es suficiente como para poder resistir los esfuerzos que aparecen sin fisurar. Además, se puede observar, como a medida que se aumenta el canto, la resistencia que proporciona dicho aumento es mayor que los esfuerzos que aparecen. Por lo que, conforme se aumenta el canto del forjado, la fisuración se reduce e incluso llega a no producirse debido a que los momentos que aparecen son inferiores al momento que produce la fisuración ( $M_{cr}$ ).

Centrando el análisis en el caso particular de los forjados de canto 20 cm., puede observarse como el forjado 1 y el forjado 2 aparecen fisurados en todos los modelos solamente en la zona del apoyo interior. Como ya se ha expuesto, la ley de momentos en apoyos tiene una gran pendiente, lo que conlleva a una zona de fisuración reducida. En los casos en que aparece fisuración, se puede observar como a medida que aumentan los intervalos entre pasos de carga, disminuye la abertura de fisura debido a la mayor resistencia de un hormigón con mayor edad.

Pasando a analizar el caso de los forjados de canto 25 cm. puede observarse que solo aparece fisurado el forjado 1 en la zona del apoyo interior por lo que conllevará una fisuración muy reducida como se ha mencionado anteriormente. El forjado 2 correspondiente a este canto y el forjado 1 para el caso de canto 30 cm. también aparecen fisurados en la zona del apoyo interior aunque de forma mucho más limitada. Ello conlleva a que, aumentando los intervalos entre pasos de carga (factor que no influye demasiado), aumente la resistencia del forjado debido a la mayor edad del hormigón e implica que no se produzca la fisuración. Como bien se ha explicado, la abertura de fisura disminuye a medida que aumentan los intervalos entre pasos de carga. Por último, no se produce fisuración para los forjados de canto 35 cm. debido a la mayor resistencia que proporciona el aumento de canto.

En definitiva, la fisuración existente en los diversos modelos analizados cumple con la normativa al tener una abertura de fisura mucho menor al límite establecido y no ha sido ocasionada por la influencia del elemento de control de carga. También se produce en una zona muy restringida y es muy reducida.

4.4.7.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|     | Puntal más cargado | Carga (N)     | Máxima flecha (mm) | Cf             | Cp        | Forjado 1 (20/26/14 días) |       |       |                  | Forjado 2 (13/17/9 días) |       |       |                  | Forjado 3 (3/4/2 días) |       |      |                  |       |    |
|-----|--------------------|---------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|------------------|--------------------------|-------|-------|------------------|------------------------|-------|------|------------------|-------|----|
|     |                    |               |                    |                |           | M+ Cl                     | M- AP | Mcr   | ΔFisura? wk (mm) | M+ Cl                    | M- AP | Mcr   | ΔFisura? wk (mm) | M+ Cl                  | M- AP | Mcr  | ΔFisura? wk (mm) |       |    |
| 0   | Modelo 1 E         | 4241.9/6984.1 | 4.45_4.64_4.98     | 1.39/1.16/0.45 | 0.39/0.55 | 20.60                     | 35.80 | 22.98 | SI               | 0.045                    | 18.23 | 27.67 | 21.55            | SI                     | 0.030 | 5.70 | 9.07             | 14.45 | NO |
|     | Modelo a1 EP       | "             | "                  | "              | "         | 20.60                     | 35.80 | 22.98 | SI               | 0.045                    | 18.23 | 27.67 | 21.55            | SI                     | 0.030 | 5.70 | 9.07             | 14.45 | NO |
|     | Modelo b1 EP       | 4242.1/6981.4 | 4.45_4.64_4.98     | 1.39/1.16/0.45 | 0.39/0.55 | 20.60                     | 35.80 | 22.98 | SI               | 0.045                    | 18.23 | 27.67 | 21.55            | SI                     | 0.030 | 5.70 | 9.07             | 14.45 | NO |
|     | Modelo c1 EP       | 4242.1/6981.4 | 4.45_4.64_4.98     | 1.39/1.16/0.45 | 0.39/0.55 | 20.60                     | 35.80 | 22.98 | SI               | 0.045                    | 18.23 | 27.67 | 21.55            | SI                     | 0.030 | 5.70 | 9.07             | 14.45 | NO |
|     | Modelo d1 EP       | 4242.2/6981.4 | 4.45_4.64_4.98     | 1.39/1.16/0.45 | 0.39/0.55 | 20.60                     | 35.80 | 22.98 | SI               | 0.045                    | 18.23 | 27.67 | 21.55            | SI                     | 0.030 | 5.70 | 9.07             | 14.45 | NO |
| PC7 | Modelo 5 E         | 4297.0/7000.1 | 4.53_4.71_5.05     | 1.39/1.15/0.45 | 0.39/0.55 | 20.70                     | 35.80 | 23.74 | SI               | 0.044                    | 18.13 | 27.53 | 22.47            | SI                     | 0.029 | 5.70 | 9.07             | 16.15 | NO |
|     | Modelo a5 EP       | "             | "                  | "              | "         | 20.70                     | 35.80 | 23.74 | SI               | 0.044                    | 18.13 | 27.53 | 22.47            | SI                     | 0.029 | 5.70 | 9.07             | 16.15 | NO |
|     | Modelo b5 EP       | 4297.3/6997.4 | 4.53_4.71_5.05     | 1.39/1.15/0.45 | 0.39/0.55 | 20.70                     | 35.80 | 23.74 | SI               | 0.044                    | 18.13 | 27.53 | 22.47            | SI                     | 0.029 | 5.70 | 9.07             | 16.15 | NO |
|     | Modelo c5 EP       | 4297.3/6997.4 | 4.53_4.71_5.05     | 1.39/1.15/0.45 | 0.39/0.55 | 20.70                     | 35.80 | 23.74 | SI               | 0.044                    | 18.13 | 27.53 | 22.47            | SI                     | 0.029 | 5.70 | 9.07             | 16.15 | NO |
|     | Modelo d5 EP       | 4297.4/6997.4 | 4.53_4.71_5.05     | 1.39/1.15/0.45 | 0.39/0.55 | 20.70                     | 35.80 | 23.74 | SI               | 0.044                    | 18.13 | 27.53 | 22.47            | SI                     | 0.029 | 5.70 | 9.07             | 16.15 | NO |
| -1  | Modelo 9 E         | 4061.1/7026.1 | 4.53_4.71_5.05     | 1.38/1.18/0.45 | 0.38/0.55 | 20.30                     | 35.47 | 21.81 | SI               | 0.045                    | 18.63 | 28.07 | 20.11            | SI                     | 0.033 | 5.63 | 8.93             | 11.77 | NO |
|     | Modelo a9 EP       | "             | "                  | "              | "         | 20.30                     | 35.47 | 21.81 | SI               | 0.045                    | 18.63 | 28.07 | 20.11            | SI                     | 0.033 | 5.63 | 8.93             | 11.77 | NO |
|     | Modelo b9 EP       | 4060.8/7025.4 | 4.53_4.71_5.05     | 1.38/1.18/0.45 | 0.38/0.55 | 20.30                     | 35.47 | 21.81 | SI               | 0.045                    | 18.63 | 28.07 | 20.11            | SI                     | 0.033 | 5.63 | 8.93             | 11.77 | NO |
|     | Modelo c9 EP       | 4060.8/7025.4 | 4.53_4.71_5.05     | 1.38/1.18/0.45 | 0.38/0.55 | 20.30                     | 35.47 | 21.81 | SI               | 0.045                    | 18.63 | 28.07 | 20.11            | SI                     | 0.033 | 5.63 | 8.93             | 11.77 | NO |
|     | Modelo d9 EP       | 4060.9/7025.4 | 4.53_4.71_5.05     | 1.38/1.18/0.45 | 0.38/0.55 | 20.30                     | 35.47 | 21.81 | SI               | 0.045                    | 18.63 | 28.07 | 20.11            | SI                     | 0.033 | 5.63 | 8.93             | 11.77 | NO |

Tabla 4.26 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 7.

4.4.7.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|   | Puntal más cargado       | Carga (N)     | Máxima flecha (mm) | Cf             | Gp        | Forjado 1 (20/26/14 días) |       |       |          | Forjado 2 (13/17/9 días) |       |       |       | Forjado 3 (3/4/2 días) |         |      |       |       |          |         |
|---|--------------------------|---------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|-------|-------|-------|------------------------|---------|------|-------|-------|----------|---------|
|   |                          |               |                    |                |           | M-CL                      | M-AP  | Mcr   | ∠Fisura? | wk (mm)                  | M-CL  | M-AP  | Mcr   | ∠Fisura?               | wk (mm) | M-CL | M-AP  | Mcr   | ∠Fisura? | wk (mm) |
| 0 | Modelo 2 E<br>_J37/27    | 5412.7/8325.2 | 3.04_3.29_3.69     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.51                     | 42.97 | 34.63 | SI       | 0.035                    | 22.40 | 30.31 | 32.47 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 21.78 | NO       | -       |
|   | Modelo 2 EP<br>_J37/27   | 5413.2/8323.2 | 3.04_3.29_3.69     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.51                     | 42.97 | 34.63 | SI       | 0.035                    | 22.40 | 30.31 | 32.47 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 21.78 | NO       | -       |
|   | Modelo c2 EP<br>_J37/27  | 5413.2/8323.1 | 3.04_3.29_3.69     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.51                     | 42.97 | 34.63 | SI       | 0.035                    | 22.40 | 30.31 | 32.47 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 21.78 | NO       | -       |
|   | Modelo d2 EP<br>_J37/27  | 5413.2/8323.2 | 3.04_3.29_3.69     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.51                     | 42.97 | 34.63 | SI       | 0.035                    | 22.40 | 30.31 | 32.47 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 21.78 | NO       | -       |
|   | Modelo 6 E<br>_J36/27    | 5487.9/8315.0 | 2.96_3.23_3.62     | 1.39/1.10/0.51 | 0.39/0.49 | 26.67                     | 42.97 | 35.76 | SI       | 0.033                    | 22.29 | 30.16 | 33.86 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 24.34 | NO       | -       |
|   | Modelo e6 EP<br>_J36/27  | 5483.3/8313.0 | 2.96_3.23_3.62     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.67                     | 42.97 | 35.76 | SI       | 0.033                    | 22.29 | 30.16 | 33.86 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 24.34 | NO       | -       |
|   | Modelo b6 EP<br>_J36/27  | 5483.3/8313.0 | 2.96_3.23_3.62     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.67                     | 42.97 | 35.76 | SI       | 0.033                    | 22.29 | 30.16 | 33.86 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 24.34 | NO       | -       |
|   | Modelo d6 EP<br>_J36/27  | 5483.3/8313.0 | 2.96_3.23_3.62     | 1.39/1.10/0.50 | 0.39/0.50 | 26.67                     | 42.97 | 35.76 | SI       | 0.033                    | 22.29 | 30.16 | 33.86 | NO                     | -       | 8.39 | 12.40 | 24.34 | NO       | -       |
|   | Modelo 10 E<br>_J37/27   | 5218.7/8413.0 | 3.10_3.35_3.75     | 1.38/1.12/0.50 | 0.38/0.50 | 26.25                     | 42.76 | 32.87 | SI       | 0.036                    | 22.86 | 30.68 | 30.30 | SI                     | 0.019   | 8.23 | 12.19 | 17.73 | NO       | -       |
|   | Modelo a10 EP<br>_J36/27 | 5219.3/8410.9 | 3.10_3.35_3.75     | 1.38/1.12/0.50 | 0.38/0.50 | 26.25                     | 42.76 | 32.87 | SI       | 0.036                    | 22.86 | 30.68 | 30.30 | SI                     | 0.019   | 8.23 | 12.19 | 17.73 | NO       | -       |
|   | Modelo b10 EP<br>_J37/27 | 5219.3/8410.9 | 3.10_3.35_3.75     | 1.38/1.12/0.50 | 0.38/0.50 | 26.25                     | 42.76 | 32.87 | SI       | 0.036                    | 22.86 | 30.68 | 30.30 | SI                     | 0.019   | 8.23 | 12.19 | 17.73 | NO       | -       |
|   | Modelo c10 EP<br>_J37/27 | 5219.3/8410.8 | 3.10_3.35_3.75     | 1.38/1.12/0.50 | 0.38/0.50 | 26.25                     | 42.76 | 32.87 | SI       | 0.036                    | 22.86 | 30.68 | 30.30 | SI                     | 0.019   | 8.23 | 12.19 | 17.73 | NO       | -       |
|   | Modelo d10 EP<br>_J37/27 | 5219.3/8410.9 | 3.10_3.35_3.75     | 1.38/1.12/0.50 | 0.38/0.50 | 26.25                     | 42.76 | 32.87 | SI       | 0.036                    | 22.86 | 30.68 | 30.30 | SI                     | 0.019   | 8.23 | 12.19 | 17.73 | NO       | -       |

Tabla 4.27 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 7.

4.4.7.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|    | Puntal más cargado | Carga (N)     | Máxima flecha (mm) | CF             | Cp         | Forjado 1 (25/26/14 días) |       |       |          | Forjado 2 (13/17/9 días) |       |       |       | Forjado 3 (3/4/2 días) |         |       |       |       |          |         |
|----|--------------------|---------------|--------------------|----------------|------------|---------------------------|-------|-------|----------|--------------------------|-------|-------|-------|------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|    |                    |               |                    |                |            | M+ CL                     | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                  | M+ CL | M- AP | Mcr   | ¿Fisura?               | wk (mm) | M+ CL | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0  | Modelo 3 E         | 6685.2/9222.8 | 2.27_2.59_3.03     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.70                     | 48.83 | 48.01 | SI       | 0.024                    | 26.63 | 32.63 | 45.02 | NO                     | -       | 11.70 | 15.90 | 30.20 | NO       | -       |
|    | Modelo 63 EP       | 6681.7/9221.3 | 2.27_2.59_3.03     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.70                     | 48.83 | 48.01 | SI       | 0.024                    | 26.63 | 32.63 | 45.02 | NO                     | -       | 11.70 | 15.90 | 30.20 | NO       | -       |
|    | Modelo 63 EP       | 6681.7/9221.3 | 2.27_2.59_3.03     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.70                     | 48.83 | 48.01 | SI       | 0.024                    | 26.63 | 32.63 | 45.02 | NO                     | -       | 11.70 | 15.90 | 30.20 | NO       | -       |
|    | Modelo 63 EP       | 6681.6/9221.3 | 2.27_2.59_3.03     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.70                     | 48.83 | 48.01 | SI       | 0.024                    | 26.63 | 32.63 | 45.02 | NO                     | -       | 11.70 | 15.90 | 30.20 | NO       | -       |
|    | Modelo 63 EP       | 6681.6/9221.3 | 2.27_2.59_3.03     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.70                     | 48.83 | 48.01 | SI       | 0.024                    | 26.63 | 32.63 | 45.02 | NO                     | -       | 11.70 | 15.90 | 30.20 | NO       | -       |
|    | Modelo 7 E         | 6740.1/9183.3 | 2.21_2.53_2.97     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.85                     | 48.68 | 49.59 | NO       | -                        | 26.48 | 32.48 | 46.95 | NO                     | -       | 11.78 | 15.90 | 33.75 | NO       | -       |
|    | Modelo 67 EP       | 6736.8/9180.3 | 2.21_2.53_2.97     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.85                     | 48.68 | 49.59 | NO       | -                        | 26.48 | 32.48 | 46.95 | NO                     | -       | 11.78 | 15.90 | 33.75 | NO       | -       |
|    | Modelo 67 EP       | 6736.7/9180.3 | 2.21_2.53_2.97     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.85                     | 48.68 | 49.59 | NO       | -                        | 26.48 | 32.48 | 46.95 | NO                     | -       | 11.78 | 15.90 | 33.75 | NO       | -       |
|    | Modelo 67 EP       | 6736.7/9180.3 | 2.21_2.53_2.97     | 1.39/1.06/0.55 | /0.39/0.45 | 32.85                     | 48.68 | 49.59 | NO       | -                        | 26.48 | 32.48 | 46.95 | NO                     | -       | 11.78 | 15.90 | 33.75 | NO       | -       |
|    | Modelo 11 E        | 6475.6/9357.7 | 2.32_2.63_3.08     | 1.38/1.08/0.54 | /0.38/0.46 | 32.40                     | 48.75 | 45.57 | SI       | 0.027                    | 27.15 | 32.85 | 42.02 | NO                     | -       | 11.48 | 15.75 | 24.58 | NO       | -       |
| -1 | Modelo 611 EP      | 6471.8/9356.1 | 2.32_2.63_3.08     | 1.38/1.08/0.54 | /0.38/0.46 | 32.40                     | 48.75 | 45.57 | SI       | 0.027                    | 27.15 | 32.93 | 42.02 | NO                     | -       | 11.48 | 15.75 | 24.58 | NO       | -       |
|    | Modelo 611 EP      | 6471.8/9356.1 | 2.32_2.63_3.08     | 1.38/1.08/0.54 | /0.38/0.46 | 32.40                     | 48.75 | 45.57 | SI       | 0.027                    | 27.15 | 32.93 | 42.02 | NO                     | -       | 11.48 | 15.75 | 24.58 | NO       | -       |
|    | Modelo 611 EP      | 6471.8/9356.1 | 2.32_2.63_3.08     | 1.38/1.08/0.54 | /0.38/0.46 | 32.40                     | 48.75 | 45.57 | SI       | 0.027                    | 27.15 | 32.93 | 42.02 | NO                     | -       | 11.48 | 15.75 | 24.58 | NO       | -       |
|    | Modelo 611 EP      | 6471.8/9356.1 | 2.32_2.63_3.08     | 1.38/1.08/0.54 | /0.38/0.46 | 32.40                     | 48.75 | 45.57 | SI       | 0.027                    | 27.15 | 32.93 | 42.02 | NO                     | -       | 11.48 | 15.75 | 24.58 | NO       | -       |

Tabla 4.28 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 7.

4.4.7.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|     | Puntal más cargado | Carga (N)     | Máxima flecha (mm) | Cf             | Cp        | Forjado 1 (20/26/14 días) |       |       |           | Forjado 2 (13/17/9 días) |       |       |       | Forjado 3 (3/4/2 días) |         |       |       |       |           |         |
|-----|--------------------|---------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|------------------------|---------|-------|-------|-------|-----------|---------|
|     |                    |               |                    |                |           | M+ CL                     | M- AP | Mcr   | ε Fisura? | wk (mm)                  | M+ CL | M- AP | Mcr   | ε Fisura?              | wk (mm) | M+ CL | M- AP | Mcr   | ε Fisura? | wk (mm) |
| 0   | Modelo 4 E         | 7699.9/9800.7 | 1.80 2.17 2.63     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.49 | 62.84 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 58.92 | NO                     | -       | 15.62 | 19.40 | 39.52 | NO        | -       |
|     | Modelo 4 EP        | 7697.6/9798.7 | 1.80 2.17 2.63     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.49 | 62.84 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 58.92 | NO                     | -       | 15.62 | 19.40 | 39.52 | NO        | -       |
|     | Modelo b4 EP       | 7697.6/9798.7 | 1.80 2.17 2.63     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.49 | 62.84 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 58.92 | NO                     | -       | 15.62 | 19.40 | 39.52 | NO        | -       |
|     | Modelo c4 EP       | 7697.6/9798.7 | 1.80 2.17 2.63     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.49 | 62.84 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 58.92 | NO                     | -       | 15.62 | 19.40 | 39.52 | NO        | -       |
| PC7 | Modelo d4 EP       | 7697.5/9798.7 | 1.80 2.17 2.63     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.49 | 62.84 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 58.92 | NO                     | -       | 15.62 | 19.40 | 39.52 | NO        | -       |
|     | Modelo 8 E         | 7722.5/9731.6 | 1.76 2.12 2.59     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.19 | 64.90 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 61.44 | NO                     | -       | 15.82 | 19.40 | 44.17 | NO        | -       |
|     | Modelo 8 EP        | 7720.4/9729.8 | 1.76 2.12 2.59     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.19 | 64.90 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 61.44 | NO                     | -       | 15.82 | 19.40 | 44.17 | NO        | -       |
|     | Modelo b8 EP       | 7720.4/9729.8 | 1.76 2.12 2.59     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.19 | 64.90 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 61.44 | NO                     | -       | 15.82 | 19.40 | 44.17 | NO        | -       |
| -1  | Modelo c8 EP       | 7720.3/9729.8 | 1.76 2.12 2.59     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.19 | 64.90 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 61.44 | NO                     | -       | 15.82 | 19.40 | 44.17 | NO        | -       |
|     | Modelo d8 EP       | 7720.3/9729.8 | 1.76 2.12 2.59     | 1.37/1.03/0.60 | 0.37/0.40 | 39.20                     | 53.19 | 64.90 | NO        | -                        | 30.93 | 34.81 | 61.44 | NO                     | -       | 15.82 | 19.40 | 44.17 | NO        | -       |
|     | Modelo 12 E        | 7530.2/9976.6 | 1.85 2.20 2.68     | 1.37/1.04/0.59 | 0.37/0.41 | 38.79                     | 53.49 | 59.64 | NO        | -                        | 31.54 | 35.01 | 55.00 | NO                     | -       | 15.31 | 19.19 | 32.17 | NO        | -       |
|     | Modelo a12 EP      | 7527.6/9974.4 | 1.85 2.20 2.68     | 1.37/1.04/0.59 | 0.37/0.41 | 38.79                     | 53.49 | 59.64 | NO        | -                        | 31.54 | 35.01 | 55.00 | NO                     | -       | 15.31 | 19.19 | 32.17 | NO        | -       |
| -1  | Modelo b12 EP      | 7527.6/9974.4 | 1.85 2.20 2.68     | 1.37/1.04/0.59 | 0.37/0.41 | 38.79                     | 53.49 | 59.64 | NO        | -                        | 31.54 | 35.01 | 55.00 | NO                     | -       | 15.31 | 19.19 | 32.17 | NO        | -       |
|     | Modelo c12 EP      | 7527.6/9974.4 | 1.85 2.20 2.68     | 1.37/1.04/0.59 | 0.37/0.41 | 38.79                     | 53.49 | 59.64 | NO        | -                        | 31.54 | 35.01 | 55.00 | NO                     | -       | 15.31 | 19.19 | 32.17 | NO        | -       |
|     | Modelo d12 EP      | 7527.5/9974.4 | 1.85 2.20 2.68     | 1.37/1.04/0.59 | 0.37/0.41 | 38.79                     | 53.49 | 59.64 | NO        | -                        | 31.54 | 35.01 | 55.00 | NO                     | -       | 15.31 | 19.19 | 32.17 | NO        | -       |

Tabla 4.29 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 7.

#### 4.4.8 Paso de carga 8 (PC8-Carga en el forjado 3)

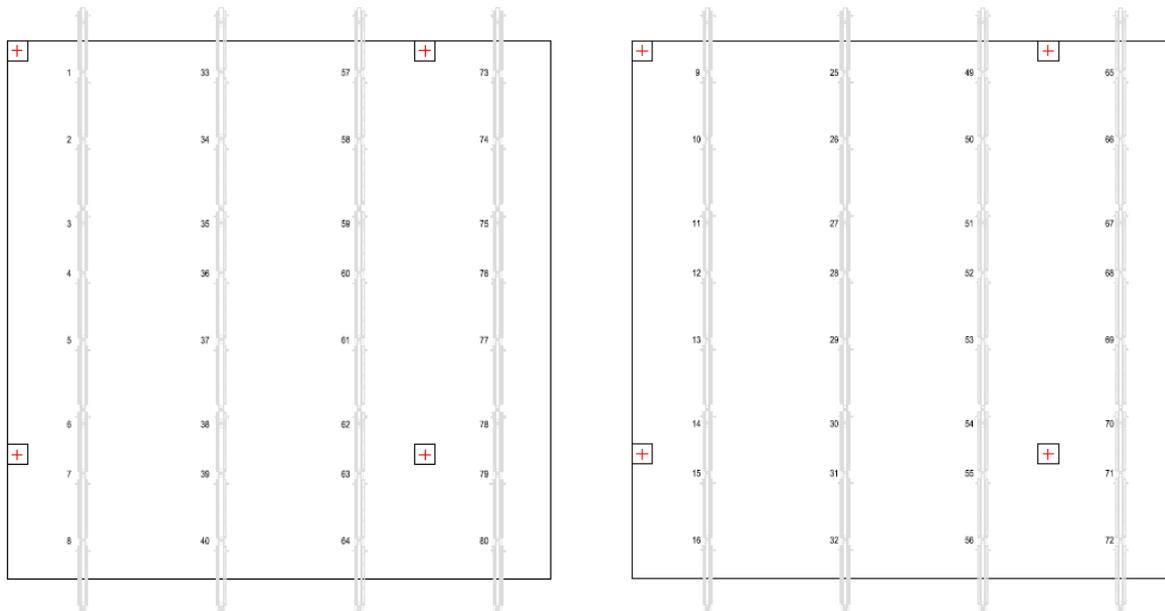


Fig. 4.45 Distribución de puntales en forjados 2 y 3. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

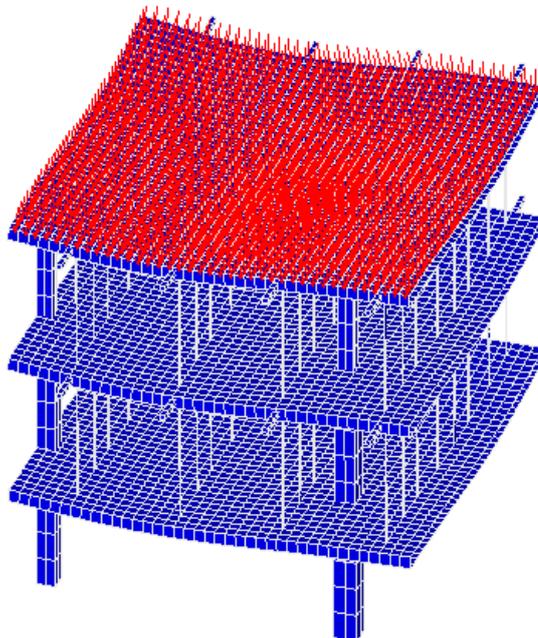


Fig. 4.46 Deformada tipo. Paso de carga 8 (Carga en el forjado 3)

Como se puede observar, las Figuras 4.45 y 4.46 muestran la distribución de puntales en el forjado 2 y 3, y la deformada tipo respectivamente. A continuación, se muestran y analizan las tablas pertenecientes a este paso de carga.

Al producirse la carga en el forjado 3 como simulación de un cuarto forjado, se transmiten más cargas a los forjados inferiores. Refiriéndonos al forjado de la primera planta, se puede apreciar que ha aumentado su carga asumida en aproximadamente un 20 % de la carga aplicada en un forjado.

El segundo forjado ha aumentado su carga en poco más de un 20 % y el tercero ha aumentado considerablemente entre un 50 y un 80 % para los cantos de 20 y 35 cm. respectivamente. Este aumento considerable se debe a la simulación de otro forjado en un nivel inmediatamente superior y a que la edad del hormigón ha pasado de 3 a 7 días con el aumento de rigidez pertinente.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el primer forjado asume una similar proporción de carga. Sin embargo, sí que se puede apreciar como a medida que se aumenta el canto del forjado, asume menor carga debido a que las cargas que anteriormente venían de niveles superiores, han pasado a resistirse por forjados superiores. Para el segundo forjado se puede obtener similar conclusión y para el tercero se puede observar como cada vez que se aumenta el canto, la carga asumida aumenta un 10 % pasando de un 93 % a un 122 % para los cantos de 20 y 35 cm. respectivamente. Siguiendo el mismo razonamiento, a priori es intuitivo decir que como cada vez el canto es mayor, y éste tiene gran influencia en la flecha, las flechas máximas cada vez serán menores. Pues bien, se puede observar como la flecha máxima disminuye a medida que se aumenta el canto.

También se puede observar, como para este paso de carga, existe fisuración en algunos modelos debido a que los momentos existentes son superiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). Aparece la fisuración debido a que la edad del hormigón no es suficiente como para poder resistir los esfuerzos que aparecen sin fisurar. Además, se puede observar, como a medida que se aumenta el canto, la resistencia que proporciona dicho aumento es mayor que los esfuerzos que aparecen. Por lo que, conforme se aumenta el canto del forjado, la fisuración se reduce e incluso llega a no producirse debido a que los momentos que aparecen son inferiores al momento que produce la fisuración ( $M_{cr}$ ).

En definitiva, se pueden obtener razonamientos y conclusiones similares a los anteriores pasos de carga y afirmar que la fisuración existente cumple con la normativa al tener una abertura de fisura mucho menor al límite establecido y no ha sido ocasionada por la influencia del elemento de control de carga. También se produce en una zona muy restringida y es muy reducida.

Debido a que en algunos modelos las cargas en los puntales de la tercera planta son superiores a los niveles de plastificación establecidos para la primera planta y a que se enriquece el análisis, se ha decidido introducir aquí el elemento de control de carga para esta planta. Aunque el coeficiente de puntales vaya en descenso según se aumenta el canto, las cargas máximas aumentan porque el sistema de apuntalamiento se mantiene constante y la carga aplicada varía considerablemente de una situación a otra. Por ello, conforme se aumenta el canto, aparecen más modelos en los que influye el elemento de control de carga en puntales. Se pueden obtener conclusiones similares a las del paso de carga 3. Entre otras se puede observar como a causa de adquirir un comportamiento plástico en puntales, los forjados de la tercera planta asumen más carga por compatibilidad de desplazamientos y los puntales por equilibrio menos. Por consiguiente, si el sistema de apuntalamiento asume menos carga, los forjados de la segunda y primera planta asumirán menos carga aunque en este último es depreciable la influencia. Respecto a las flechas, puede observarse como van en relación a la carga asumida por los forjados, siendo mayores para los forjados de la tercera planta y menores para los otros dos. Debido a la influencia del elemento de control de carga no se perjudica la fisuración debido a que no aparece en la tercera planta, de hecho, beneficia con aberturas de fisura menores en los forjados inferiores.

4.4.8.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|        | Puntal más cargado | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf             | Cp        | Foijado 1 (24/28/17 días) |       |       |          | Foijado 2 (17/22/12 días) |       |       |       | Foijado 3 (7/9/5 días) |         |       |       |       |          |         |
|--------|--------------------|--------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|        |                    |              |                    |                |           | M+ Cl                     | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                   | M+ Cl | M- AP | Mcr   | ¿Fisura?               | wk (mm) | M+ Cl | M- AP | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0      | Modelo a1 EP       | 7187.3/13456 | 5.29_5.64_6.29     | 1.63/1.43/0.93 | 0.63/1.07 | 25.10                     | 42.33 | 23.51 | SI       | 0.0561                    | 23.13 | 35.37 | 22.47 | SI                     | 0.0444  | 12.07 | 18.93 | 19.01 | NO       | -       |
|        | Modelo b1 EP       | "            | "                  | "              | "         | 25.10                     | 42.33 | 23.51 | SI       | 0.0561                    | 23.13 | 35.37 | 22.47 | SI                     | 0.0444  | 12.07 | 18.93 | 19.01 | NO       | -       |
|        | Modelo c1 EP       | 7185.7/13453 | 5.29_5.64_6.29     | 1.63/1.43/0.93 | 0.63/1.07 | 25.10                     | 42.33 | 23.51 | SI       | 0.0561                    | 23.13 | 35.37 | 22.47 | SI                     | 0.0444  | 12.07 | 18.93 | 19.01 | NO       | -       |
|        | Modelo d1 EP       | 7185.8/13453 | 5.29_5.64_6.29     | 1.63/1.43/0.93 | 0.63/1.07 | 25.10                     | 42.33 | 23.51 | SI       | 0.0561                    | 23.13 | 35.37 | 22.47 | SI                     | 0.0444  | 12.07 | 18.93 | 19.01 | NO       | -       |
|        | Modelo e1 EP       | 7194.9/13529 | 5.19_5.54_6.19     | 1.63/1.44/0.93 | 0.63/1.07 | 25.07                     | 42.20 | 23.93 | SI       | 0.0554                    | 23.27 | 35.50 | 23.27 | SI                     | 0.0437  | 12.00 | 18.87 | 20.11 | NO       | -       |
| PC8 +1 | Modelo a5 EP       | "            | "                  | "              | "         | 25.07                     | 42.20 | 23.93 | SI       | 0.0554                    | 23.27 | 35.50 | 23.27 | SI                     | 0.0437  | 12.00 | 18.87 | 20.11 | NO       | -       |
|        | Modelo b5 EP       | 7193.3/13526 | 5.19_5.54_6.19     | 1.63/1.44/0.93 | 0.63/1.07 | 25.07                     | 42.20 | 23.93 | SI       | 0.0554                    | 23.27 | 35.50 | 23.27 | SI                     | 0.0437  | 12.00 | 18.87 | 20.11 | NO       | -       |
|        | Modelo c5 EP       | 7193.3/13526 | 5.19_5.54_6.19     | 1.63/1.44/0.93 | 0.63/1.07 | 25.07                     | 42.20 | 23.93 | SI       | 0.0554                    | 23.27 | 35.50 | 23.27 | SI                     | 0.0437  | 12.00 | 18.87 | 20.11 | NO       | -       |
|        | Modelo d5 EP       | 7193.3/13526 | 5.19_5.54_6.19     | 1.63/1.44/0.93 | 0.63/1.07 | 25.07                     | 42.20 | 23.93 | SI       | 0.0554                    | 23.27 | 35.50 | 23.27 | SI                     | 0.0437  | 12.00 | 18.87 | 20.11 | NO       | -       |
|        | Modelo e5 EP       | 6895.1/13492 | 5.41_5.74_6.39     | 1.62/1.45/0.93 | 0.62/1.07 | 24.73                     | 41.93 | 22.47 | SI       | 0.0564                    | 23.60 | 35.83 | 21.25 | SI                     | 0.0465  | 11.93 | 18.80 | 17.36 | SI       | 0.017   |
| -1     | Modelo a9 EP       | "            | "                  | "              | "         | 24.73                     | 41.93 | 22.47 | SI       | 0.0564                    | 23.60 | 35.83 | 21.25 | SI                     | 0.0465  | 11.93 | 18.80 | 17.36 | SI       | 0.017   |
|        | Modelo b9 EP       | 6897.6/13489 | 5.41_5.74_6.39     | 1.62/1.45/0.93 | 0.62/1.07 | 24.73                     | 41.93 | 22.47 | SI       | 0.0564                    | 23.60 | 35.83 | 21.25 | SI                     | 0.0465  | 11.93 | 18.80 | 17.36 | SI       | 0.017   |
|        | Modelo c9 EP       | 6897.6/13489 | 5.41_5.74_6.39     | 1.62/1.45/0.93 | 0.62/1.07 | 24.73                     | 41.93 | 22.47 | SI       | 0.0564                    | 23.60 | 35.83 | 21.25 | SI                     | 0.0465  | 11.93 | 18.80 | 17.36 | SI       | 0.017   |
|        | Modelo d9 EP       | 6897.6/13489 | 5.41_5.74_6.39     | 1.62/1.45/0.93 | 0.62/1.07 | 24.73                     | 41.93 | 22.47 | SI       | 0.0564                    | 23.60 | 35.83 | 21.25 | SI                     | 0.0465  | 11.93 | 18.80 | 17.36 | SI       | 0.017   |

Tabla 4.30 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 8.

4.4.8.2 Resultados para un canto de 25 cm.

| Modelo        | Puntal más cargado   | Carga (N)    | Máxima flecha (mm) | Cf             | Gp        | Forjado 1 (24/28/17 días) |       |       |          | Forjado 2 (17/22/12 días) |       |       |       | Forjado 3 (17/19/5 días) |         |       |       |       |          |         |
|---------------|----------------------|--------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|               |                      |              |                    |                |           | M-CL                      | M-AP  | Mcr   | ΔFisura2 | wk (mm)                   | M-CL  | M-AP  | Mcr   | ΔFisura2                 | wk (mm) | M-CL  | M-AP  | Mcr   | ΔFisura2 | wk (mm) |
| Modelo 2 E    | 36/27                | 8999.2/15993 | 3.55_3.98_4.75     | 1.60/1.36/1.03 | 0.60/0.97 | 31.61                     | 49.74 | 35.43 | SI       | 0.0441                    | 28.44 | 38.85 | 33.86 | SI                       | 0.0287  | 17.76 | 25.63 | 28.64 | NO       | -       |
| Modelo a2 EP  | 36/27                | 8994.4/15991 | 3.55_3.98_4.75     | 1.60/1.36/1.03 | 0.60/0.97 | 31.61                     | 49.74 | 35.43 | SI       | 0.0441                    | 28.44 | 38.85 | 33.86 | SI                       | 0.0287  | 17.76 | 25.63 | 28.64 | NO       | -       |
| Modelo b2 EP  | 36/27                | 8994.4/15991 | 3.55_3.98_4.75     | 1.60/1.36/1.03 | 0.60/0.97 | 31.61                     | 49.74 | 35.43 | SI       | 0.0441                    | 28.44 | 38.85 | 33.86 | SI                       | 0.0287  | 17.76 | 25.63 | 28.64 | NO       | -       |
| Modelo c2 EP  | 36/27                | 8994.4/15991 | 3.55_3.98_4.75     | 1.60/1.36/1.03 | 0.60/0.97 | 31.61                     | 49.74 | 35.43 | SI       | 0.0441                    | 28.44 | 38.85 | 33.86 | SI                       | 0.0287  | 17.76 | 25.63 | 28.64 | NO       | -       |
| Modelo d2 EP  | 36/11-12,26-30,51-52 | 8715.0/14000 | 3.54_3.95_4.80     | 1.60/1.36/1.04 | 0.60/0.96 | 31.51                     | 49.64 | 35.43 | SI       | 0.0439                    | 28.44 | 38.75 | 33.86 | SI                       | 0.0285  | 18.02 | 25.63 | 28.64 | NO       | -       |
| Modelo 6 E    | 36/27                | 8979.9/16055 | 3.48_3.91_4.68     | 1.60/1.37/1.03 | 0.60/0.97 | 31.56                     | 49.53 | 36.06 | SI       | 0.0432                    | 28.65 | 39.06 | 35.05 | SI                       | 0.0277  | 17.71 | 25.63 | 30.30 | NO       | -       |
| Modelo a6 EP  | 36/27                | 8975.3/16053 | 3.48_3.91_4.68     | 1.60/1.37/1.03 | 0.60/0.97 | 31.56                     | 49.53 | 36.06 | SI       | 0.0432                    | 28.65 | 39.06 | 35.05 | SI                       | 0.0277  | 17.71 | 25.52 | 30.30 | NO       | -       |
| Modelo b6 EP  | 36/27                | 8975.3/16053 | 3.48_3.91_4.68     | 1.60/1.37/1.03 | 0.60/0.97 | 31.56                     | 49.53 | 36.06 | SI       | 0.0432                    | 28.65 | 39.06 | 35.05 | SI                       | 0.0277  | 17.71 | 25.52 | 30.30 | NO       | -       |
| Modelo c6 EP  | 36/27                | 8973.9/16000 | 3.48_3.91_4.68     | 1.60/1.37/1.03 | 0.60/0.97 | 31.56                     | 49.53 | 36.06 | SI       | 0.0432                    | 28.65 | 39.06 | 35.05 | SI                       | 0.0277  | 17.71 | 25.52 | 30.30 | NO       | -       |
| Modelo d6 EP  | 36/11-12,26-30,51-52 | 8688.8/14000 | 3.47_3.88_4.73     | 1.60/1.37/1.04 | 0.60/0.96 | 31.46                     | 49.48 | 36.06 | SI       | 0.0430                    | 28.54 | 38.91 | 35.05 | SI                       | 0.0275  | 17.97 | 25.63 | 30.30 | NO       | -       |
| Modelo 10 E   | 36/27                | 8719.9/16091 | 3.64_4.06_4.83     | 1.59/1.38/1.03 | 0.59/0.97 | 31.25                     | 49.48 | 33.86 | SI       | 0.0451                    | 29.06 | 39.38 | 32.02 | SI                       | 0.0314  | 17.60 | 25.42 | 26.16 | NO       | -       |
| Modelo a10 EP | 36/27                | 8714.8/16089 | 3.64_4.06_4.83     | 1.59/1.38/1.03 | 0.59/0.97 | 31.25                     | 49.48 | 33.86 | SI       | 0.0451                    | 29.06 | 39.38 | 32.02 | SI                       | 0.0314  | 17.34 | 25.42 | 26.16 | NO       | -       |
| Modelo b10 EP | 36/27                | 8714.8/16089 | 3.64_4.06_4.83     | 1.59/1.38/1.03 | 0.59/0.97 | 31.25                     | 49.48 | 33.86 | SI       | 0.0451                    | 29.06 | 39.38 | 32.02 | SI                       | 0.0314  | 17.34 | 25.42 | 26.16 | NO       | -       |
| Modelo c10 EP | 36/27                | 8713.3/16000 | 3.64_4.06_4.83     | 1.59/1.38/1.03 | 0.59/0.97 | 31.25                     | 49.48 | 33.86 | SI       | 0.0451                    | 29.06 | 39.38 | 32.02 | SI                       | 0.0314  | 17.34 | 25.42 | 26.16 | NO       | -       |
| Modelo d10 EP | 36/11-12,26-30,51-52 | 8420.0/14000 | 3.63_4.02_4.88     | 1.59/1.38/1.03 | 0.59/0.97 | 31.15                     | 49.38 | 33.86 | SI       | 0.0450                    | 28.96 | 39.22 | 32.02 | SI                       | 0.0312  | 17.81 | 25.52 | 26.16 | NO       | -       |

Tabla 4.31 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 8.

4.4.8.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|               | Puntal más cargado | Carga (N)      | Máxima flecha (mm) | Cf             | Cp        | Forjado 1 (24/28/17 días) |       |       |          | Forjado 2 (17/22/12 días) |       |       |       | Forjado 3 (7/9/5 días) |         |       |       |       |          |         |
|---------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|-----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|               |                    |                |                    |                |           | M+Cl                      | M-AP  | Mcr   | δFisura? | wk (mm)                   | M+Cl  | M-AP  | Mcr   | δFisura?               | wk (mm) | M+Cl  | M-AP  | Mcr   | δFisura? | wk (mm) |
| 0             | Modelo 3 E         | 10384/17667    | 2.61_3.10_3.95     | 1.57/1.30/1.13 | 0.57/0.87 | 38.10                     | 55.43 | 49.13 | SI       | 0.0326                    | 33.68 | 40.50 | 46.95 | NO                     | -       | 24.45 | 32.55 | 39.71 | NO       | -       |
|               | Modelo a3 EP       | 10381/17666    | 2.61_3.11_3.95     | 1.57/1.30/1.13 | 0.57/0.87 | 38.10                     | 55.43 | 49.13 | SI       | 0.0326                    | 33.68 | 40.50 | 46.95 | NO                     | -       | 24.45 | 32.55 | 39.71 | NO       | -       |
|               | Modelo b3 EP       | 10381/17666    | 2.61_3.11_3.95     | 1.57/1.30/1.13 | 0.57/0.87 | 38.10                     | 55.43 | 49.13 | SI       | 0.0326                    | 33.68 | 40.50 | 46.95 | NO                     | -       | 24.45 | 32.55 | 39.71 | NO       | -       |
|               | Modelo c3 EP       | 10227/16000    | 2.61_3.09_3.97     | 1.57/1.30/1.13 | 0.57/0.87 | 38.10                     | 55.43 | 49.13 | SI       | 0.0326                    | 33.68 | 40.43 | 46.95 | NO                     | -       | 24.53 | 32.63 | 39.71 | NO       | -       |
|               | Modelo d3 EP       | 9718.6/14000   | 2.58_3.04_4.08     | 1.56/1.29/1.15 | 0.56/0.85 | 37.65                     | 55.05 | 49.13 | SI       | 0.0321                    | 33.45 | 40.05 | 46.95 | NO                     | -       | 26.33 | 33.15 | 39.71 | NO       | -       |
|               | Modelo 7 E         | 10327/17712    | 2.56_3.05_3.90     | 1.56/1.31/1.13 | 0.56/0.87 | 38.10                     | 55.13 | 50.01 | SI       | 0.0314                    | 33.90 | 40.65 | 48.61 | NO                     | -       | 24.38 | 32.55 | 42.02 | NO       | -       |
|               | Modelo e7 EP       | 10324/17711    | 2.56_3.05_3.90     | 1.56/1.31/1.13 | 0.56/0.87 | 38.10                     | 55.13 | 50.01 | SI       | 0.0314                    | 33.90 | 40.65 | 48.61 | NO                     | -       | 24.38 | 32.55 | 42.02 | NO       | -       |
| PC8 +1        | Modelo b7 EP       | 10169/16000    | 2.56_3.04_3.92     | 1.56/1.31/1.13 | 0.56/0.87 | 37.95                     | 55.05 | 50.01 | SI       | 0.0313                    | 33.83 | 40.65 | 48.61 | NO                     | -       | 24.45 | 32.70 | 42.02 | NO       | -       |
|               | Modelo c7 EP       | 9657.4/14000   | 2.53_2.98_4.03     | 1.55/1.30/1.15 | 0.55/0.85 | 37.50                     | 54.75 | 50.01 | SI       | 0.0308                    | 33.53 | 40.20 | 48.61 | NO                     | -       | 26.33 | 33.15 | 42.02 | NO       | -       |
| -1            | Modelo 11 E        | 10144/17835    | 2.69_3.17_4.02     | 1.56/1.31/1.12 | 0.56/0.88 | 37.80                     | 55.43 | 46.95 | SI       | 0.0345                    | 34.28 | 40.88 | 44.40 | NO                     | -       | 24.15 | 32.40 | 36.27 | NO       | -       |
|               | Modelo a11 EP      | 10140/17834    | 2.69_3.17_4.02     | 1.56/1.31/1.12 | 0.56/0.88 | 37.80                     | 55.43 | 46.95 | SI       | 0.0345                    | 34.28 | 40.88 | 44.40 | NO                     | -       | 24.15 | 32.40 | 36.27 | NO       | -       |
| -1            | Modelo b11 EP      | 10140/17834    | 2.69_3.17_4.02     | 1.56/1.31/1.12 | 0.56/0.88 | 37.80                     | 55.43 | 46.95 | SI       | 0.0345                    | 34.28 | 40.88 | 44.40 | NO                     | -       | 24.15 | 32.40 | 36.27 | NO       | -       |
|               | Modelo c11 EP      | 9971.3/16000   | 2.68_3.15_4.04     | 1.56/1.31/1.12 | 0.56/0.88 | 37.80                     | 55.35 | 46.95 | SI       | 0.0344                    | 34.28 | 40.80 | 44.40 | NO                     | -       | 24.23 | 32.40 | 36.27 | NO       | -       |
| Modelo d11 EP | 9426.1/14000       | 2.64_3.09_4.17 | 1.55/1.30/1.15     | 0.55/0.85      | 37.28     | 54.98                     | 46.95 | SI    | 0.0339   | 33.83                     | 40.35 | 44.40 | NO    | -                      | 26.25   | 33.00 | 36.27 | NO    | -        |         |

Tabla 4.32 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 8.

4.4.8.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|               | Puntal más cargado | Carga (N)      | Máxima flecha (mm) | Cl             | Gp         | Forjado 1 (24/28/17 días) |       |       |          | Forjado 2 (17/22/12 días) |       |       |       | Forjado 3 (17/9/5 días) |         |       |       |       |          |         |
|---------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|------------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|               |                    |                |                    |                |            | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | fFisura? | wk (mm)                   | M+CL  | M-AP  | Mcr   | fFisura?                | wk (mm) | M+CL  | M-AP  | Mcr   | fFisura? | wk (mm) |
| 0             | Modelo a4 EP       | 11340/18709    | 2.05_2.59_3.48     | 1.53/1.25/1.22 | /0.53/0.78 | 44.71                     | 60.03 | 64.30 | NO       | -                         | 38.89 | 42.47 | 61.44 | NO                      | -       | 32.56 | 39.61 | 51.98 | NO       | -       |
|               | Modelo b4 EP       | 11338/18708    | 2.05_2.59_3.48     | 1.53/1.25/1.22 | /0.53/0.78 | 44.71                     | 60.03 | 64.30 | NO       | -                         | 38.89 | 42.47 | 61.44 | NO                      | -       | 32.56 | 39.40 | 51.98 | NO       | -       |
|               | Modelo c4 EP       | 11298/18000    | 2.05_2.58_3.48     | 1.53/1.25/1.22 | /0.53/0.78 | 44.61                     | 60.03 | 64.30 | NO       | -                         | 38.89 | 42.47 | 61.44 | NO                      | -       | 32.67 | 39.61 | 51.98 | NO       | -       |
|               | Modelo d4 EP       | 10882/16000    | 2.04_2.57_3.51     | 1.53/1.25/1.22 | /0.53/0.78 | 44.51                     | 59.92 | 64.30 | NO       | -                         | 38.69 | 42.26 | 61.44 | NO                      | -       | 33.18 | 39.61 | 51.98 | NO       | -       |
| PC8 +1        | Modelo e4 EP       | 10482/14000    | 2.01_2.51_3.62     | 1.52/1.23/1.25 | /0.52/0.75 | 43.69                     | 59.51 | 64.30 | NO       | -                         | 37.67 | 41.45 | 61.44 | NO                      | -       | 35.73 | 40.43 | 51.98 | NO       | -       |
|               | Modelo f4 EP       | 11242/18733    | 2.01_2.54_3.44     | 1.53/1.26/1.22 | /0.53/0.78 | 44.51                     | 59.62 | 65.45 | NO       | -                         | 39.10 | 42.77 | 63.62 | NO                      | -       | 32.56 | 39.61 | 55.00 | NO       | -       |
|               | Modelo g4 EP       | 11240/18731    | 2.01_2.54_3.44     | 1.53/1.26/1.22 | /0.53/0.78 | 44.51                     | 59.62 | 65.45 | NO       | -                         | 39.10 | 42.77 | 63.62 | NO                      | -       | 32.56 | 39.61 | 55.00 | NO       | -       |
|               | Modelo h4 EP       | 11199/18000    | 2.01_2.54_3.44     | 1.53/1.26/1.22 | /0.53/0.78 | 44.51                     | 59.62 | 65.45 | NO       | -                         | 39.10 | 42.77 | 63.62 | NO                      | -       | 32.56 | 39.61 | 55.00 | NO       | -       |
| -1            | Modelo i4 EP       | 10984/16000    | 2.00_2.52_3.47     | 1.52/1.25/1.22 | /0.52/0.77 | 44.30                     | 59.41 | 65.45 | NO       | -                         | 38.89 | 42.57 | 63.62 | NO                      | -       | 33.18 | 39.61 | 55.00 | NO       | -       |
|               | Modelo j4 EP       | 10389/14000    | 1.98_2.47_3.58     | 1.52/1.23/1.26 | /0.51/0.74 | 43.69                     | 59.11 | 65.45 | NO       | -                         | 37.87 | 41.65 | 63.62 | NO                      | -       | 35.73 | 40.43 | 55.00 | NO       | -       |
|               | Modelo k4 EP       | 11156/18937    | 2.11_2.64_3.54     | 1.53/1.26/1.21 | /0.53/0.79 | 44.30                     | 60.13 | 61.44 | NO       | -                         | 39.51 | 42.77 | 58.11 | NO                      | -       | 32.16 | 39.20 | 47.47 | NO       | -       |
|               | Modelo l4 EP       | 11154/18936    | 2.11_2.64_3.54     | 1.53/1.26/1.21 | /0.53/0.79 | 44.30                     | 60.13 | 61.44 | NO       | -                         | 39.51 | 42.77 | 58.11 | NO                      | -       | 32.16 | 39.20 | 47.47 | NO       | -       |
| Modelo m12 EP | 11100/18000        | 2.11_2.64_3.55 | 1.53/1.26/1.21     | /0.53/0.79     | 44.30      | 60.13                     | 61.44 | NO    | -        | 39.51                     | 42.67 | 58.11 | NO    | -                       | 32.16   | 39.20 | 47.47 | NO    | -        |         |
|               | 10845/16000        | 2.10_2.61_3.59 | 1.53/1.26/1.21     | /0.53/0.79     | 44.10      | 60.03                     | 61.44 | NO    | -        | 39.30                     | 42.47 | 58.11 | NO    | -                       | 32.97   | 39.40 | 47.47 | NO    | -        |         |
| Modelo n12 EP | 10230/14000        | 2.07_2.55_3.71 | 1.52/1.24/1.25     | /0.51/0.75     | 43.39      | 59.62                     | 61.44 | NO    | -        | 38.03                     | 41.55 | 58.11 | NO    | -                       | 35.63   | 40.43 | 47.47 | NO    | -        |         |

Tabla 4.33 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 8.

#### 4.4.9 Paso de carga 9 (PC9-Descimbrado del forjado 2)

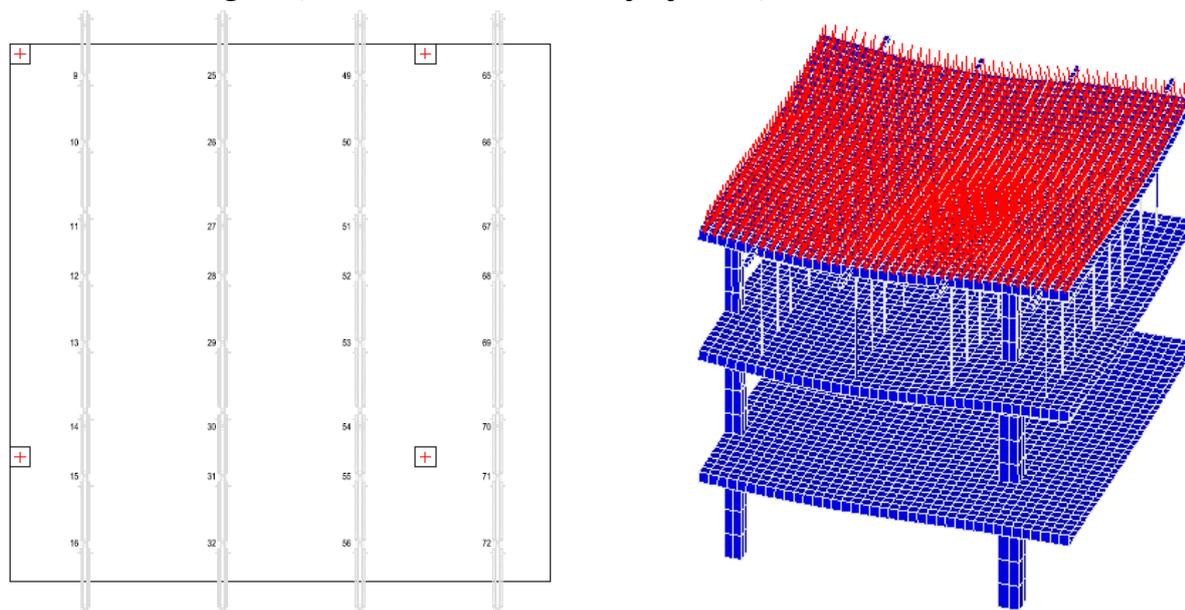


Fig. 4.47 Distribución de puntales del forjado 3 y deformada tipo. Paso de carga 9 (Descimbrado del forjado 2)

Como se puede observar, la Figura 4.47 muestra la distribución de puntales en el forjado 3, y la deformada tipo. A continuación, se muestran y analizan las tablas de este paso de carga.

Como bien es conocido, este paso de carga es el más restrictivo respecto a los forjados debido a que el forjado que más carga asume es el último que se cimbra teniéndolo apuntalado hasta la cimentación, cuando éste tiene los mismo juegos de puntales en niveles superiores. Por lo tanto, en este caso, el forjado que más carga asume se corresponde con el forjado de la segunda planta en el presente paso de carga.

Al producirse el descimbrado en el forjado 2, queda claro que el primer forjado asume solo su carga aplicada descendiendo así su carga asumida. Al quitar el sistema de apuntalamiento de la segunda planta, la carga que asumía se debe distribuir en los niveles superiores. De esta forma, las cargas asumidas por los forjados 2 y 3 son mayores que en el anterior paso de carga. Respecto al forjado 2 se puede observar que ha aumentado su carga asumida en un 40 % de la carga aplicada en un forjado. Sin embargo, la carga asumida por el forjado 3 ha aumentado en menor proporción, siendo de un 25 y un 13 % para los cantos de 20 y 35 cm. respectivamente. Este dato es razonable debido a que el sistema de apuntalamiento era el inmediatamente inferior al forjado 2.

Los momentos registrados, varían también de la misma forma que lo hace el coeficiente de forjado ( $C_f$ ) que depende a su vez de la rigidez del mismo en cada momento. Para cantos de forjado mayores, con el mismo sistema de apuntalamiento, el segundo forjado asume una inferior proporción de carga pasando de un 182 % a un 165 % para los cantos de 20 y 35 cm. respectivamente. Se debe, entre otras razones, a que por compatibilidad de desplazamientos, el tercer forjado debe asumir más carga por tener mayor deformación cosa que transmitirá menos carga al sistema de apuntalamiento y éste al segundo forjado. La carga que asume el tercer forjado es del 118 % y hasta del 135 % para los cantos de 20 a 35 cm. respectivamente. Siguiendo el mismo razonamiento, y como ya se ha dado a

entender, debido al descimbrado del forjado 2, las flechas son mayores para los forjado 2 y 3 como resulta evidente e inferiores para el forjado 1. A priori, también es intuitivo decir que, como cada vez el canto es mayor, y éste tiene gran influencia en la flecha, las flechas máximas cada vez serán menores. Pues bien, se puede observar como la flecha máxima disminuye considerablemente a medida que se aumenta el canto.

También se puede observar, como para este paso de carga, existe fisuración en algunos modelos debido a que los momentos existentes son superiores al de fisuración ( $M_{cr}$ ). Aparece la fisuración debido a que la edad del hormigón no es suficiente como para poder resistir los esfuerzos que aparecen sin fisurar. Además, se puede observar, como a medida que se aumenta el canto, la resistencia que proporciona dicho aumento es mayor que los esfuerzos que aparecen. Por lo que, conforme se aumenta el canto del forjado, la fisuración se reduce e incluso llega a no producirse debido a que los momentos que aparecen son inferiores al momento que produce la fisuración ( $M_{cr}$ ).

En definitiva, se pueden obtener razonamientos y conclusiones similares a los anteriores pasos de carga y afirmar que la fisuración existente cumple con la normativa al tener una abertura de fisura mucho menor al límite establecido y no ha sido ocasionada por la influencia del elemento de control de carga. También se produce en una zona muy restringida y es muy reducida.

Debido a que en el anterior paso de carga ha intervenido el elemento de control de carga en puntales y el sistema de apuntalamiento se ha mantenido, va a tener influencia en este paso de carga. En primer lugar, si se centra la atención en la carga de los puntales, se puede apreciar como a medida que en el anterior paso de carga se restringía más el nivel de plastificación, el tercer forjado asume mayor proporción de carga y el sistema de apuntalamiento por consiguiente, menor. Por ello, las cargas máximas en puntales van en descenso en aquellos modelos en los que el elemento de control de carga ha tenido influencia. Siguiendo el mismo razonamiento, se pueden intuir los valores obtenidos de máximas flechas.

En segundo lugar, si se presta atención a la fisuración, se puede observar como para los cantos de 25 y 30 cm. la influencia del elemento de control de carga es desfavorable en el tercer forjado para la abertura de fisura debido a que estamos ante un forjado fisurado y dicha influencia ocasiona el aumento de la carga asumida y por consiguiente el aumento de esfuerzos. También cabe decir que el orden de magnitud es despreciable puesto que se aumentan las aberturas de fisura para el caso más crítico en diezmilésimas de milímetro. Para el canto de 20 cm. recordemos que no tenía influencia el elemento de control de carga en el anterior paso de carga por lo que tampoco lo tiene en este y para el canto de 35 cm. no se produce fisuración en el tercer forjado. Por el contrario, la influencia, en el caso que la haya, es favorable en el segundo forjado debido a, como se ha explicado anteriormente, ocasiona que las cargas asumidas en el forjado sean menores. Por consiguiente se ocasionan menores esfuerzos y menores aberturas de fisura.

Para cantos de forjado mayores, como se ha dicho en el anterior paso de carga, la influencia del elemento de control de carga es mayor, por lo que la influencia en este paso de carga también es mayor. Por ello es para los cantos mayores donde se pueden observar mejor estos últimos razonamientos y conclusiones.

4.4.9.1 Resultados para un canto de 20 cm.

|              | Puntal más cargado | Carga (N)      | Máxima flecha (mm) | Cf          | Cp     | Forjado 1 (25/28/17 días) |       |       |           | Forjado 2 (18/24/13 días) |       |       |       | Forjado 3 (16/11/5 días) |         |       |       |       |           |         |
|--------------|--------------------|----------------|--------------------|-------------|--------|---------------------------|-------|-------|-----------|---------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|---------|-------|-------|-------|-----------|---------|
|              |                    |                |                    |             |        | M+ CL                     | M- AP | Mcr   | ¿ Fisura? | wk (mm)                   | M+ CL | M- AP | Mcr   | ¿ Fisura?                | wk (mm) | M+ CL | M- AP | Mcr   | ¿ Fisura? | wk (mm) |
| 0            | Modelo 1 E         | 9886.9         | 3.09_6.95_7.43     | 1/1.82/1.18 | ∕∕0.82 | 14.27                     | 24.77 | 23.63 | SI        | 0.0212                    | 29.50 | 44.47 | 22.65 | SI                       | 0.061   | 16.53 | 24.27 | 19.61 | SI        | 0.026   |
|              | Modelo b1 EP       | "              | "                  | "           | "      | 14.27                     | 24.77 | 23.63 | SI        | 0.0212                    | 29.50 | 44.47 | 22.65 | SI                       | 0.061   | 16.53 | 24.27 | 19.61 | SI        | 0.026   |
|              | Modelo c1 EP       | 9884.7         | 3.09_6.96_7.43     | 1/1.82/1.18 | ∕∕0.82 | 14.27                     | 24.77 | 23.63 | SI        | 0.0212                    | 29.50 | 44.47 | 22.65 | SI                       | 0.061   | 16.53 | 24.27 | 19.61 | SI        | 0.026   |
|              | Modelo d1 EP       | 9884.6         | 3.09_6.96_7.43     | 1/1.82/1.18 | ∕∕0.82 | 14.27                     | 24.77 | 23.63 | SI        | 0.0212                    | 29.50 | 44.47 | 22.65 | SI                       | 0.061   | 16.53 | 24.27 | 19.61 | SI        | 0.026   |
| PC.9         | Modelo 5 E         | 10017          | 3.05_6.80_7.28     | 1/1.83/1.17 | ∕∕0.83 | 14.27                     | 24.77 | 23.93 | SI        | 0.0207                    | 29.63 | 44.60 | 23.51 | SI                       | 0.060   | 16.40 | 24.07 | 20.92 | SI        | 0.024   |
|              | Modelo a5 EP       | "              | "                  | "           | "      | 14.27                     | 24.77 | 23.93 | SI        | 0.0207                    | 29.63 | 44.60 | 23.51 | SI                       | 0.060   | 16.40 | 24.07 | 20.92 | SI        | 0.024   |
|              | Modelo b5 EP       | 10014          | 3.05_6.80_7.28     | 1/1.83/1.17 | ∕∕0.83 | 14.27                     | 24.77 | 23.93 | SI        | 0.0207                    | 29.63 | 44.60 | 23.51 | SI                       | 0.060   | 16.37 | 24.07 | 20.92 | SI        | 0.024   |
|              | Modelo c5 EP       | 10014          | 3.05_6.80_7.28     | 1/1.83/1.17 | ∕∕0.83 | 14.27                     | 24.77 | 23.93 | SI        | 0.0207                    | 29.63 | 44.60 | 23.51 | SI                       | 0.060   | 16.37 | 24.07 | 20.92 | SI        | 0.024   |
| -1           | Modelo d5 EP       | 10014          | 3.05_6.80_7.28     | 1/1.83/1.17 | ∕∕0.83 | 14.27                     | 24.77 | 23.93 | SI        | 0.0207                    | 29.63 | 44.60 | 23.51 | SI                       | 0.060   | 16.37 | 24.07 | 20.92 | SI        | 0.024   |
|              | Modelo 9 E         | 10092          | 3.22_7.07_7.55     | 1/1.84/1.16 | ∕∕0.84 | 14.27                     | 24.83 | 22.47 | SI        | 0.0230                    | 29.80 | 44.80 | 21.25 | SI                       | 0.063   | 16.20 | 23.93 | 17.36 | SI        | 0.028   |
|              | Modelo a9 EP       | "              | "                  | "           | "      | 14.27                     | 24.83 | 22.47 | SI        | 0.0230                    | 29.80 | 44.80 | 21.25 | SI                       | 0.063   | 16.20 | 23.93 | 17.36 | SI        | 0.028   |
|              | Modelo b9 EP       | 10089          | 3.22_7.07_7.55     | 1/1.84/1.16 | ∕∕0.84 | 14.27                     | 24.83 | 22.47 | SI        | 0.0230                    | 29.80 | 44.80 | 21.25 | SI                       | 0.063   | 16.20 | 23.93 | 17.36 | SI        | 0.028   |
| Modelo c9 EP | 10089              | 3.22_7.07_7.55 | 1/1.84/1.16        | ∕∕0.84      | 14.27  | 24.83                     | 22.47 | SI    | 0.0230    | 29.80                     | 44.80 | 21.25 | SI    | 0.063                    | 16.20   | 23.93 | 17.36 | SI    | 0.028     |         |
| Modelo d9 EP | 10089              | 3.22_7.07_7.55 | 1/1.84/1.16        | ∕∕0.84      | 14.27  | 24.83                     | 22.47 | SI    | 0.0230    | 29.80                     | 44.80 | 21.25 | SI    | 0.063                    | 16.20   | 23.93 | 17.36 | SI    | 0.028     |         |

Tabla 4.34 Resultados para un canto de 20 cm. Paso de carga 9.

4.4.9.2 Resultados para un canto de 25 cm.

|               | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf          | Op       | Foijado 1 (25/28/17 días) |       |       |          | Foijado 2 (18/24/12 días) |       |       |       | Foijado 3 (8/11/5 días) |         |       |       |       |          |         |
|---------------|--------------------|-----------|--------------------|-------------|----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|               |                    |           |                    |             |          | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm)                   | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura?                | wk (mm) | M+CL  | M-AP  | Mcr   | ¿Fisura? | wk (mm) |
| Modelo 2 E    | J/J/27             | 11925     | 2.13_4.90_5.47     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 35.60 | NO       | -                         | 36.77 | 50.05 | 34.13 | SI                      | 0.046   | 22.81 | 30.42 | 29.54 | SI       | 0.019   |
| Modelo b2 EP  | J/J/27             | 11923     | 2.13_4.90_5.45     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 35.60 | NO       | -                         | 36.77 | 50.05 | 34.13 | SI                      | 0.046   | 22.81 | 30.42 | 29.54 | SI       | 0.019   |
| Modelo b2 EP  | J/J/27             | 11923     | 2.13_4.90_5.47     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 35.60 | NO       | -                         | 36.77 | 50.05 | 34.13 | SI                      | 0.046   | 22.81 | 30.42 | 29.54 | SI       | 0.019   |
| Modelo c2 EP  | J/J/27             | 11923     | 2.13_4.90_5.47     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 35.60 | NO       | -                         | 36.77 | 50.05 | 34.13 | SI                      | 0.046   | 22.81 | 30.42 | 29.54 | SI       | 0.019   |
| Modelo d2 EP  | J/J/52             | 11014     | 2.13_4.86_5.51     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 35.60 | NO       | -                         | 36.67 | 49.90 | 34.13 | SI                      | 0.045   | 23.18 | 30.52 | 29.54 | SI       | 0.019   |
| Modelo 6 E    | J/J/27             | 12062     | 2.10_4.79_5.36     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 36.06 | NO       | -                         | 36.98 | 50.16 | 35.43 | SI                      | 0.045   | 22.66 | 30.31 | 31.52 | NO       | -       |
| Modelo b6 EP  | J/J/27             | 12060     | 2.10_4.79_5.36     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 36.06 | NO       | -                         | 36.98 | 50.16 | 35.43 | SI                      | 0.045   | 22.66 | 30.31 | 31.52 | NO       | -       |
| Modelo b6 EP  | J/J/27             | 12060     | 2.10_4.79_5.36     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 36.06 | NO       | -                         | 36.98 | 50.16 | 35.43 | SI                      | 0.045   | 22.66 | 30.31 | 31.52 | NO       | -       |
| Modelo c6 EP  | J/J/27             | 12007     | 2.10_4.79_5.36     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 36.06 | NO       | -                         | 36.98 | 50.16 | 35.43 | SI                      | 0.045   | 22.66 | 30.31 | 31.52 | NO       | -       |
| Modelo d6 EP  | J/J/52             | 11084     | 2.10_4.75_5.41     | 1/1.76/1.24 | J/J/0.76 | 18.23                     | 30.00 | 36.06 | NO       | -                         | 36.88 | 50.00 | 35.43 | SI                      | 0.044   | 23.02 | 30.42 | 31.52 | NO       | -       |
| Modelo 10 E   | J/J/27             | 12181     | 2.22_4.98_5.56     | 1/1.77/1.23 | J/J/0.77 | 18.23                     | 30.10 | 33.86 | NO       | -                         | 37.19 | 50.42 | 32.02 | SI                      | 0.048   | 22.40 | 30.10 | 26.16 | SI       | 0.022   |
| Modelo b10 EP | J/J/27             | 12179     | 2.22_4.98_5.56     | 1/1.78/1.22 | J/J/0.78 | 18.23                     | 30.10 | 33.86 | NO       | -                         | 37.19 | 50.42 | 32.02 | SI                      | 0.048   | 22.40 | 30.10 | 26.16 | SI       | 0.022   |
| Modelo b10 EP | J/J/27             | 12179     | 2.22_4.98_5.56     | 1/1.78/1.22 | J/J/0.78 | 18.23                     | 30.10 | 33.86 | NO       | -                         | 37.19 | 50.42 | 32.02 | SI                      | 0.048   | 22.40 | 30.10 | 26.16 | SI       | 0.022   |
| Modelo c10 EP | J/J/27             | 12091     | 2.22_4.98_5.56     | 1/1.78/1.22 | J/J/0.78 | 18.23                     | 30.10 | 33.86 | NO       | -                         | 37.19 | 50.42 | 32.02 | SI                      | 0.048   | 22.40 | 30.10 | 26.16 | SI       | 0.022   |
| Modelo d10 EP | J/J/52             | 11174     | 2.22_4.94_5.61     | 1/1.77/1.23 | J/J/0.77 | 18.23                     | 30.10 | 33.86 | NO       | -                         | 37.08 | 50.21 | 32.02 | SI                      | 0.048   | 22.76 | 30.21 | 26.16 | SI       | 0.023   |

Tabla 4.35 Resultados para un canto de 25 cm. Paso de carga 9.

4.4.9.3 Resultados para un canto de 30 cm.

|   | Puntal más cargado | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf          | Gp     | Forjado 1 (25/28/17 días) |       |       |          | Forjado 2 (18/24/12 días) |       |       |       | Forjado 3 (8/11/5 días) |         |       |       |       |          |         |
|---|--------------------|-----------|--------------------|-------------|--------|---------------------------|-------|-------|----------|---------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|---------|
|   |                    |           |                    |             |        | M-F                       | AP    | IMcr  | ¿Fisura? | wk (mm)                   | M-F   | AP    | IMcr  | ¿Fisura?                | wk (mm) | M-F   | AP    | IMcr  | ¿Fisura? | wk (mm) |
| 0 | Modelo 3 E         | 13443     | 1.64_3.79_4.43     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 49.37 | NO       | -                         | 43.88 | 54.38 | 47.33 | SI                      | 0.0327  | 30.15 | 36.60 | 40.97 | NO       | -       |
|   | Modelo b3 EP       | 13441     | 1.64_3.79_4.43     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 49.37 | NO       | -                         | 43.88 | 54.38 | 47.33 | SI                      | 0.0327  | 30.15 | 36.60 | 40.97 | NO       | -       |
|   | Modelo b3 EP       | 13441     | 1.64_3.79_4.43     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 49.37 | NO       | -                         | 43.88 | 54.38 | 47.33 | SI                      | 0.0327  | 30.15 | 36.60 | 40.97 | NO       | -       |
|   | Modelo c3 EP       | 12527     | 1.64_3.77_4.45     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 49.37 | NO       | -                         | 43.88 | 54.23 | 47.33 | SI                      | 0.0325  | 30.15 | 36.60 | 40.97 | NO       | -       |
|   | Modelo d3 EP       | 11740     | 1.64_3.69_4.34     | 1/1.68/1.32 | 1/0.68 | 22.50                     | 34.58 | 49.37 | NO       | -                         | 43.35 | 53.55 | 47.33 | SI                      | 0.0316  | 31.80 | 37.13 | 40.97 | NO       | -       |
|   | Modelo 7 E         | 13574     | 1.62_3.70_4.35     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 50.01 | NO       | -                         | 44.18 | 54.38 | 49.13 | SI                      | 0.0311  | 30.00 | 36.60 | 43.71 | NO       | -       |
|   | Modelo b7 EP       | 13572     | 1.62_3.70_4.35     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 50.01 | NO       | -                         | 44.18 | 54.38 | 49.13 | SI                      | 0.0311  | 30.00 | 36.60 | 43.71 | NO       | -       |
|   | Modelo c7 EP       | 12636     | 1.62_3.69_4.37     | 1/1.70/1.30 | 1/0.70 | 22.50                     | 34.58 | 50.01 | NO       | -                         | 44.03 | 54.30 | 49.13 | SI                      | 0.0310  | 30.00 | 36.60 | 43.71 | NO       | -       |
|   | Modelo d7 EP       | 11769     | 1.62_3.61_4.46     | 1/1.69/1.31 | 1/0.69 | 22.50                     | 34.58 | 50.01 | NO       | -                         | 43.43 | 53.55 | 49.13 | SI                      | 0.0300  | 31.65 | 37.13 | 43.71 | NO       | -       |
|   | Modelo 11 E        | 13743     | 1.70_3.86_4.51     | 1/1.71/1.29 | 1/0.71 | 22.50                     | 34.65 | 46.95 | NO       | -                         | 44.48 | 54.68 | 44.40 | SI                      | 0.0356  | 29.70 | 36.30 | 36.27 | SI       | 0.0177  |
|   | Modelo b11 EP      | 13742     | 1.70_3.86_4.51     | 1/1.71/1.29 | 1/0.71 | 22.50                     | 34.65 | 46.95 | NO       | -                         | 44.48 | 54.75 | 44.40 | SI                      | 0.0357  | 29.70 | 36.30 | 36.27 | SI       | 0.0177  |
|   | Modelo c11 EP      | 12778     | 1.70_3.84_4.53     | 1/1.71/1.29 | 1/0.71 | 22.50                     | 34.65 | 46.95 | NO       | -                         | 44.33 | 54.60 | 44.40 | SI                      | 0.0355  | 29.70 | 36.45 | 36.27 | SI       | 0.0179  |
|   | Modelo d11 EP      | 11825     | 1.70_3.75_4.64     | 1/1.69/1.31 | 1/0.69 | 22.50                     | 34.65 | 46.95 | NO       | -                         | 43.65 | 53.78 | 44.40 | SI                      | 0.0344  | 31.50 | 36.98 | 36.27 | SI       | 0.0187  |

Tabla 4.36 Resultados para un canto de 30 cm. Paso de carga 9.

4.4.9.4 Resultados para un canto de 35 cm.

|        | Puntal más cargado. | Carga (N) | Máxima flecha (mm) | Cf             | Cp       | Forjado 1 (25/28/17 días) |       |       |          |         | Forjado 2 (18/24/12 días) |       |       |          |         | Forjado 3 (8/11/5 días) |       |       |          |         |
|--------|---------------------|-----------|--------------------|----------------|----------|---------------------------|-------|-------|----------|---------|---------------------------|-------|-------|----------|---------|-------------------------|-------|-------|----------|---------|
|        |                     |           |                    |                |          | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | zFisura? | wk (mm) | M+CL                      | M-AP  | Mcr   | zFisura? | wk (mm) | M+CL                    | M-AP  | Mcr   | zFisura? | wk (mm) |
| 0      | Modelo 4 E          | 14573     | 1.35_3.11_3.80     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.49 | 64.61 | NO       | -       | 50.94                     | 58.09 | 61.94 | NO       | -       | 38.38                   | 42.67 | 53.62 | NO       | -       |
|        | Modelo a4 EP        | 14571     | 1.35_3.11_3.80     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.49 | 64.61 | NO       | -       | 50.94                     | 58.09 | 61.94 | NO       | -       | 38.38                   | 42.67 | 53.62 | NO       | -       |
|        | Modelo b4 EP        | 14047     | 1.35_3.11_3.81     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.49 | 64.61 | NO       | -       | 50.84                     | 58.09 | 61.94 | NO       | -       | 38.49                   | 42.67 | 53.62 | NO       | -       |
|        | Modelo c4 EP        | 12995     | 1.36_3.08_3.84     | 1.00/1.64/1.36 | ✓/✓/0.64 | 27.15                     | 38.49 | 64.61 | NO       | -       | 50.53                     | 57.78 | 61.94 | NO       | -       | 38.89                   | 42.88 | 53.62 | NO       | -       |
|        | Modelo d4 EP        | 11782     | 1.36_3.00_3.93     | 1.00/1.61/1.39 | ✓/✓/0.61 | 27.26                     | 38.38 | 64.61 | NO       | -       | 49.10                     | 56.86 | 61.94 | NO       | -       | 41.24                   | 43.69 | 53.62 | NO       | -       |
| PC9 +1 | Modelo 8 E          | 14689     | 1.34_3.04_3.74     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.38 | 65.45 | NO       | -       | 51.14                     | 57.98 | 62.30 | NO       | -       | 38.28                   | 42.67 | 57.21 | NO       | -       |
|        | Modelo a8 EP        | 14687     | 1.34_3.04_3.74     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.38 | 65.45 | NO       | -       | 51.14                     | 57.98 | 62.30 | NO       | -       | 38.28                   | 42.67 | 57.21 | NO       | -       |
|        | Modelo b8 EP        | 14145     | 1.34_3.04_3.75     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.38 | 65.45 | NO       | -       | 51.04                     | 57.98 | 62.30 | NO       | -       | 38.28                   | 42.67 | 57.21 | NO       | -       |
|        | Modelo c8 EP        | 13060     | 1.34_3.01_3.77     | 1.00/1.64/1.36 | ✓/✓/0.64 | 27.26                     | 38.38 | 65.45 | NO       | -       | 50.74                     | 57.78 | 62.30 | NO       | -       | 38.79                   | 42.88 | 57.21 | NO       | -       |
|        | Modelo d8 EP        | 11821     | 1.34_2.94_3.87     | 1.00/1.62/1.38 | ✓/✓/0.62 | 27.26                     | 38.38 | 65.45 | NO       | -       | 49.31                     | 56.76 | 62.30 | NO       | -       | 41.04                   | 43.69 | 57.21 | NO       | -       |
| -1     | Modelo 12 E         | 14906     | 1.41_3.17_3.88     | 1.00/1.66/1.34 | ✓/✓/0.66 | 27.15                     | 38.49 | 61.44 | NO       | -       | 51.45                     | 58.39 | 58.11 | SI       | 0.0244  | 37.77                   | 42.47 | 47.47 | NO       | -       |
|        | Modelo a12 EP       | 14904     | 1.41_3.17_3.88     | 1.00/1.66/1.34 | ✓/✓/0.66 | 27.15                     | 38.49 | 61.44 | NO       | -       | 51.45                     | 58.39 | 58.11 | SI       | 0.0244  | 37.77                   | 42.47 | 47.47 | NO       | -       |
|        | Modelo b12 EP       | 14365     | 1.41_3.17_3.89     | 1.00/1.66/1.34 | ✓/✓/0.66 | 27.15                     | 38.49 | 61.44 | NO       | -       | 51.35                     | 58.39 | 58.11 | SI       | 0.0244  | 37.87                   | 42.47 | 47.47 | NO       | -       |
|        | Modelo c12 EP       | 13092     | 1.41_3.14_3.92     | 1.00/1.65/1.35 | ✓/✓/0.65 | 27.15                     | 38.49 | 61.44 | NO       | -       | 51.04                     | 58.19 | 58.11 | SI       | 0.0241  | 38.49                   | 42.67 | 47.47 | NO       | -       |
|        | Modelo d12 EP       | 11857     | 1.41_3.06_4.03     | 1.00/1.62/1.38 | ✓/✓/0.62 | 27.15                     | 38.49 | 61.44 | NO       | -       | 49.41                     | 57.06 | 58.11 | NO       | -       | 40.83                   | 43.49 | 47.47 | NO       | -       |

Tabla 4.37 Resultados para un canto de 35 cm. Paso de carga 9.

## **4.5 Análisis de resultados y conclusiones obtenidas**

El objetivo de este apartado es realizar una recopilación del análisis de resultados realizado perteneciente al análisis paramétrico del modelo numérico de un edificio construido exclusivamente con fines experimentales. Como ya se ha mencionado anteriormente, de esta forma, se obtienen conclusiones más fidedignas puesto que las condiciones de proyecto, ejecución de la obra y recogida de datos han sido controladas al mínimo detalle de forma mucho más minuciosa que en otras circunstancias.

Además, en este apartado, también se pretende obtener conclusiones desde un punto de vista más general de toda la fase de construcción y no centrado en cada paso de carga como se ha realizado hasta el momento. De esta forma, se concluirá la sección dedicada al edificio experimental y se procederá, en posteriores capítulos, a aplicar esta técnica al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia para poder observar como es completamente viable.

### ***4.5.1 Conclusiones relativas al estudio por el MEF del edificio experimental***

En los anteriores apartados se ha desarrollado un estudio por el método de los EF para determinar la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales durante la construcción de edificios de forjados sucesivos de hormigón in situ.

Del estudio por el método de los elementos finitos se concluye:

- ✓ El paso de carga más crítico para la carga asumida por los puntales se corresponde con el tercero (Hormigonado del forjado 2). Debido a ello, la mayor influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales aparece en la primera planta de este paso de carga.
- ✓ El paso de carga más crítico para la carga asumida por los forjados se corresponde con el noveno (Descimbrado del forjado 2). El forjado que más carga asume es el forjado 2.
- ✓ Debido a variar los intervalos de tiempo entre pasos de carga, la carga máxima de los puntales varía, aumentando si los intervalos disminuyen y viceversa. Sin embargo, la influencia de este factor es pequeña.
- ✓ En principio, para cantos de forjado mayores, la carga asumida por éstos es mayor, a no ser que el reparto de cargas en el sistema completo cimbra-estructura le haga llegar menos carga a algún forjado en particular. Las flechas, para este caso, también disminuyen de forma considerable debido a la mayor rigidez del forjado.
- ✓ A medida que se imponen niveles de plastificación en puntales más restrictivos (menores valores de  $f_y$ ) mayor es el número de puntales que pasan a tener un comportamiento plástico debido al elemento de control de carga puesto que existe una redistribución clara de cargas a través del forjado desde el puntal más cargado en la hipótesis elástico y lineal hasta los pilares.
- ✓ Los aumentos del coeficiente de forjado ( $C_f$ ) y de las máximas flechas debido a imponer niveles de plastificación más restrictivos son muy pequeños. Para los cantos más pequeños, en porcentaje, el coeficiente de forjado ha aumentado del orden de la mitad que el descenso de la carga máxima en puntales. Para cantos mayores, el aumento aún es menor, llegando a ser del orden de la cuarta parte. Respecto a las flechas ocurre algo similar. Para los cantos más

pequeños han aumentado del orden de los 0'6 mm. y para cantos mayores el aumento ha sido menor llegando a valores de 0'35 mm., para los casos más restrictivos.

- ✓ En el caso de dos juegos de puntales, el elemento de control de carga en puntales solo ha intervenido en el paso de carga 3. Al simular un cuarto forjado y tres juegos de puntales, la carga de estos ha aumentado y ha vuelto a aparecer la influencia del elemento de control de carga (Ver pasos de carga 8 y 9).
- ✓ La fisuración es debida a que la edad del hormigón no es suficiente como para poder resistir los esfuerzos que aparecen sin fisurar. Para cantos de forjado mayores, la fisuración se reduce de forma considerable llegando incluso a no producirse.
- ✓ La fisuración existente en los diversos modelos analizados cumple con la normativa al tener una abertura de fisura mucho menor al límite establecido y se produce en una zona muy restringida y siendo muy reducida.
- ✓ La fisuración no ha sido ocasionada por la influencia del elemento de control de carga en puntales puesto que no aparece hasta el quinto paso de carga en donde la influencia del elemento de control de carga que aparecía en el paso de carga 3 es despreciable. Es despreciable debido a que el comportamiento de los forjados que no han fisurado hasta el paso de carga 5 es elástico y lineal y al producirse el descimbrado del forjado 1 abandonamos la influencia de los elementos con comportamiento no lineal. Es una situación deseable para tener restringida la influencia de este factor solo en los pasos de carga 3 y 4.
- ✓ Debido a la influencia del elemento de control de carga en puntales se gana en Seguridad puesto que se consigue la redistribución de cargas máximas en puntales y, bajo condiciones controladas, sin producir fisuración en el forjado. Además, se gana en seguridad frente a acciones imprevistas y/o accidentales como por ejemplo: fallo de un puntal, sobrecargas inesperadas, acciones humanas, etc.
- ✓ Debido a la influencia del elemento de control de carga en puntales se gana en Economía puesto que permite optimizar los costes de ejecución de los forjados al poder emplear sistemas de apuntalamiento que tengan menores capacidades resistentes.
- ✓ Debido a la influencia del elemento de control de carga en puntales se gana en Eficiencia Estructural puesto que permite la redistribución de cargas máximas en puntales y ello conlleva a un aprovechamiento mayor de la resistencia de todos ellos. Recordemos que el diseño del sistema de apuntalamiento tradicionalmente se realiza en base a la carga máxima del puntal más cargado. Con la introducción del elemento de control de carga en puntales se realizaría en base a una proporción de la carga máxima del puntal más cargado, y como se ha visto, un grupo de puntales se verían sometidos a dicha proporción de carga y, en conjunto, cada uno de ellos aprovecharía más su resistencia estructural.

# **CAPÍTULO 5. APLICACIÓN AL EDIFICIO DE LA FACULTAD DE BELLAS ARTES DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**

## **5.1 Introducción**

En este capítulo se pretende realizar la aplicación del elemento de control de carga en puntales a un edificio existente con la finalidad de mejorar la fase de construcción. De esta forma, se podrá observar de forma práctica su aplicabilidad y las diversas mejoras introducidas, objetivo del presente Proyecto Fin de Carrera. Para ello, se volverá a utilizar un modelo basado en el método de los elementos finitos donde se podrán obtener conclusiones similares a las obtenidas para el edificio experimental.

## **5.2 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, 0'14 m. de ancho de nervio y 0'8 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 m<sup>2</sup>. Además en la planta de sótano se proyectaron muros de sótano de 40 cm. de espesor. La altura entre plantas es variable siendo de 3 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.

### 5.3 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. 5.1).

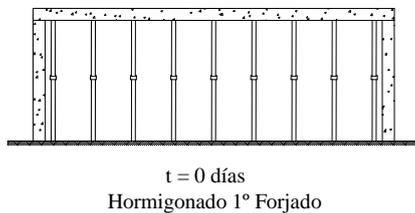


Fig. 5.1 Proceso constructivo día “0”

- ✓ 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. 5.2). 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.

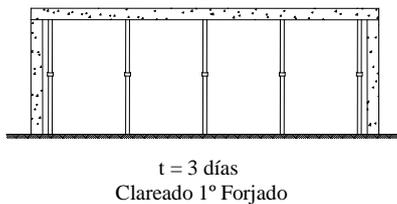


Fig. 5.2 Proceso constructivo día “3”

- ✓ Día “7”: una vez preparado el sistema de encofrado y cimbrado de la segunda planta se ejecutó su hormigonado (véase Fig. 5.3).

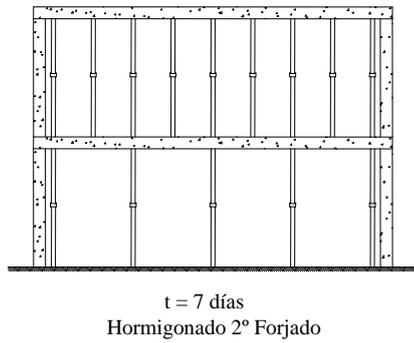


Fig. 5.3 Proceso constructivo día "7"

- ✓ 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. 5.4).

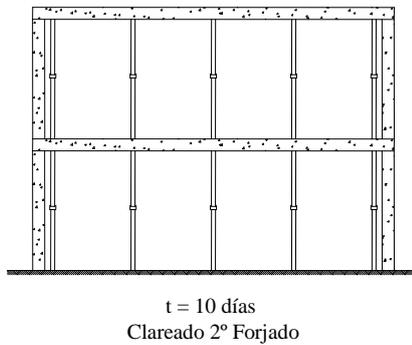


Fig. 5.4 Proceso constructivo día "10"

- ✓ Día "11": en esta fase se procede al descimbrado total de la primera planta (véase Fig. 5.5).

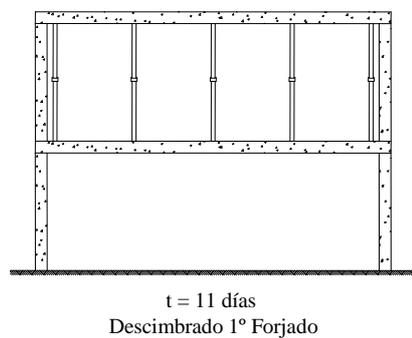


Fig. 5.5 Proceso constructivo día "11"

- ✓ Día “14”: una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procede a hormigonar el tercer forjado (véase Fig. 5.6).

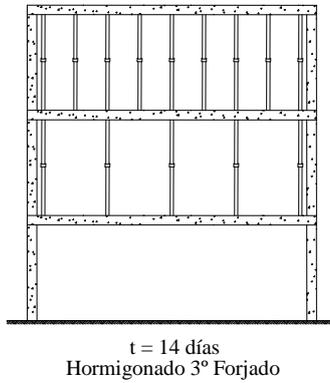


Fig. 5.6 Proceso constructivo día “14”

- ✓ Día “17”: en esta fase se procede al clareado de puntales de la tercera planta (véase Fig. 5.7).

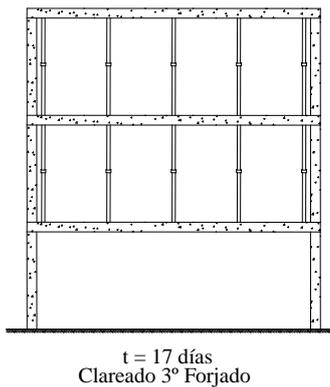


Fig. 5.7 Proceso constructivo día “17”

- ✓ Día “18”: se efectúa el descimbrado total de la segunda planta (véase Fig. 5.8).

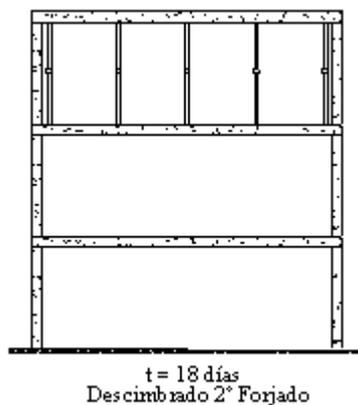


Fig. 5.8 Proceso constructivo día “18”

- ✓ Día “21”: una vez instalado el sistema de encofrado y cimbrado se procede a hormigonar el cuarto forjado (véase Fig. 5.9).

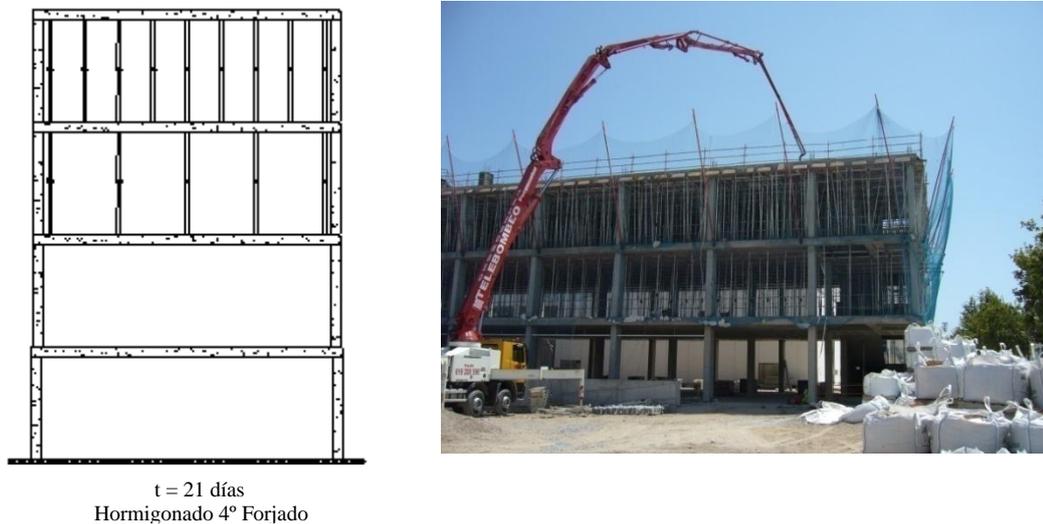


Fig. 5.9 Proceso constructivo día “21”

- ✓ De la misma forma seguirían los pasos de carga hasta llegar a descimbrar el forjado 6 (Paso de carga 20). Aquí, se ha limitado hasta el hormigonado del forjado cuatro porque los estados críticos para puntales y forjados se producirán en el momento de hormigonar el 2º forjado y al hormigonar el cuarto respectivamente como ya se ha comentado para el edificio experimental. Como se verá más adelante, el modelo de elementos finitos también se ha limitado a estos pasos de carga.

## 5.4 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 3.4. del presente Proyecto Fin de Carrera). 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 80 cm.

## 5.5 Modelo de elementos finitos

Partiendo de las características geométricas y mecánicas de cada uno de los elementos que intervienen en la construcción del edificio, en el presente capítulo se lleva a cabo el desarrollo de un modelo tridimensional por el MEF. El desarrollo del modelo de EF pretende simular la influencia de elementos de control de carga en la redistribución de cargas máximas en puntales, en un proceso de

cimbrado, clareado y descimbrado. En este modelo no se han considerado los efectos de los cambios de temperatura aunque si la variación de las propiedades del hormigón.

Para el desarrollo del modelo de EF se emplean hipótesis que serán tratadas con detalle en los apartados posteriores. Es de destacar que la hipótesis más importante se basa en simular a los puntales como elementos de rigidez finita. Esta hipótesis es básica para simular la reducción de rigidez del sistema de cimbrado que se origina al retirar el 50% de los puntales dentro del proceso de clareado.

Para realizar el cálculo evolutivo que implica el proceso constructivo del edificio, se ha empleado la opción “Birth and Death” y el comando MPCHG disponibles en ANSYS 11.0 (2007). Los aspectos más relevantes del funcionamiento de ANSYS 11.0 (2007) se detallan en los siguientes apartados.

### **5.5.1 Hipótesis del modelo de EF**

El modelo de EF descrito en este Capítulo pretende simular el edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia. Así, las características geométricas de los elementos que forman el modelo son las que se describen en los anteriores apartados. De la misma forma, el proceso constructivo se ha modelado según el proceso descrito anteriormente.

Definidas las características y el proceso constructivo del edificio a modelar se adoptarán las siguientes hipótesis:

- ✓ Se asume un comportamiento elástico y lineal del forjado de hormigón armado, considerando la variación de su rigidez con respecto al tiempo. Para evaluar la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados en el tiempo, se usa la técnica de la madurez. Esta técnica permite, mediante la medida de la temperatura del hormigón y el tiempo, evaluar la evolución de cualquier parámetro en tiempo real. En el Apéndice III se muestra el proceso de cálculo para estimar la evolución diaria del módulo de elasticidad del hormigón de cada uno de los forjados.
- ✓ Los pilares apantallados son considerados como elementos tipo “Shell” de 35 cm. de espesor. Se asume que éstos tienen un comportamiento elástico y lineal y se considera la variación de su rigidez con respecto al tiempo.
- ✓ Los muros de sótano son considerados como elementos tipo “Shell”. Se asume que éstos tienen un comportamiento elástico y lineal.
- ✓ Los puntales de acero son considerados como soportes de rigidez finita, apoyados en sus extremos. Sus características principales se muestran en la Tabla 5.1. El valor del módulo de elasticidad es el obtenido en el apartado 3.5 del Capítulo 3 del presente proyecto.

Tabla 5.1 Características geométricas y mecánicas de los puntales considerados en el modelo

| Longitud (m) | Diámetro del cuerpo (mm) | Espesor cuerpo (mm) | Módulo de elasticidad (GPa) |
|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Variable     | 48                       | 2                   | 210                         |

Para modelar el elemento de control de carga adyacente a la parte superior de los puntales simplemente se necesita incorporar un comportamiento idealizado elasto-plástico perfecto

al puntal. De esta forma, el comportamiento del puntal modelado es idéntico al comportamiento del puntal más el elemento de control de carga adyacente.

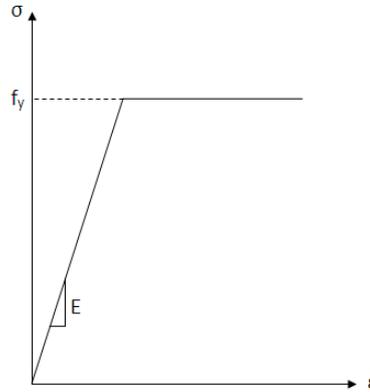


Fig. 5.10 Respuesta elasto-plástica del puntal modelado

- ✓ Los tableros de encofrado son considerados como elementos con un comportamiento elástico y lineal y de rigidez finita. Dichos tableros son de madera y sus propiedades son las proporcionadas por la casa de encofrados ALSINA. Se muestran en la Tabla 5.2 las características del encofrado empleadas en el desarrollo del modelo de EF.

Tabla 5.2 Características geométricas y mecánicas de los tableros de encofrado considerados en el modelo

| Espesor<br>(mm) | Módulo de<br>elasticidad (GPa) |
|-----------------|--------------------------------|
| 27              | 10                             |

- ✓ La cimentación se considera infinitamente rígida. Esta hipótesis se adopta a partir de establecer que el conjunto de puntales del forjado 1 apoyan directamente sobre la losa de cimentación que está diseñada con el suficiente canto para que la hipótesis sea válida.
- ✓ 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.

### 5.5.2 Descripción del modelo de elementos finitos

El modelo de EF se ha realizado con el software comercial ANSYS 11 (2007). Para la discretización de cada una de las partes de la estructura se utilizaron EF tipo SHELL, BEAM y LINK. En los apartados siguientes se explica el tipo y el uso de cada uno de estos elementos. De igual forma se describe como se simula el proceso de cálculo evolutivo del edificio.

#### 5.5.2.1 Tipos de EF y mallado empleado

Los muros de sótano y los pilares apantallados se modelizan mediante elementos bidimensionales SHELL63 (ANSYS, 2007). Este elemento está formado por 4 nodos, con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z) y un espesor "h". El elemento SHELL63 admite realizar un cálculo evolutivo mediante el uso de la opción Birth and Death y el comando MPCHG, que

permiten considerar la aparición de nuevos elementos en el cálculo y variar las propiedades de los materiales en el tiempo respectivamente. Estas opciones se han explicado con detalle en anteriores apartados (véase apartado 3.6.2.2). La figura 5.11 incluye la geometría y localización de los nodos del elemento.

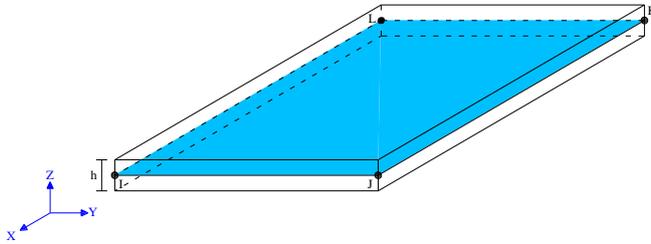


Fig. 5.11 Elemento SHELL63 (ANSYS 11.0 2007)

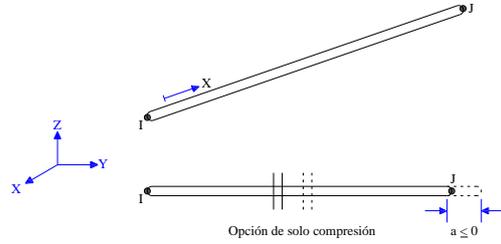


Fig. 5.12 Elemento LINK1 (ANSYS 11.0 2007)

El tamaño de la malla está condicionado por sus dimensiones y por la distribución espacial de los componentes del sistema de cimbrado y encofrado así como de los forjados. Así, buscando simular con un alto grado de aproximación las características de la estructura, el tamaño de malla de EF para los dos elementos en cuestión es de  $0.20 \times 0.20 \text{ m}^2$ .

Los puntales metálicos se modelizan mediante elementos unidimensionales de 2 nodos tipo LINK1 con 3 grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z). El elemento LINK1 también permite el empleo de la opción Birth and Death que posibilita, para el caso de los puntales, modelar las operaciones de cimbrado, clareado y descimbrado. La figura 5.12 muestra la geometría y disposición de los nodos del elemento.

Para modelizar el encofrado y el emparillado de nervios que constituye el forjado reticular se emplean elementos tipo BEAM44. El elemento BEAM44 tiene dos nodos (I, J) y un tercer nodo opcional (K) que define la orientación del elemento (en el presente análisis se ha prescindido de emplear dicho nodo). Este elemento cuenta con 6 grados de libertad por nodo (traslaciones y giros en X, Y, Z). Al igual que el resto de elementos empleados en el modelo de EF, el elemento BEAM44 admite la opción Birth and Death y el comando MPCHG. En la figura 5.13 se observa la geometría y disposición de los nodos de dicho elemento.

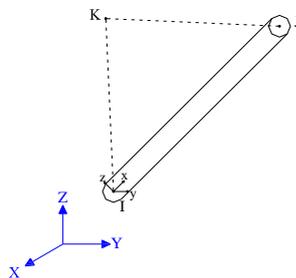


Fig. 5.13 Elemento BEAM44 (ANSYS 11.0 2007)

La sección transversal de dichos elementos variará dependiendo de si pertenece a la zona de ábacos o no. De esta forma, aparecen 4 distintas posibilidades de sección transversal que se pueden observar en las siguientes figuras:

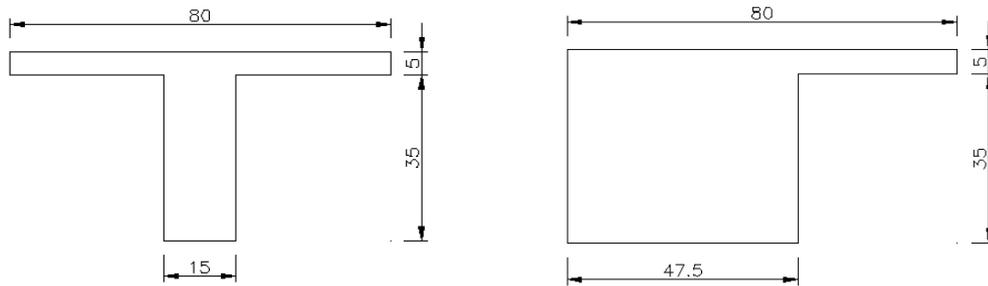


Fig. 5.14 Sección transversal convencional y con el ábaco a la izquierda. Dimensiones en cm.

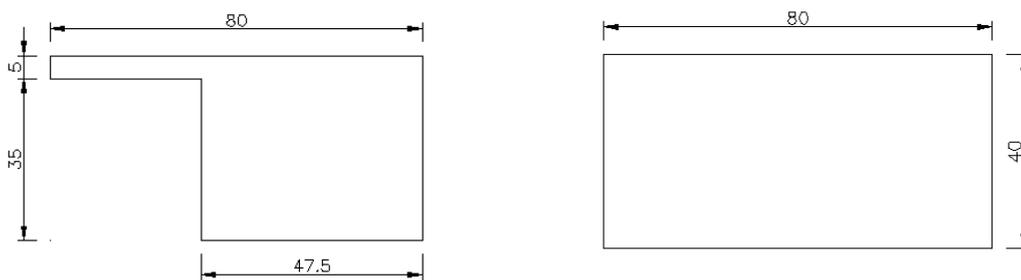


Fig. 5.15 Sección transversal con el ábaco a la derecha y del interior ábaco. Dimensiones en cm.

### 5.5.2.2 Desarrollo del modelo

El modelo a desarrollar consiste en una estructura de carácter evolutivo. Más concretamente, se trata de una estructura en donde las condiciones de apoyo, y las características de los materiales, son cambiantes con el tiempo. Se ha decidido modelar solamente media planta debido a las condiciones de simetría existentes (Ver Apéndice I. Planos).

El cálculo evolutivo en ANSYS 11.0 (2007) se hace en diferentes pasos de carga (Load Steps). Un paso de carga consiste en calcular la estructura con la geometría y las propiedades de los materiales correspondientes a cada una de las fases constructivas consideradas. Así, una vez resuelto el primer paso de carga, el cálculo de un segundo paso parte de los valores de deformación y esfuerzos obtenidos en el primero. De esta forma, se consigue realizar un cálculo evolutivo considerando tantos pasos de carga como fases de construcción del edificio. Para conseguir esto, ANSYS 11.0 (2007) dispone de las opciones Birth and Death y el comando MPCHG explicadas en el apartado 3.6.2.2. del Capítulo 3 del presente Proyecto Fin de Carrera.

El proceso de modelado de la estructura está compuesto por tres fases. La primera fase o pre-proceso consiste en definir el tipo de EF, las características de los materiales, la geometría y mallado de la estructura y la aplicación de las cargas en los elementos. En esta fase se define completamente el modelo de EF, definiendo los forjados, pilares y la estructura provisional de apuntalamiento y encofrado. La figura 6.16 muestra la estructura modelada una vez terminado el pre-proceso.

La segunda fase, consiste en resolver los distintos pasos de carga correspondientes con las fases constructivas. A continuación se explican cada uno de los pasos de carga del modelo de EF:

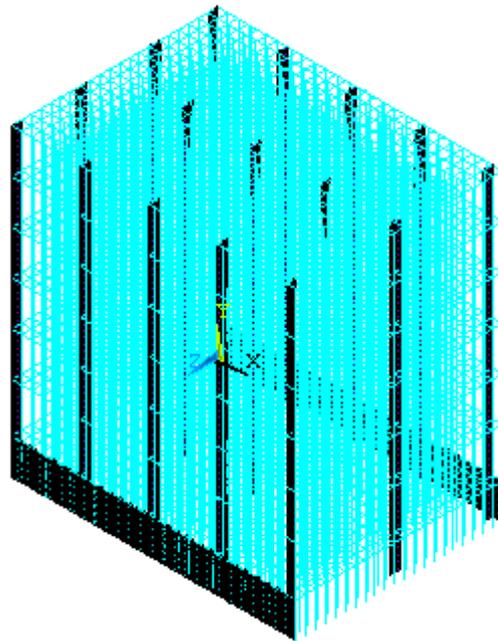
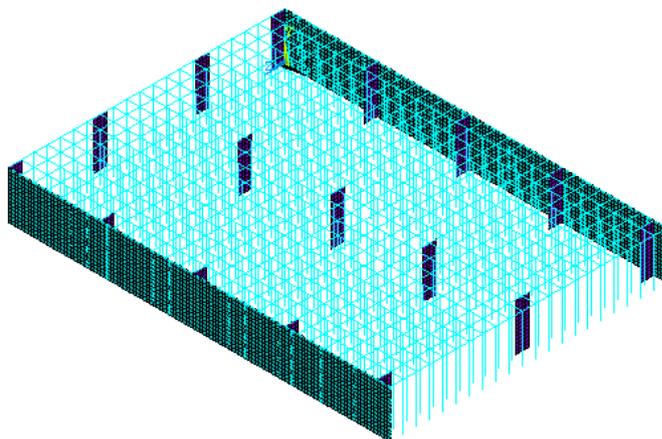


Fig. 5.16 Vista tridimensional del modelo de elementos finitos

- a. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1). El cálculo de este paso de carga consiste en desactivar los elementos de los forjados superiores, incluida su estructura temporal, dejando solo activados los elementos del forjado 1 con su sistema de cimbrado. La Figura 5.17 muestra una vista tridimensional del modelo de EF y las propiedades de los materiales considerados para cada elemento.



Módulo de elasticidad del hormigón F+01      0.00 GPa

Módulo de elasticidad del hormigón de los pilares F+01      27.47 GPa (12 días)

Fig. 5.17 Hormigonado del forjado 1

- b. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1). Para el cálculo de éste paso de carga se desactivan los elementos del encofrado con sus correspondientes puntales. El módulo de elasticidad del hormigón de los forjados y pilares es modificado por el que corresponde, según la edad del hormigón, al instante de realizar dicha operación de clareado. La Figura 5.18 muestra una vista en tres dimensiones del modelo de EF y las propiedades de los elementos de hormigón.

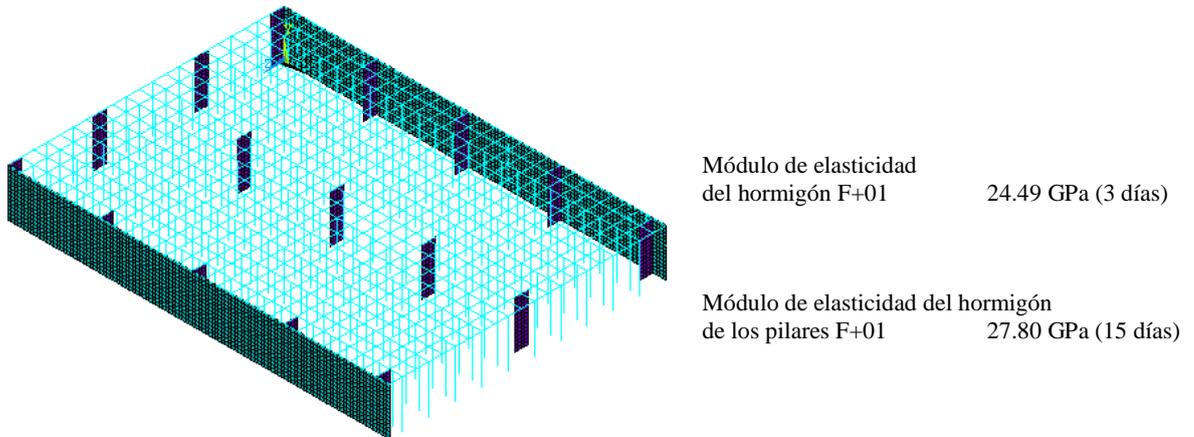


Fig. 5.18 Clareado del forjado 1

- c. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2). En este paso de carga se activan el conjunto de elementos del forjado 2 incluidos pilares, encofrado y puntales. Los módulos de elasticidad de los pilares y del forjado 1 se modifican según la edad de dichos elementos en el instante de realizar el hormigonado del forjado 2. La Figura 5.19 muestra una vista tridimensional del modelo de EF y las propiedades de los materiales considerados para cada elemento.

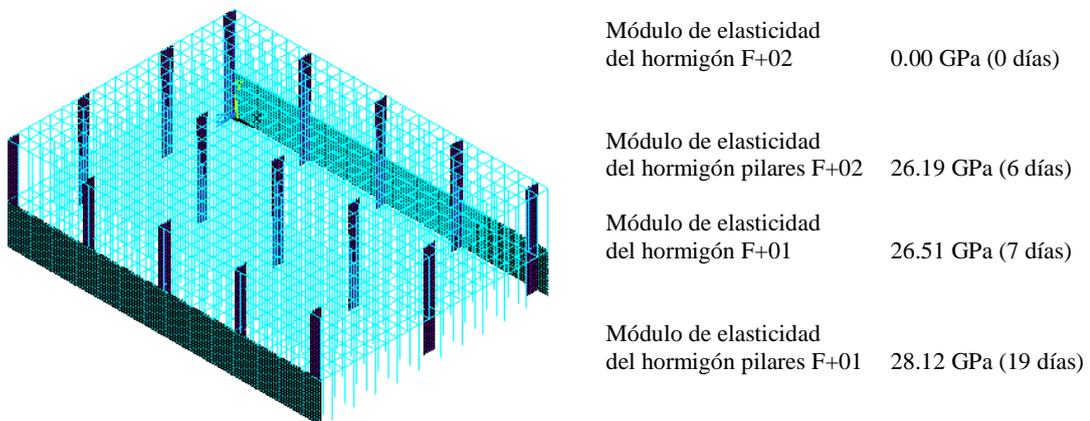
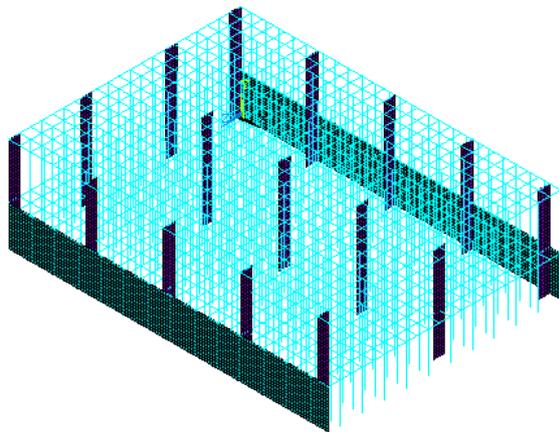


Fig. 5.19 Hormigonado del forjado 2

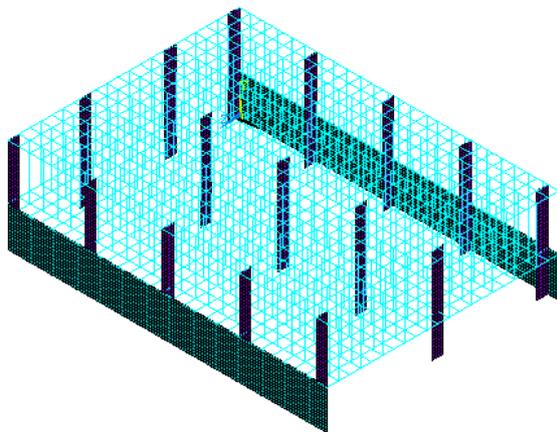
- d. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2). El cálculo del paso de carga 4 consiste en evaluar el comportamiento de la estructura teniendo los forjados 1 y 2 clareados. Para éste cálculo se desactivan el encofrado con sus correspondientes puntales del sistema de cimbrado del forjado 2. La Figura 5.20 muestra el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón según su edad.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 24.49 GPa (3 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 26.98 GPa (9 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 27.17 GPa (10 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 28.30 GPa (22 días) |

Fig. 5.20 Clareado del forjado 2

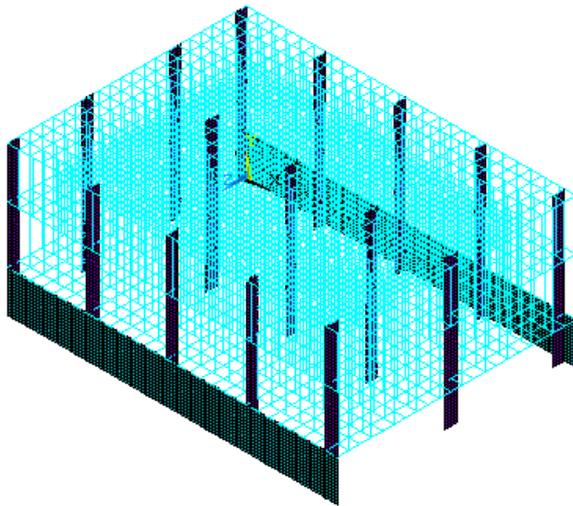
- e. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1). En este paso de carga se desactivan los puntales bajo el forjado 1, quedando tan solo los puntales bajo el forjado 2. Las propiedades de los elementos de hormigón evolucionan de acuerdo a su edad. En la Figura 5.21 se observa el modelo de EF que se corresponde al descimbrado del forjado 1.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 25.25 GPa (4 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 27.17 GPa (10 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 27.33 GPa (11 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 28.35 GPa (23 días) |

Fig. 5.21 Descimbrado del forjado 1

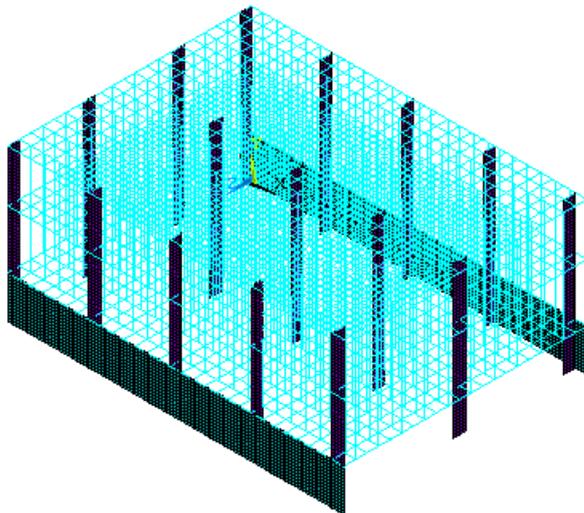
- f. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3). Partiendo del modelo de EF del paso de carga 5, en el modelo del paso de carga 6 se activan los elementos del forjado 3 incluyendo sus pilares y su sistema de cimbrado. De la misma forma que en los pasos de carga anteriores, los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón evolucionan para la edad de cada uno de estos en el momento del hormigonado del forjado 3. La Figura 5.22 muestra el modelo de EF considerado en este paso de carga.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 0.00 GPa (0 días)   |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 25.79 GPa (5 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 26.51 GPa (7 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 27.59 GPa (13 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 27.70 GPa (14 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 28.49 GPa (26 días) |

Fig. 5.22 Hormigonado del forjado 3

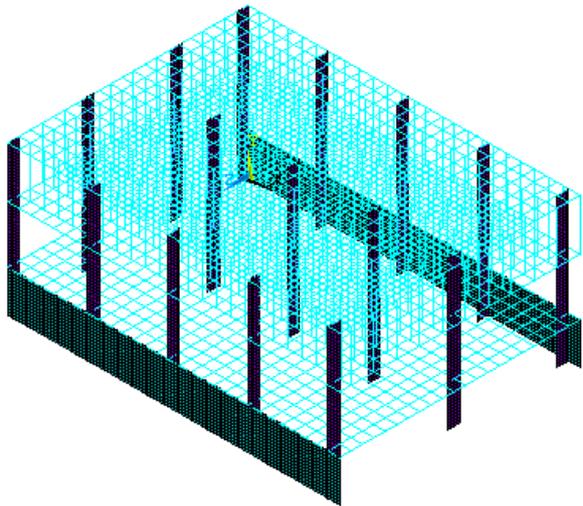
- g. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3). Para el cálculo de éste paso de carga se desactivan el encofrado y los puntales, simulando de ésta forma el clareado del tercer forjado. La Figura 5.23 muestra el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón para el momento del clareado del forjado 3.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 24.49 GPa (3 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 26.77 GPa (8 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 27.17 GPa (10 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 27.89 GPa (16 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 27.97 GPa (17 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 28.57 GPa (28 días) |

Fig. 5.23 Clareado del forjado 3

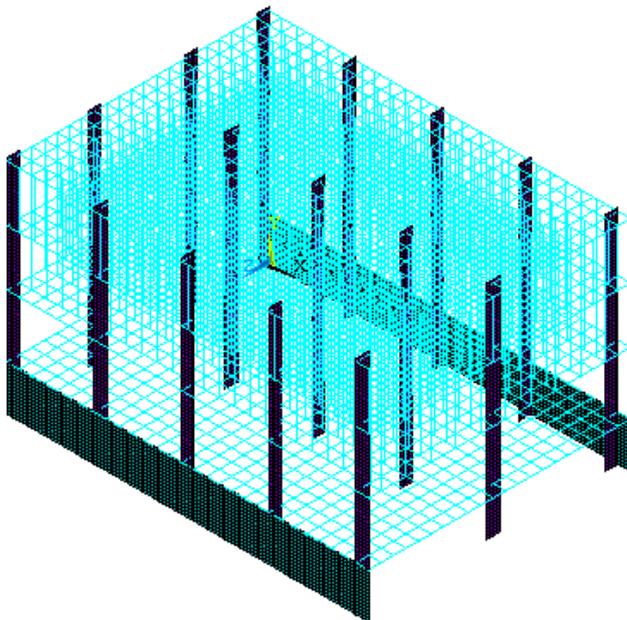
- h. Paso de carga 8 (Descimbrado del forjado 2). Este paso de carga consiste en el descimbrado del forjado 2. Para simular éste proceso se desactivan los puntales bajo el forjado 2. En la Figura 5.24 se observa el modelo de EF y los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón para el paso de carga 8.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 25.25 GPa (4 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 26.98 GPa (9 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 27.33 GPa (11 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 27.97 GPa (17 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 28.05 GPa (18 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 28.57 GPa (28 días) |

Fig. 5.24 Descimbrado del forjado 2

- i. Paso de carga 9 (Hormigonado del forjado 4). Partiendo del modelo de EF del paso de carga 8, en el modelo del paso de carga 9 se activan los elementos del forjado 4 incluyendo sus pilares y su sistema de cimbrado. De la misma forma que en los pasos de carga anteriores, los módulos de elasticidad de los elementos de hormigón evolucionan para la edad de cada uno de estos en el momento del hormigonado del forjado 4. La Figura 5.25 muestra el modelo de EF considerado en este paso de carga.



|   |                     |
|---|---------------------|
| Módulo de elasticidad del hormigón F+04         | 0.00 GPa (0 días)   |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+04 | 25.79 GPa (5 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+03         | 26.51 GPa (7 días)  |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+03 | 27.47 GPa (12 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+02         | 27.70 GPa (14 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+02 | 28.18 GPa (20 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón F+01         | 28.24 GPa (21 días) |
| Módulo de elasticidad del hormigón pilares F+01 | 28.57 GPa (28 días) |

Fig. 5.25 Hormigonado del forjado 4

- j. Como se ha mencionado en el apartado de proceso constructivo (apartado 5.3), de la misma forma seguirían los pasos de carga hasta llegar a descimbrar el forjado 6 (Paso de carga 20). El modelo de elementos finitos y la obtención de resultados, se han limitado hasta el hormigonado del forjado 4 porque los estados críticos para puntales y forjados se producirán en el momento de hormigonar el 2º forjado y al hormigonar el 4º respectivamente.

Para el cálculo del modelo de EF se ha utilizado un ordenador con las siguientes características:

- ✓ Procesador Intel Core Duo a 1,60 GHz.
- ✓ Memoria RAM de 1 Giga Bytes.
- ✓ Disco duro de 80 Giga Bytes.

El tiempo de cálculo de un modelo de EF, incluyendo hasta el paso de carga 9, es de unas 9 horas.

Tal y como se ha indicado con anterioridad, la modelación de la estructura está compuesta por 3 fases. Mientras que las dos primeras fases han sido expuestas con anterioridad, cabe mencionar que la tercera fase o post-proceso, consiste en extraer los resultados de cada uno de los pasos de carga considerados. Así, a continuación, se analizarán los resultados obtenidos de los modelos planteados de EF.

### ***5.5.3 Combinaciones de acciones consideradas y niveles de plastificación***

Llegados a este punto, resulta necesario prever que resultados vamos a considerar porque dependiendo del tipo de registro, se necesitará una combinación de carga u otra distinta. Siguiendo el esquema del capítulo 4, se realizará un registro similar solamente para el modelo en cuestión, referente al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia. Para las combinaciones de cargas, se seguirá el procedimiento de los estados límite que indican las normativas actuales por lo que, como en este caso se realizan tanto análisis de cargas máximas y coeficientes de forjado como análisis de flechas y fisuración, se necesitan plantear los estados límite último y de servicio.

Además, debido a que con la introducción de los coeficientes de mayoración de acciones se aumentan las cargas en los puntales considerablemente, puede que al introducir los elementos de control de carga en puntales en el edificio real, no influyan para nada en la fase de construcción al no llegar a las cargas calculadas. Para evitar esta circunstancia, también se ha realizado un análisis con la combinación de acciones permanentes sin mayorar que proporcionará información de la mínima carga que pueden recibir los puntales.

Puesto que en la fase de construcción se instrumentaron diversos puntales, la carga permanente debida al peso propio del forjado y al sistema de cimbrado es conocida. El valor adoptado para el modelo de elementos finitos es de  $5,76 \text{ KN/m}^2$ . Además, según diversas recomendaciones, el valor adoptado para la sobrecarga de construcción es de  $1 \text{ KN/m}^2$ .

### 5.5.3.1 Cargas permanentes

Para esta combinación de acciones se han considerado los siguientes coeficientes de mayoración:

$$\checkmark \gamma_{CP} = 1'00$$

$$\checkmark \gamma_{SC} = 0'00$$

Por lo que:

$$\checkmark CP = 1 * 5'76 + 0 * 1 = 5'76 \text{ KN}/m^2$$

### 5.5.3.2 Estado Límite de Servicio (ELS)

Debido a que por la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales estamos controlando flechas y fisuración, resulta necesario plantear una combinación de acciones en Estado Límite de Servicio (ELS). Los coeficientes de combinación de acciones utilizados son:

$$\checkmark \gamma_{CP} = 1'00$$

$$\checkmark \gamma_{SC} = 1'00$$

Por lo que:

$$\checkmark ELS = 1 * 5'76 + 1 * 1'00 = 6'76 \text{ KN}/m^2$$

### 5.5.3.3 Estado Límite Último (ELU)

Debido a que por la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales estamos controlando máximas cargas en puntales y los coeficientes de puntales y forjado, resulta necesario plantear una combinación de acciones en Estado Límite Último (ELU).

La etapa de construcción es una fase que tradicionalmente viene menos respaldada por la normativa que la fase de servicio. Para este estudio, nos hemos basado en las recomendaciones que ofrecía la Guía de aplicación de la Instrucción de Hormigón Estructural: Edificación. Aunque, como sabemos, la EHE ha sido sustituida por la EHE-08, ésta no especifica nada sobre los coeficientes de mayoración de acciones en construcción. Por ello, se ha decidido tomar como base la recomendación de que como la etapa de construcción es una fase transitoria y breve respecto a la vida útil de la obra, los coeficientes de mayoración de acciones pueden adoptar el valor de 1,25 tanto para cargas permanentes como para sobrecargas. De esta forma tenemos:

$$\checkmark \gamma_{CP} = 1'25$$

$$\checkmark \gamma_{SC} = 1'25$$

Por lo que:

$$\checkmark ELU = 1'25 * 5'76 + 1'25 * 1'00 = 8'45 \text{ KN}/m^2$$

#### 5.5.3.4 Niveles de plastificación adoptados

Para evitar que la aplicación del empleo de elementos de control de carga en puntales resulte en vano, se ha decidido que estos elementos empiecen a tener comportamiento plástico incluso en la hipótesis más favorable de acciones (Cargas permanentes sin mayorar). Para ello, una vez realizado el análisis con la hipótesis de cargas permanentes, se observa como el puntal más cargado aparece bajo el primer forjado cuando se hormigona el segundo con un valor de 17,5 KN. Por ello y para tener más de una solución posible, se han planteado dos niveles de plastificación distintos:

- ✓ 15 KN (Referencia utilizada: Modelo 2 EP)
- ✓ 12 KN (Referencia utilizada: Modelo 3 EP)

Para el modelo en el que no se incluyen los elementos de control de carga en puntales, y que nos sirve de comparación, se ha utilizado la siguiente referencia: Modelo 1 E.

### 5.6 Análisis de resultados

De la misma forma que se trataron los resultados en el edificio experimental, se pasarán a tratar los de este edificio en cuestión. La única diferencia que se puede observar en las tablas de resultados es en los registros de los momentos. Para este caso, al tratarse de forjados reticulares de casetón recuperable, se ha decidido registrar los valores del momento máximo negativo en apoyos (M-AP), máximo positivo en centro de vano (M+) y máximo (por lo que se puede observar, negativo) en la zona de unión entre nervios y ábacos (M-) porque hay un cambio de sección resistente considerable. Por ello, también aparecen 3 momentos de fisuración distintos, dependiendo del signo del momento y de la sección resistente.

Por otra parte, se ha decidido no registrar la posición del puntal más cargado porque, como ya ocurría en el edificio experimental, suele estar cercana al centro de vano y porque existe una gran cantidad de puntales y vanos en donde aparece esta carga máxima.

En las tablas que se mostrarán para cada paso de carga aparecerán para la combinación de Estado Límite Último la máxima carga del puntal más cargado y los coeficientes tanto de forjado como de puntales; y para la combinación de Estado Límite de Servicio la máxima flecha de cada forjado y los momentos máximos de cada zona especificada anteriormente para el cálculo de la fisuración en caso de existir.

#### 5.6.1 Paso de carga 1 (PCI-Hormigonado del forjado 1)

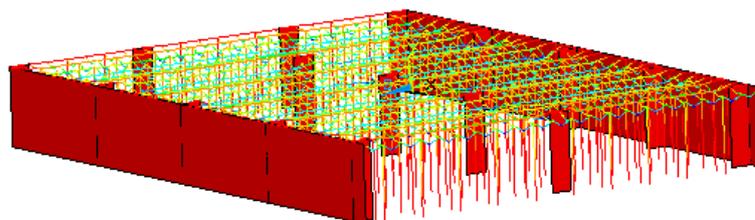


Fig. 5.26 Deformada tipo. Paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

Como se puede observar, la Figura 5.26 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

Tabla 5.3 Resultados para el paso de carga 1 (Hormigonado del forjado 1)

| PC1                   |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+   | M-   | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|-----------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(0 dfas) | Modelo 1 E  | 6978                  | 1.46             | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                       | Modelo 2 EP | 6978                  | 1.46             | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                       | Modelo 3 EP | 6978                  | 1.46             | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.3, se puede observar como al tratarse de una planta recién hormigonada, toda la carga aplicada es asumida por el sistema de apuntalamiento. De esta forma, el forjado no asume nada de carga por lo que los esfuerzos resistidos son nulos.

Además, si se presta atención a la diferencia entre los modelos planteados variando el nivel de plastificación en puntales puede verse que es nula debido a que la carga en los puntales no ha superado ningún nivel de plastificación propuesto. Así, el comportamiento de los puntales en los distintos modelos es idéntico.

### 5.6.2 Paso de carga 2 (PC2-Clareado del forjado 1)

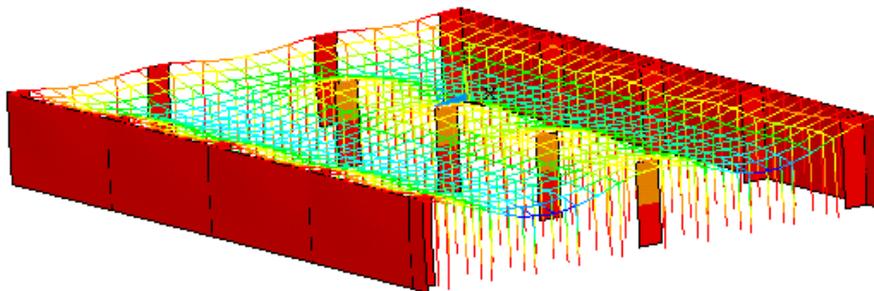


Fig. 5.27 Deformada tipo. Paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

Como se puede observar, la Figura 5.27 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

Tabla 5.4 Resultados para el paso de carga 2 (Clareado del forjado 1)

| PC2                   |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+   | M-   | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|-----------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(3 dfas) | Modelo 1 E  | 13077                 | 0.52             | 0.41 | 0.59 | 4.25 | 2.07 | 13.60 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |
|                       | Modelo 2 EP | 13077                 | 0.52             | 0.41 | 0.59 | 4.25 | 2.07 | 13.60 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |
|                       | Modelo 3 EP | 12000                 | 0.52             | 0.41 | 0.59 | 4.25 | 2.07 | 13.60 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.4, se puede observar como al realizar la operación del clareado, parte de la carga aplicada es asumida por el forjado (el 41 % de la carga aplicada). De esta forma, el sistema de apuntalamiento se descarga respecto al anterior paso de carga aunque al descimbrar el 50 % de los puntales éstos pasan a asumir mayor carga.

Además, si se presta atención a la diferencia entre los modelos planteados variando el nivel de plastificación en puntales puede verse que solo aparece en el “Modelo 3 EP” debido a que la carga en los puntales ha superado el nivel de plastificación planteado para este modelo (12000 N). Así, el comportamiento de los puntales en los dos primeros modelos es idéntico. Se puede observar también que al imponer una carga máxima no muy inferior a la que aparecería sin el elemento de control de carga en puntales, no es apreciable la modificación de ningún otro resultado.

Con todo ello, aunque el forjado haya pasado a asumir parte de la carga aplicada, se puede observar que los esfuerzos no son lo suficientemente grandes como para producir fisuración en el forjado.

### 5.6.3 Paso de carga 3 (PC3-Hormigonado del forjado 2)

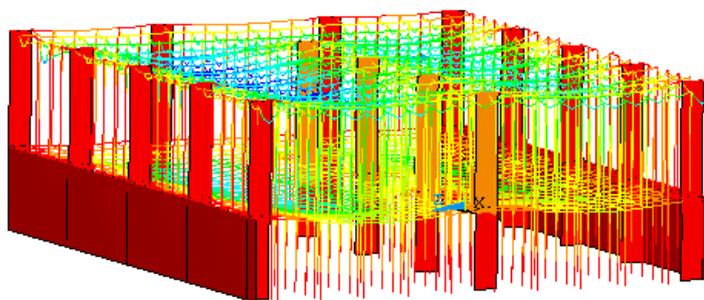


Fig. 5.28 Deformada tipo. Paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

Como se puede observar, la Figura 5.28 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

Tabla 5.5 Resultados para el paso de carga 3 (Hormigonado del forjado 2)

| PC3                   |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-   | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|-----------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(7 días) | Modelo 1 E  | 25684                 | 1.02             | 0.82 | 1.18 | 8.88  | 3.94 | 27.80 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | NO       | -       |
|                       | Modelo 2 EP | 15000                 | 1.50             | 0.96 | 1.04 | 11.23 | 7.46 | 30.48 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | NO       | -       |
|                       | Modelo 3 EP | 12000                 | 2.08             | 1.08 | 0.92 | 14.10 | 9.40 | 38.49 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | NO       | -       |
| FORJADO 2<br>(0 días) | Modelo 1 E  | 7126                  | 2.24             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                       | Modelo 2 EP | 7129                  | 2.72             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                       | Modelo 3 EP | 7132                  | 3.30             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00 | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.5, se puede observar como al hormigonar el forjado 2, tanto la carga asumida por el forjado 1 como por el sistema de apuntalamiento aumentan considerablemente. Como se ha mencionado anteriormente, este paso de carga es en el que aparece la máxima carga que recibe un puntal, que en este caso concreto que estamos tratando, para la combinación de ELU es de unos 25,7 KN.

Aquí es donde además aparece la mayor influencia del elemento de control de carga en puntales. Como se puede observar, se está disminuyendo la carga máxima que le llega a un puntal para la combinación ELU desde los 25,7 KN hasta los 15 y 12 KN para los respectivos modelos planteados. Debido a ello, el forjado pasa a asumir mayor proporción de carga y el sistema de apuntalamiento

menor. Por ello, las máximas flechas y los esfuerzos aumentan. Aún así, los esfuerzos que aparecen no son lo suficientemente grandes como para fisurar el forjado debido a que son inferiores a los que producen la fisuración para la edad del hormigón del forjado 1 en este paso de carga.

De forma claramente intuitiva, ahora se mostrarán gráficos de isolíneas de carga en puntales para la combinación más favorable (solo cargas permanentes sin mayorar) y para la más desfavorable (ELU: cargas permanentes más sobrecargas mayoradas).

En primer lugar, para la combinación más favorable tenemos:

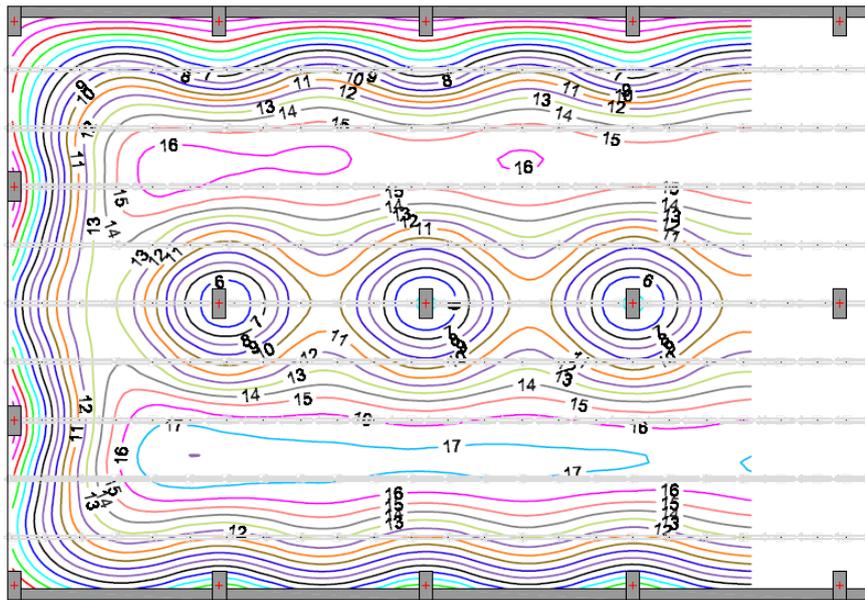


Fig. 5.29 Combinación de acciones: CP sin mayorar. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales.

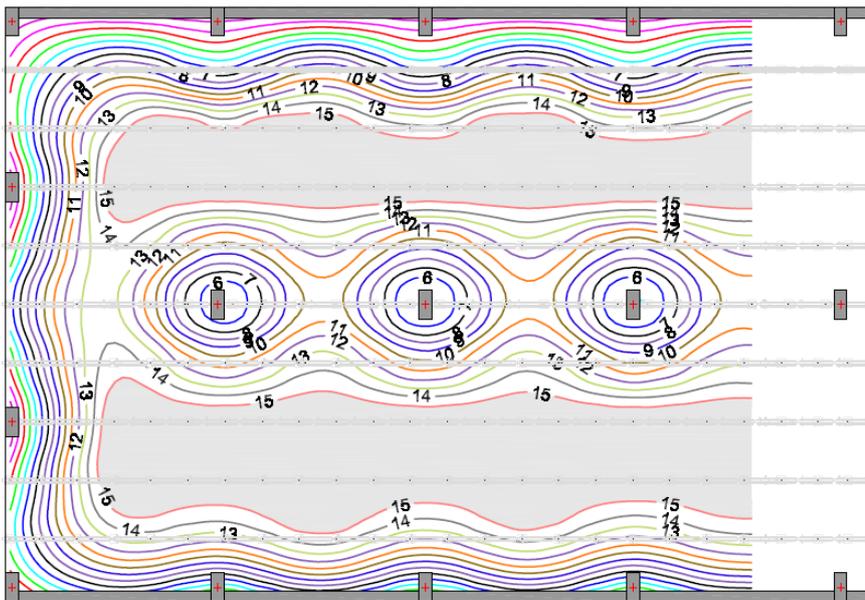


Fig. 5.30 Combinación de acciones: CP sin mayorar. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 15 kN.

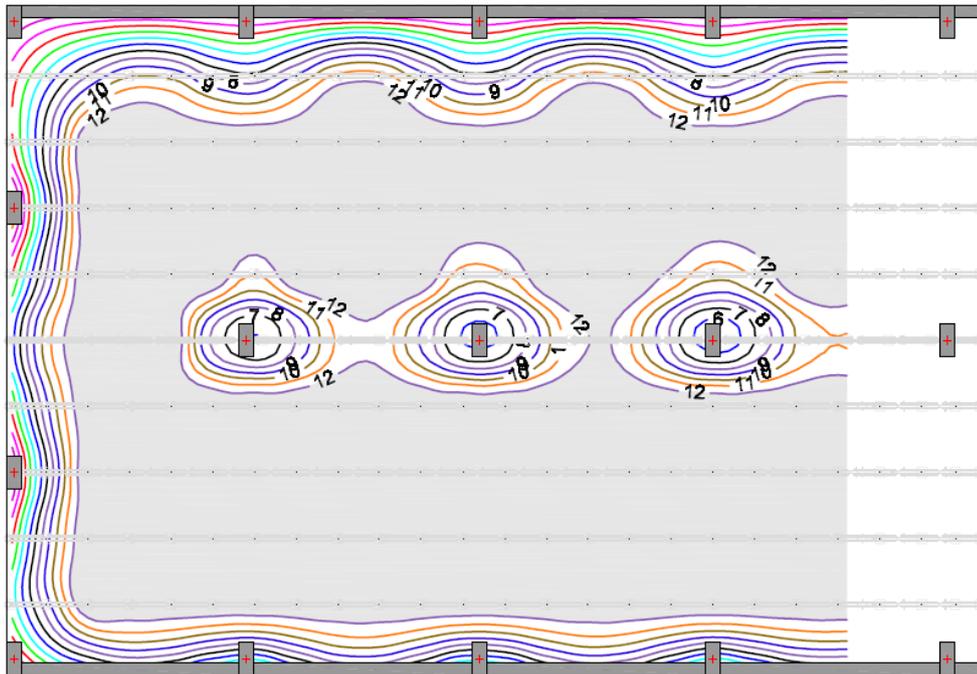


Fig. 5.31 Combinación de acciones: CP sin mayorar. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 12 KN.

Como se puede observar en estas figuras, a medida que se restringe más el nivel de plastificación en puntales, mayor es el número de éstos que pasa a tener un comportamiento plástico con una clara redistribución de cargas máximas en puntales a través del forjado desde los puntales centrales hacia los pilares.

En segundo lugar, para la combinación más desfavorable tenemos:

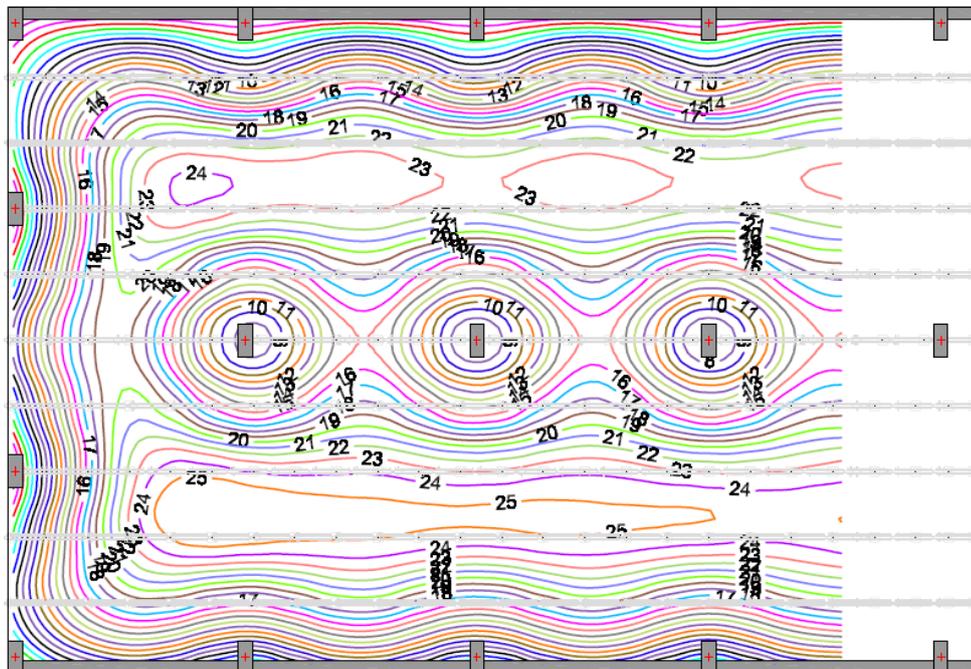


Fig. 5.32 Combinación de acciones: ELU. Cargas con comportamiento elástico y lineal en puntales.

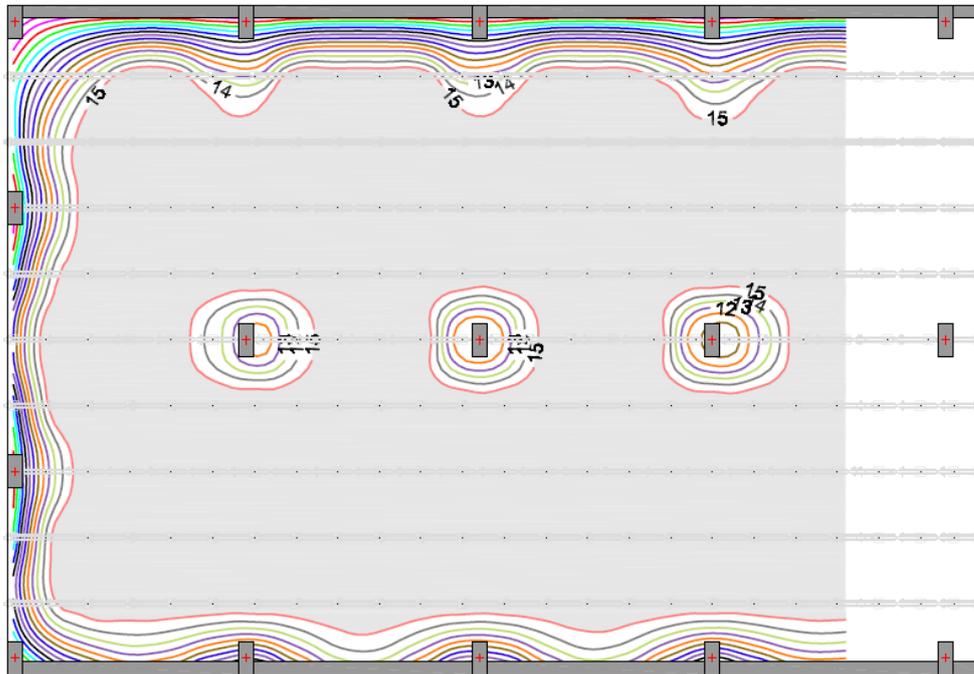


Fig. 5.33 Combinación de acciones: ELU. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 15 KN.

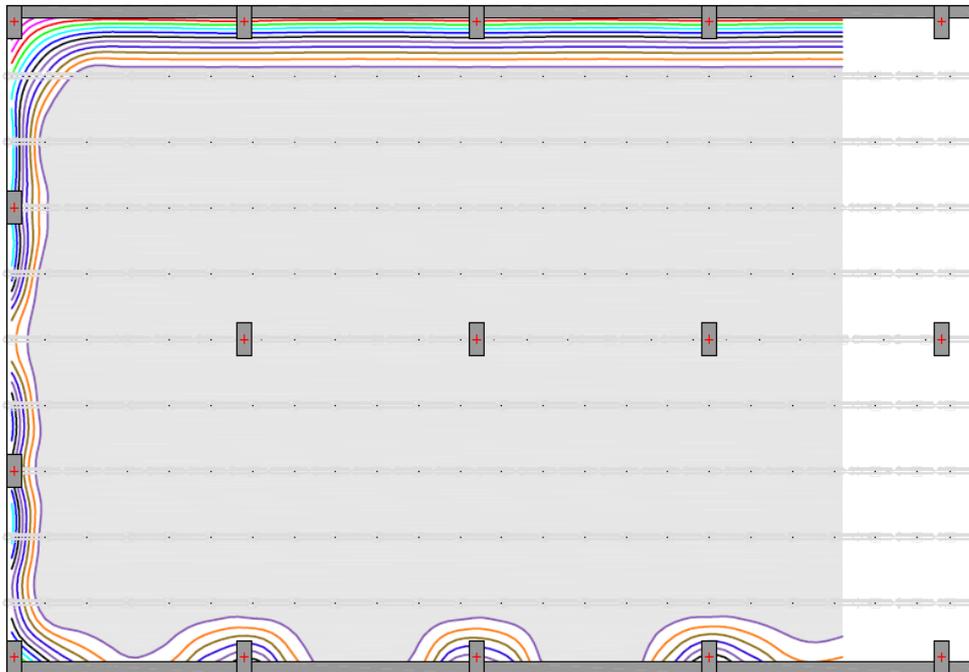


Fig. 5.34 Combinación de acciones: ELU. Cargas con nivel de plastificación en puntales de 12 KN.

Para este caso, la bajada de carga es superior respecto al anterior caso por lo que las zonas que aparecen sombreadas (zonas bajo las que los puntales aparecen con comportamiento plástico) son de dimensiones considerablemente mayores. Fijándonos en la Fig. 5.34 se puede observar como casi toda la primera planta aparece con puntales con comportamiento plástico. Parece una medida muy

exagerada pero si se presta atención a la Tabla 5.5 de recogida de resultados se puede observar como no llega a producir fisuración en el forjado.

Respecto a los valores del segundo forjado, se puede observar como al tratarse de una planta recién hormigonada, toda la carga aplicada es asumida por el sistema de apuntalamiento. De esta forma, el forjado no asume nada de carga por lo que los esfuerzos resistidos son nulos.

Además, si se presta atención a la diferencia entre los modelos planteados variando el nivel de plastificación en puntales puede verse que es casi nula en cuanto a la carga en los puntales debido a que no ha superado ningún nivel de plastificación planteado. Así, el comportamiento de los puntales en los distintos modelos es casi idéntico. Es una situación deseable porque de lo contrario se producirían deformaciones excesivas en el forjado al tener el hormigón en estado líquido. Respecto a las máximas flechas es evidente que aumentan según se restringe más el nivel de plastificación en puntales puesto que han aumentado en el primer forjado. De hecho, el aumento que experimentan es del mismo valor que el aumento experimentado en el primer forjado.

#### 5.6.4 Paso de carga 4 (PC4-Clareado del forjado 2)

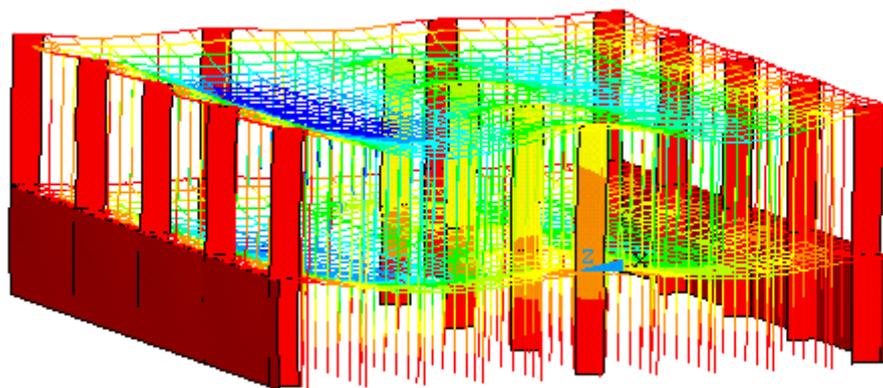


Fig. 5.35 Deformada tipo. Paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

Como se puede observar, la Figura 5.35 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

Tabla 5.6 Resultados para el paso de carga 4 (Clareado del forjado 2)

| PC4                    |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-   | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|------------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(10 días) | Modelo 1 E  | 21769                 | 0.88             | 0.55 | 1.00 | 6.74  | 3.05 | 17.94 | 16.68 | 31.49 | 64.08    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 15000                 | 1.30             | 0.68 | 0.79 | 8.66  | 6.23 | 20.63 | 16.68 | 31.49 | 64.08    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 12000                 | 1.82             | 0.79 | 0.64 | 11.13 | 7.80 | 30.49 | 16.68 | 31.49 | 64.08    | NO       | -       |
| FORJADO 2<br>(3 días)  | Modelo 1 E  | 11108                 | 1.48             | 0.45 | 0.55 | 6.07  | 2.72 | 15.96 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 8981                  | 1.77             | 0.53 | 0.47 | 6.77  | 3.69 | 17.28 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 8286                  | 2.17             | 0.57 | 0.43 | 7.79  | 4.66 | 20.23 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.6, al realizar la operación del clareado del forjado 2, la carga transmitida al sistema de apuntalamiento y al forjado de la primera planta es

inferior puesto que el forjado de la segunda planta empieza a resistir parte de su carga aplicada. Debido a ello las condiciones del forjado 1 mejoran, disminuyendo los esfuerzos y las flechas experimentadas. El aumento de esfuerzos que experimenta el forjado 2 no es suficiente como para producir la fisuración en el forjado.

A medida que se restringe más el nivel de plastificación en puntales, en el primer forjado ocurre una situación similar que para el paso de carga 3. Sin embargo, como en este paso de carga el sistema de apuntalamiento absorbe menos carga, aparecerán menos puntales con comportamiento plástico y la flecha recuperada será como mucho la flecha elástica experimentada por el puntal puesto que la flecha plástica quedará como flecha remanente.

Además, se puede observar que a medida que se restringe más el nivel de plastificación en puntales, los forjados empiezan a asumir mayor proporción de carga debido a la compatibilidad de desplazamientos entre puntales y forjados que debe existir. Por ello la carga máxima en puntales del forjado 2 disminuye.

### 5.6.5 Paso de carga 5 (PC5-Descimbrado del forjado 1)

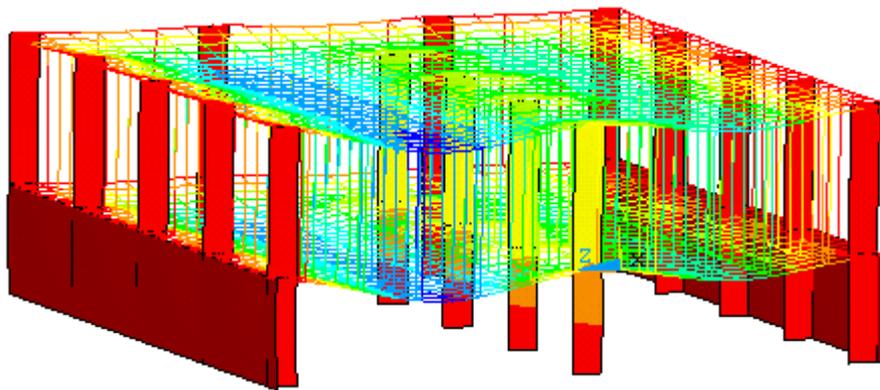


Fig. 5.36 Deformada tipo. Paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

Como se puede observar, la Figura 5.36 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

Tabla 5.7 Resultados para el paso de carga 5 (Descimbrado del forjado 1)

| PC5                    |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-   | M-AP  | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|------------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(11 días) | Modelo 1 E  | -                     | 2.87             | 1.28 | -    | 17.67 | 8.23 | 56.48 | 16.97 | 32.03 | 65.19    | SI       | 0.044   |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 2.88             | 1.28 | -    | 17.76 | 8.16 | 56.46 | 16.97 | 32.03 | 65.19    | SI       | 0.045   |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 2.88             | 1.28 | -    | 17.76 | 8.16 | 56.46 | 16.97 | 32.03 | 65.19    | SI       | 0.045   |
| FORJADO 2<br>(4 días)  | Modelo 1 E  | 7749                  | 2.99             | 0.72 | 0.28 | 11.46 | 6.51 | 29.69 | 13.30 | 25.11 | 51.17    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 7783                  | 3.01             | 0.72 | 0.28 | 11.52 | 6.51 | 29.70 | 13.30 | 25.11 | 51.17    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 7778                  | 3.01             | 0.72 | 0.28 | 11.52 | 6.51 | 29.70 | 13.30 | 25.11 | 51.17    | NO       | -       |

Como ocurría ya en el estudio del edificio experimental, debido a que la única influencia hasta el momento de un comportamiento plástico era de los puntales de la primera planta y llegados a este

paso de carga han desaparecido sin haberse producido fisuración del forjado, el conjunto cimbrado se comporta de forma elástica. Se puede afirmar que los modelos se han uniformizado dando casi los mismos resultados.

Las cargas asumidas por los forjados han aumentado considerablemente al desaparecer el sistema de apuntalamiento de la primera planta siendo claramente más perjudicial para el forjado 1 donde se llega a fisurar el forjado en la zona central. Por el esfuerzo existente y la abertura de fisura producida se puede decir que es una fisuración muy reducida en cuanto a zona y magnitud. Las flechas también han aumentado considerablemente respecto al anterior paso de carga debido al descimbrado del forjado de la primera planta. Por todo ello, las cargas asumidas por el sistema de apuntalamiento han disminuido, bajando también la máxima carga asumida por un puntal.

### 5.6.6 Paso de carga 6 (PC6-Hormigonado del forjado 3)

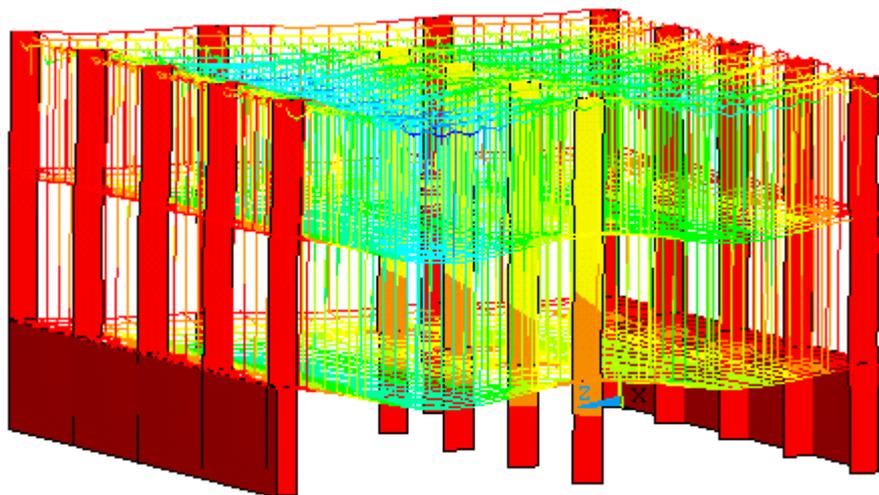


Fig. 5.37 Deformada tipo. Paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

Como se puede observar, la Figura 5.37 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

Tabla 5.8 Resultados para el paso de carga 6 (Hormigonado del forjado 3)

| PC6                    |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-    | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|------------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(14 días) | Modelo 1 E  | -                     | 3.98             | 1.70 | -    | 23.73 | 12.81 | 76.83 | 17.66 | 33.33 | 67.83    | SI       | 0.153   |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 3.98             | 1.70 | -    | 23.84 | 12.81 | 76.82 | 17.66 | 33.33 | 67.83    | SI       | 0.153   |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 3.98             | 1.69 | -    | 23.84 | 12.81 | 76.82 | 17.66 | 33.33 | 67.83    | SI       | 0.153   |
| FORJADO 2<br>(7 días)  | Modelo 1 E  | 13506                 | 4.48             | 1.30 | 0.70 | 19.85 | 10.67 | 51.55 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | SI       | 0.064   |
|                        | Modelo 2 EP | 13540                 | 4.49             | 1.30 | 0.70 | 19.98 | 10.67 | 51.56 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | SI       | 0.065   |
|                        | Modelo 3 EP | 12000                 | 4.49             | 1.31 | 0.69 | 19.98 | 10.67 | 51.56 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | SI       | 0.065   |
| FORJADO 3<br>(0 días)  | Modelo 1 E  | 7139                  | 5.68             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 7133                  | 5.68             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 7133                  | 5.68             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.8, al realizar el hormigonado del forjado 3, se produce un aumento de la carga asumida por los forjados 1 y 2 y por el sistema de apuntalamiento de la segunda planta. Por ello, se llega a producir la fisuración de ambos forjados, siendo la del segundo forjado similar a la expuesta para el primer forjado del anterior paso de carga, y la del primer forjado un poco más acentuada por producirse en zona de apoyos y zonas centrales. La abertura de fisura mostrada es la más desfavorable. Se produce en zona de apoyos y es de una magnitud mayor debido a que los datos proporcionados de armadura por la dirección de obra muestran una cantidad de ésta muy pequeña. De todos modos, cumple el límite impuesto por ambiente según la EHE-08.

Debido al aumento de cargas en los forjados las flechas han aumentado siendo mayores en todos los forjados debido a que están conectados entre sí. Las cargas en los puntales de la tercera planta son aproximadamente las cargas que reciben los puntales en una planta recién hormigonada proporcional a su área tributaria puesto que el sistema de apuntalamiento asume toda la carga aplicada.

Se puede observar para el forjado 2, que existe influencia del elemento de control de carga, aunque al hacer descender la carga tan poco los resultados son muy similares.

### **5.6.7 Paso de carga 7 (PC7-Clareado del forjado 3)**

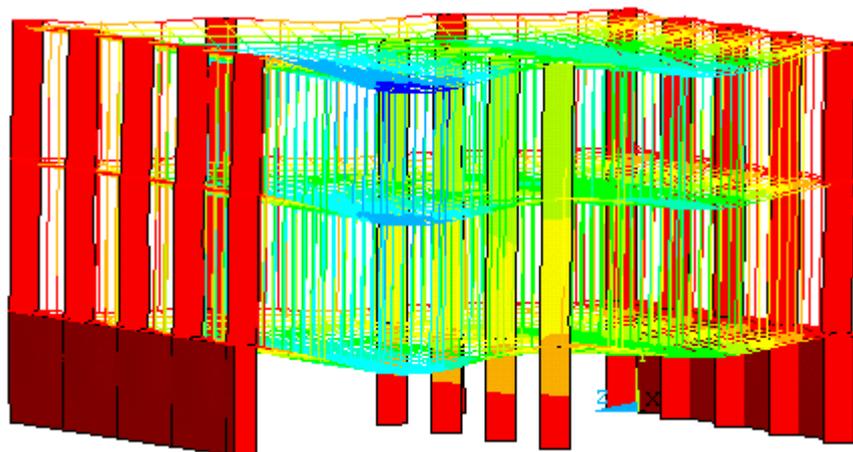


Fig. 5.38 Deformada tipo. Paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

Como se puede observar, la Figura 5.38 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.9, al realizar la operación del clareado del forjado 3, los forjado 1 y 2 pasan a asumir menos carga debido a que el forjado 3 ha pasado a resistir parte de su carga aplicada y, por tanto, el sistema de apuntalamiento de la tercera planta transmite menos carga a los forjados inferiores. Por esta misma razón, la flecha en los forjados es inferior respecto al anterior paso de carga así como también los esfuerzos tanto del forjado 1 como del 2. De hecho, se puede observar como el fenómeno de la fisuración se reduce para este paso de carga en los forjados 1 y 2 y no se produce para el forjado 3. La abertura de fisura que aparece en la Tabla 5.9 está

calculada para la zona de apoyos que es la más desfavorable y cumple el límite impuesto por el tipo de ambiente según la EHE-08.

Tabla 5.9 Resultados para el paso de carga 7 (Clareado del forjado 3)

| PC7                    |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-    | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|------------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(17 dfas) | Modelo 1 E  | -                     | 3.63             | 1.54 | -    | 21.31 | 10.83 | 71.82 | 18.16 | 34.29 | 69.78    | SI       | 0.124   |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 3.63             | 1.54 | -    | 21.43 | 10.87 | 71.80 | 18.16 | 34.29 | 69.78    | SI       | 0.123   |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 3.63             | 1.54 | -    | 21.43 | 10.87 | 71.80 | 18.16 | 34.29 | 69.78    | SI       | 0.123   |
| FORJADO 2<br>(10 dfas) | Modelo 1 E  | 14046                 | 4.00             | 0.97 | 0.54 | 15.89 | 8.00  | 38.92 | 16.68 | 31.49 | 64.08    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 14079                 | 4.00             | 0.97 | 0.54 | 15.88 | 8.01  | 38.91 | 16.68 | 31.49 | 64.08    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 12000                 | 4.00             | 0.98 | 0.54 | 15.88 | 8.01  | 38.91 | 16.68 | 31.49 | 64.08    | NO       | -       |
| FORJADO 3<br>(3 dfas)  | Modelo 1 E  | 9666                  | 4.46             | 0.48 | 0.52 | 6.52  | 2.24  | 16.64 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 9669                  | 4.46             | 0.48 | 0.52 | 6.53  | 2.23  | 16.65 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 9673                  | 4.46             | 0.48 | 0.52 | 6.53  | 2.23  | 16.65 | 12.01 | 22.66 | 46.12    | NO       | -       |

Se puede observar para el forjado 2 que existe influencia del elemento de control de carga aunque, al hacer descender la carga de forma poco pronunciada, los resultados son muy similares.

### 5.6.8 Paso de carga 8 (PC8-Descimbrado del forjado 2)

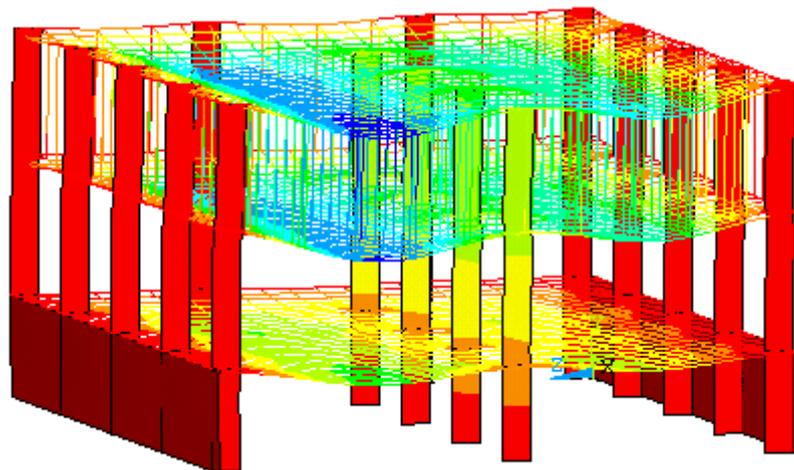


Fig. 5.39 Deformada tipo. Paso de carga 8 (Descimbrado del forjado 2)

Como se puede observar, la Figura 5.39 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.10, al realizar el descimbrado del forjado 2, el primer forjado se queda independiente de conexiones a otros forjados mediante sistemas de apuntalamiento. El forjado asume la totalidad de la carga aplicada y la máxima flecha disminuye considerablemente respecto a los anteriores pasos de carga. Además, los forjados 2 y 3 asumen mayor proporción de carga por lo que aparecen mayores flechas, mayores esfuerzos, y el sistema de apuntalamiento de la tercera planta sufre una descarga.

Tabla 5.10 Resultados para el paso de carga 8 (Descimbrado del forjado 2)

| PC8                    |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-   | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|------------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(18 días) | Modelo 1 E  | -                     | 2.61             | 1.00 | -    | 14.30 | 5.88 | 41.77 | 18.31 | 34.56 | 70.33    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 2.61             | 1.00 | -    | 14.30 | 6.05 | 41.78 | 18.31 | 34.56 | 70.33    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 2.61             | 1.00 | -    | 14.30 | 6.05 | 41.78 | 18.31 | 34.56 | 70.33    | NO       | -       |
| FORJADO 2<br>(11 días) | Modelo 1 E  | -                     | 4.91             | 1.38 | -    | 20.42 | 8.72 | 60.67 | 16.97 | 32.03 | 65.19    | SI       | 0.062   |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 4.90             | 1.38 | -    | 20.49 | 9.00 | 60.64 | 16.97 | 32.03 | 65.19    | SI       | 0.063   |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 4.90             | 1.38 | -    | 20.49 | 9.00 | 60.64 | 16.97 | 32.03 | 65.19    | SI       | 0.063   |
| FORJADO 3<br>(4 días)  | Modelo 1 E  | 6249                  | 5.21             | 0.62 | 0.38 | 9.20  | 3.14 | 23.41 | 13.30 | 25.11 | 51.17    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 6224                  | 5.21             | 0.62 | 0.38 | 9.21  | 3.31 | 23.42 | 13.30 | 25.11 | 51.17    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 6202                  | 5.21             | 0.62 | 0.38 | 9.21  | 3.31 | 23.42 | 13.30 | 25.11 | 51.17    | NO       | -       |

La abertura de fisura que aparece en el forjado 2 corresponde a la zona central por eso la magnitud es inferior como se ha explicado en apartados anteriores. La carga en los puntales de la tercera planta es muy similar aunque difiere debido a la influencia del elemento de control de carga que para este caso y como se puede observar es despreciable.

### 5.6.9 Paso de carga 9 (PC9-Hormigonado del forjado 4)

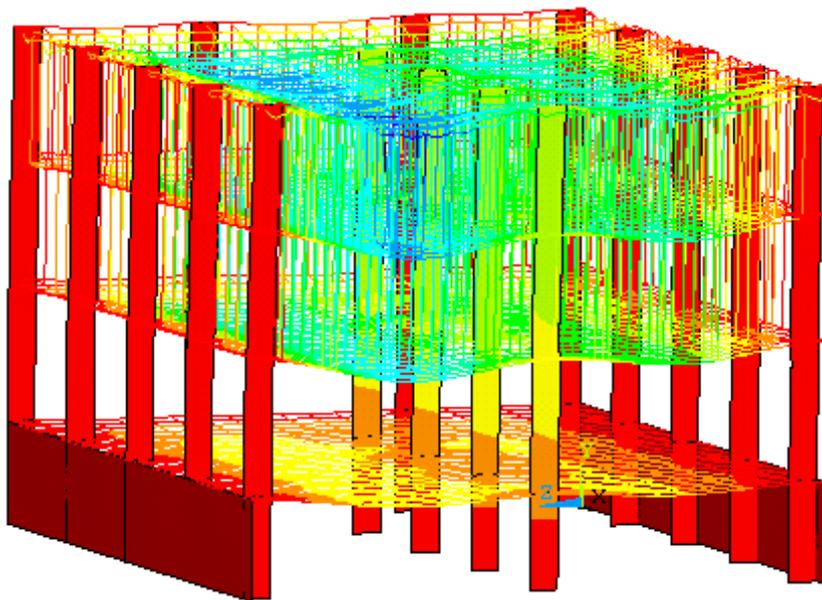


Fig. 5.40 Deformada tipo. Paso de carga 9 (Hormigonado del forjado 4)

Como se puede observar, la Figura 5.40 muestra la deformada tipo de este paso de carga. A continuación, se muestran y analizan los resultados pertenecientes a este paso de carga.

A la vista de los resultados mostrados en la Tabla 5.11, al realizar el hormigonado del cuarto forjado, estamos ante el paso de carga más crítico para los forjados. Es en este paso de carga en el que, para estas condiciones de ejecución, aparece el forjado que más proporción de carga asume. El forjado en cuestión es el 2º forjado y asume 1'79 veces la carga aplicada en un forjado. Por ello, los esfuerzos

asumidos por el forjado son máximos obteniendo como consecuencia una mayor abertura de fisura y mayores flechas.

Tabla 5.11 Resultados para el paso de carga 9 (Hormigonado del forjado 4)

| PC9                    |             | Carga máx. puntal (N) | Máx. flecha (mm) | Cf   | Cp   | M+    | M-    | M- AP | Mcr + | Mcr - | Mcr - AP | ¿Fisura? | wk (mm) |
|------------------------|-------------|-----------------------|------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|---------|
| FORJADO 1<br>(21 días) | Modelo 1 E  | -                     | 2.60             | 1.00 | -    | 14.30 | 5.88  | 41.77 | 18.67 | 35.25 | 71.74    | NO       | -       |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 2.60             | 1.00 | -    | 14.30 | 6.05  | 41.78 | 18.67 | 35.25 | 71.74    | NO       | -       |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 2.60             | 1.00 | -    | 14.30 | 6.05  | 41.78 | 18.67 | 35.25 | 71.74    | NO       | -       |
| FORJADO 2<br>(14 días) | Modelo 1 E  | -                     | 6.38             | 1.79 | -    | 26.74 | 12.11 | 80.19 | 17.66 | 33.33 | 67.83    | SI       | 0.168   |
|                        | Modelo 2 EP | -                     | 6.38             | 1.79 | -    | 26.68 | 12.12 | 80.17 | 17.66 | 33.33 | 67.83    | SI       | 0.168   |
|                        | Modelo 3 EP | -                     | 6.38             | 1.78 | -    | 26.68 | 12.12 | 80.17 | 17.66 | 33.33 | 67.83    | SI       | 0.168   |
| FORJADO 3<br>(7 días)  | Modelo 1 E  | 13407                 | 7.02             | 1.21 | 0.79 | 17.46 | 6.31  | 44.51 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | SI       | 0.049   |
|                        | Modelo 2 EP | 13433                 | 7.02             | 1.21 | 0.79 | 17.46 | 6.32  | 44.52 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | SI       | 0.049   |
|                        | Modelo 3 EP | 12000                 | 7.02             | 1.21 | 0.78 | 17.46 | 6.32  | 44.52 | 15.50 | 29.25 | 59.53    | SI       | 0.049   |
| FORJADO 4<br>(0 días)  | Modelo 1 E  | 7140                  | 8.20             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                        | Modelo 2 EP | 7133                  | 8.20             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |
|                        | Modelo 3 EP | 7133                  | 8.20             | 0.00 | 1.00 | 0.00  | 0.00  | 0.00  | -     | -     | -        | -        | -       |

Además, se produce un aumento de la carga asumida por los forjados 2 y 3 y por el sistema de apuntalamiento de la tercera planta. Por ello, se llega a producir la fisuración de ambos forjados, siendo la del tercer forjado similar a la expuesta para el segundo forjado del anterior paso de carga, y la del segundo forjado más acentuada por producirse en zona de apoyos y zonas centrales. La abertura de fisura mostrada es la más desfavorable que se produce en zona de apoyos y es de una magnitud mayor debido a que los datos proporcionados de armadura por la dirección de obra muestran una cantidad de ésta muy pequeña. De todos modos, cumple el límite impuesto por el tipo de ambiente según la EHE-08.

Debido al aumento de cargas en los forjados las flechas han aumentado siendo mayores en los forjados 2, 3 y 4 debido a que están conectados entre sí. Las cargas en los puntales de la cuarta planta son aproximadamente las cargas que reciben los puntales en una planta recién hormigonada proporcional a su área tributaria puesto que el sistema de apuntalamiento asume toda la carga aplicada.

Se puede observar para el forjado 3, que existe influencia del elemento de control de carga, aunque al hacer descender la carga tan poco los resultados son muy similares.

Las conclusiones aquí obtenidas son muy similares a las obtenidas en el paso de carga 6 correspondiente al hormigonado del forjado 3, y, para futuros pasos de carga, se irán repitiendo aproximadamente las mismas situaciones debido a que el ciclo Cimbrado-Clareado-Descimbrado se va repitiendo.

El análisis se detiene en este paso de carga porque no habrá ningún otro paso de carga posterior a este donde aparezcan situaciones más adversas para los forjados y/o para el sistema de apuntalamiento.

## 5.7 Justificación económica del empleo de elementos de control de carga en puntales para el presente edificio

En el Apéndice V aparece este apartado tratado con más detalle. Resumiendo las conclusiones que aparecen allí, se puede decir:

- ✓ El ahorro en € respecto al total de puntales se puede cuantificar en 2.936'08 € y 3.759'28 € para los Modelos 2 y 3 EP respectivamente. Corresponden a un ahorro o descenso del 41'63 % y del 53'31 %.
- ✓ El coste máximo de los elementos de control de carga en puntales que no produciría ninguna ventaja económica es de 4'99 € y de 1'07 € para los Modelos 2 y 3 EP respectivamente. Este coste está dentro de los márgenes razonables del coste de un elemento de control de carga en puntales.
- ✓ De forma general, si expresamos el coste total de los puntales por metro cuadrado de edificio en planta pasamos de 8'58 €/m<sup>2</sup> a 5 €/m<sup>2</sup> y a 4 €/m<sup>2</sup> para los Modelos 1 E y 2 y 3 EP respectivamente.
- ✓ Si se añade ahora el precio por metro cuadrado de los elementos de control de carga en puntales suponiendo que el coste de cada uno de ellos es de 0'50 €, tenemos que el coste total pasa de 8'58 €/m<sup>2</sup> a 5'36 €/m<sup>2</sup> y a 6'13€/m<sup>2</sup> para los Modelos 1 E y 2 y 3 EP respectivamente siendo el ahorro del 37'49 % y del 28,47 %.

Recapitulando, se puede concluir:

- ✓ Existirá mejor rendimiento económico cuánto más exigente sea el nivel de plastificación siempre y cuando solo aparezca comportamiento plástico de los puntales en el primer forjado clareado.
- ✓ Si existe la forma de saber qué elementos de control de carga no han entrado en comportamiento plástico, el coste total anteriormente especificado disminuiría porque todos los elementos de control de carga de una planta clareada no se comportan de forma plástica (Ver isolíneas de carga en el apartado 5.6.3 del presente Capítulo) y, por tanto, se pueden reutilizar y el rendimiento económico aún será mayor.
- ✓ Para mayor seguridad, se deberían instalar elementos de control de carga en todos los puntales de una planta (no solo en las sopandas principales) para evitar cualquier tipo de confusión y/o catástrofe y aprovecharlos en etapas posteriores.

## 5.8 Conclusiones relativas a la influencia del empleo de elementos de control de carga en puntales para el presente edificio

- ✓ Debido a la influencia del elemento de control de carga en puntales se gana en *Seguridad* puesto que se consigue la redistribución de cargas máximas en puntales y, bajo condiciones controladas, sin producir fisuración en el forjado. Además, se gana en seguridad frente a acciones imprevistas y/o accidentales como por ejemplo: fallo de un puntal, sobrecargas inesperadas, acciones humanas, etc.

- ✓ Debido a la influencia del elemento de control de carga en puntales se gana en Economía puesto que permite optimizar los costes de ejecución de los forjados al poder emplear sistemas de apuntalamiento que resistan cargas inferiores. Como se ha visto se puede llegar a reducir el coste total de los puntales más los elementos de control de carga entre un 30 y un 40 %.
- ✓ Debido a la influencia del elemento de control de carga en puntales se gana en Eficiencia Estructural puesto que permite la redistribución de cargas máximas en puntales y ello conlleva a un aprovechamiento mayor de la resistencia de todos ellos. Recordemos que el diseño del sistema de apuntalamiento tradicionalmente se realiza en base a la carga máxima del puntal más cargado. Con la introducción del elemento de control de carga en puntales se realizaría en base a una proporción de la carga máxima del puntal más cargado, y como se ha visto, un grupo de puntales se verían sometidos a dicha proporción de carga y, en conjunto, cada uno de ellos aprovecharía más su resistencia estructural.

## 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.
- 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.
- 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.

ANSYS Inc. (2005). "ANSYS theory reference 10.0".

ASTM (1999). "Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method. ASTM C 1074-98", Philadelphia.

Azkune M, Puente I (2007). "Evolución de la distribución de cargas entre puntales y forjados durante la construcción", *Hormigón y Acero*, 245(3), 79-91.

Azkune M, Puente I, Insausti A (2007). "Effect to ambient temperature on the redistribution of loads during construction of multi-storey concrete structures", *Engineering Structures*, 29(6), 933-941.

Azkune M (2007). "Transmisión de cargas en la ejecución de edificios de hormigón: mediciones en obra y análisis teórico", Tesis Doctoral, Universidad de Navarra, San Sebastián.

Blackey FA, Beresford FD (1965). "Stripping of formwork for concrete in buildings in relation to structural design", *Civil Engineering Transactions*, Ce7, 2:92, 2:96.

Calavera J, Fernández J (1991). "Cuaderno Nº 3: Criterios para el descimbrado de estructuras de hormigón", INTEMAC, Madrid.

Calavera J (2002). "Calculo, 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.

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.

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.

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.
- El-Shahhat AM, Rosowsky DV, Chen WF (1993). "Construction safety of multistory concrete buildings", *ACI Structural Journal*, 90(4), 335-341.
- El-Shahhat AM, Rosowsky DV, Chen WF (1994). "Partial factor design for reinforced concrete buildings during construction", *ACI Structural Journal*, 91(4), 475-485.
- Eldukair ZA, Ayyub BM (1991). "Analysis of recent U.S. structural and construction failures", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 5(1), 57-73.
- ENV 1992-1-1 (Eurocode N° 2) (1991). "Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for Buildings".
- Epaarachchi DC, Stewart MG, Rosowsky DV (2002). "Structural reliability of multistory buildings during construction", *Structural Engineering*, 128(2), 205-213.
- 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.
- Feld J, Carper K (1997). "Construction Failure", John Wiley and Sons.
- 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.
- Freisleben H, Pedersen EJ (1977). "Maleinstrument til kontrol of betons haerdning", *Nordisk Betong*, 1, 21-25.
- Gardner NJ, Poon SM (1976). "Time and temperature effects on tensile, bond and compressive strengths", *ACI Journal Proceedings*, 73(7), 405, 409.
- 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.
- 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.
- Klieger P (1958). "Effect of mixing and curing temperature on concrete strength", *ACI Journal Proceedings*, 54(6), 1063,1081.

Laplante P, Boulay C (1994). "Evolution du coefficient de dilatation thermique du béton en fonction de sa maturité aux tout premiers ages", *Materials and structures*, Springer Netherlands.

Lasisi M, Ng SF (1979). "Construction loads imposed on high-rise floor slabs", *Concrete International*, 1(2), 24-29.

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.

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.

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.

Miranda JF, Silva MR, Ramalho MA (2003). "A new procedure for the analysis of construction loads in multistory reinforced concrete structures", *The structural design of tall and special buildings*, 12(4), 293, 315.

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.
- Nielsen K (1952). "Loads on reinforced concrete floor slabs and their deformations during construction", Final report, 15, Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, Royal Institute of Technology.
- Pallett P (2001). "Guide to flat slab formwork and falsework", CONSTRUCT, Berkshire.
- Pallett P (2003). "Striking of flat slabs", *Concrete*, 37(5), 30-32.
- 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.
- Puente I, Azkune M, Insausti A (2007). "Shore-slab interaction in multistory reinforced concrete buildings during construction: An experimental approach", *Engineering Structures*, 29(5), 731-741.
- Rosowsky DV, Philbrick TW, Huston DR (1997). "Observations from shore load measurements during concrete construction", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 11(1), 18-23.
- 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.
- Stewart MG (2001). "Effect of construction and service loads on reliability of existing RC buildings", *Journal of structural engineering*, 127(10), 1232-1235.
- 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.
- Vollum R.L. (2003). "Investigation into backprop forces and deflections at St George Wharf", *Magazine for Concrete Research*, 55, 449-460.
- 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.

## APÉNDICE I. PLANOS

### I.1 Introducción

En los Capítulos 3-4 quedó definido el edificio experimental que se planteó como un ensayo a escala real. El modelo experimental consistió en tres forjados resueltos mediante losas de hormigón armado de 25 cm. de canto, con una luz entre pilares de 6 m y un voladizo de 1.80 m. Los forjados se apoyaron en cuatro pilares de sección rectangular.

En el Capítulo 5 quedó definido el edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia. Consistió en 7 forjados reticulares de casetón recuperable de 40 cm. de canto (35+5) con una luz entre pilares variable.

En el presente apéndice se muestran los planos de armado y detalle del edificio. El índice de planos es el que se muestra a continuación.

### I.2 Índice de planos

PLANO N° 1: Edificio experimental. Situación y emplazamiento

PLANO N° 2: Edificio experimental. Planta de replanteo

PLANO N° 3: Edificio experimental. Forjados F+01 y F+02

3.1. Armado base y refuerzos transversales

3.2. Armado base y refuerzos longitudinales

PLANO N° 4: Edificio experimental. Forjado de cubierta

4.1. Armado base y refuerzos transversales

4.2. Armado base y refuerzos longitudinales

PLANO N° 5: Edificio experimental. Cuadro de pilares

PLANO N° 6: Edificio Bellas Artes. Situación y emplazamiento

PLANO N° 7: Edificio Bellas Artes. Planta de replanteo

PLANO N° 8: Edificio Bellas Artes. Armado

8.1. Armadura base y refuerzos transversales superiores

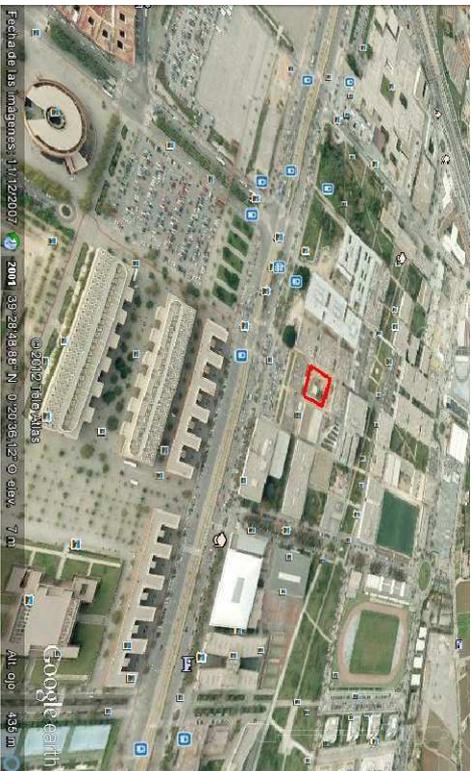
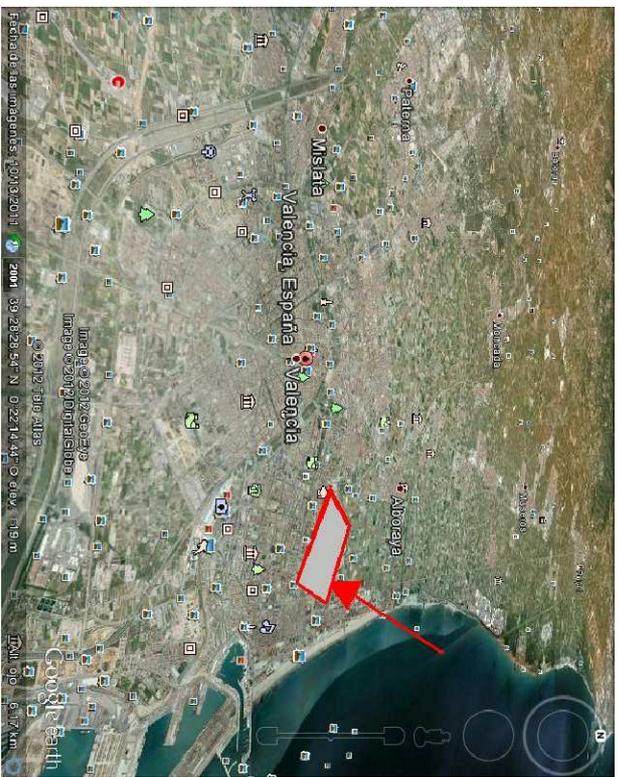
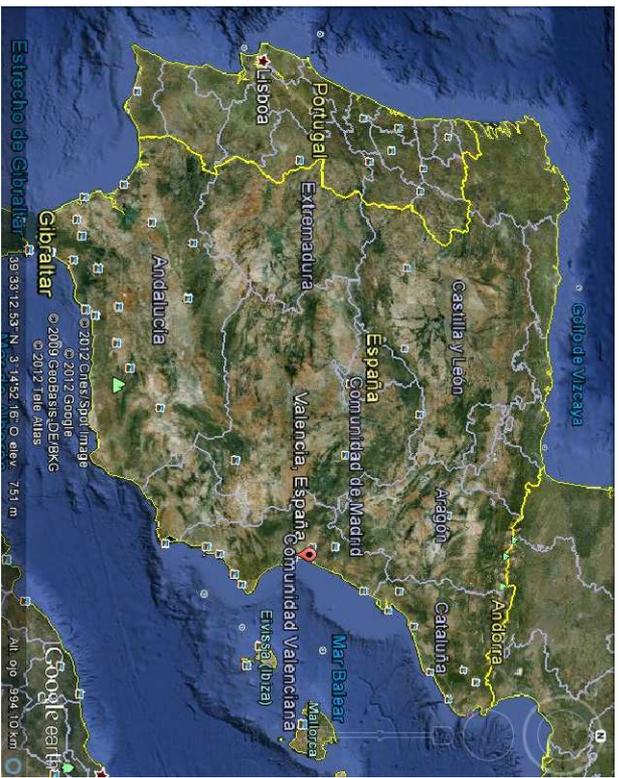
8.2. Armadura base y refuerzos longitudinales superiores

8.3. Armadura base y refuerzos transversales inferiores

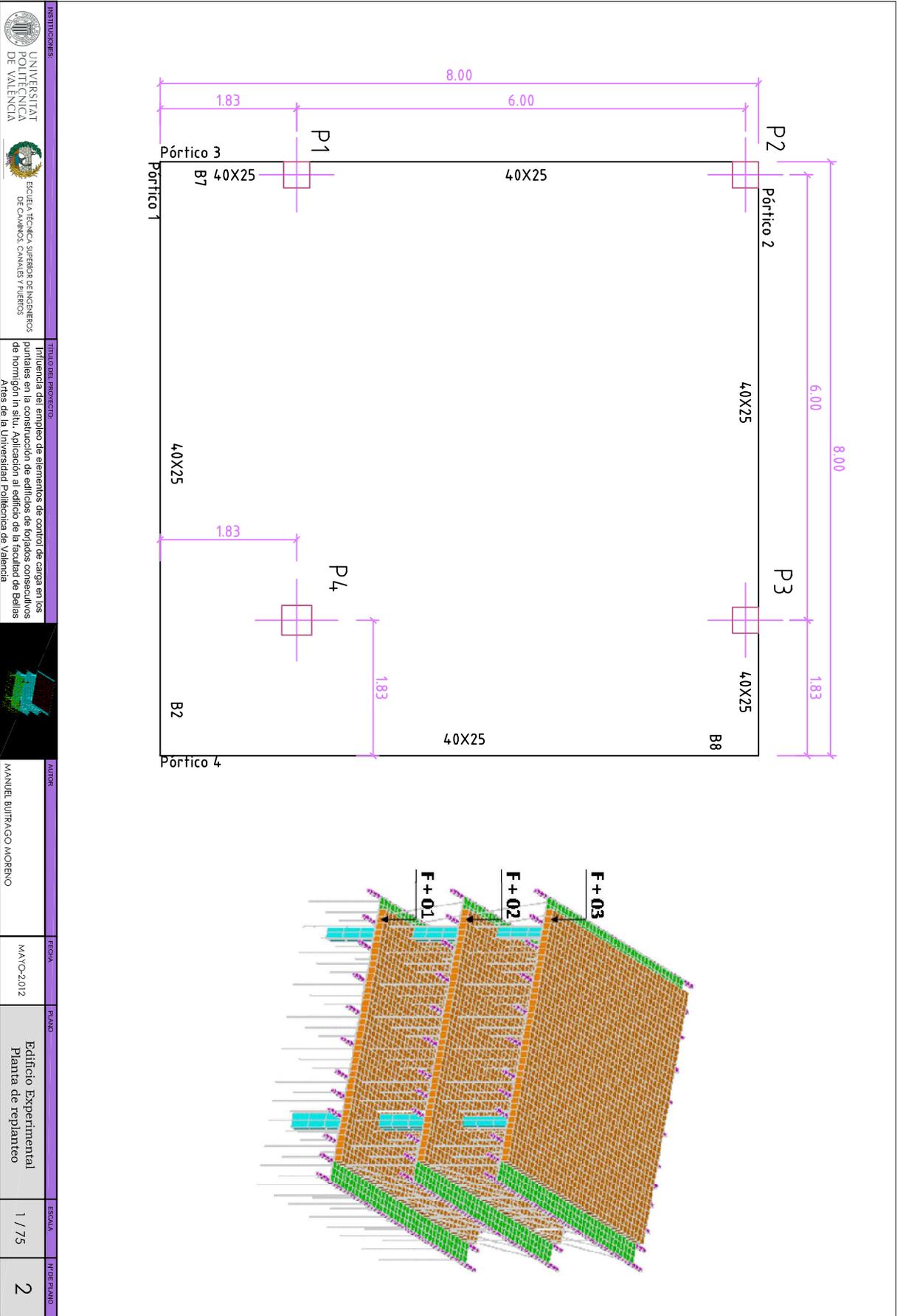
8.4. Armadura base y refuerzos longitudinales inferiores

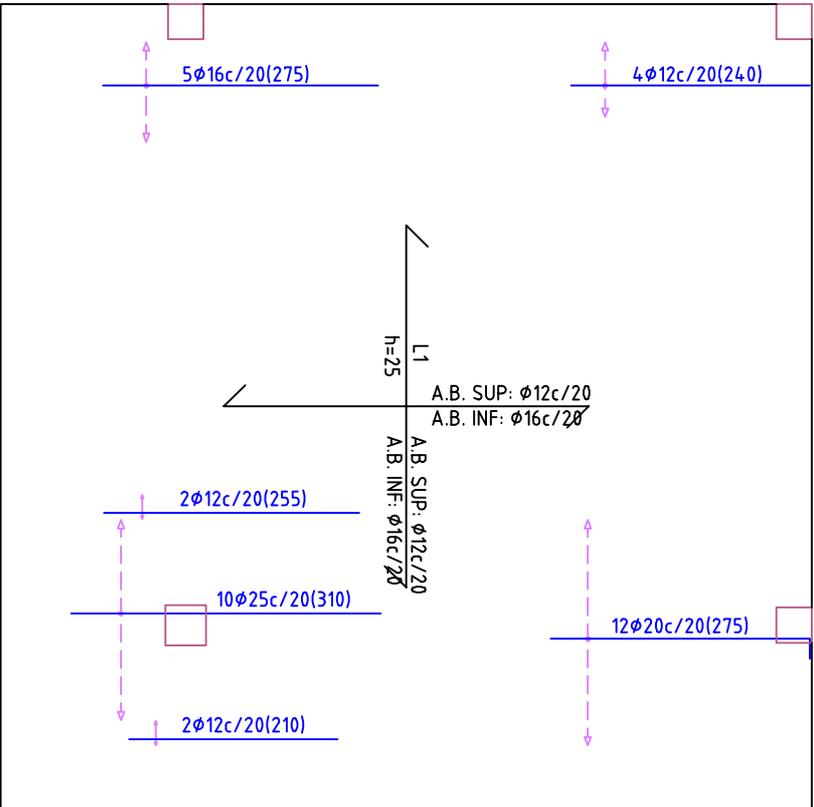
8.5. Refuerzo de nervios a cortante en salida de ábaco

PLANO N° 9: Edificio de Bellas Artes. Secciones y cuadro de pilares



|  |   |  |                                |  |   |
|--|---|--|--------------------------------|--|---|
| <p>INSTITUCIONES:</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS</p> | <p>TÍTULO DEL PROYECTO:</p> <p>Influencia del emplazamiento de elementos de control de carga en los puentes en la construcción de edificios de torres consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia</p> | <p>AUTOR:</p> <p>MANUEL BURRAGO MORENO</p> | <p>FECHA:</p> <p>MAYO-2012</p> | <p>PLANO:</p> <p>Edificio Experimental<br/>Situación y emplazamiento</p> | <p>ESCALA:</p> <p>Nº DE PLANO:</p> <p>1</p> |
|--|---|--|--------------------------------|--|---|



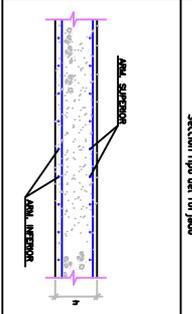


CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

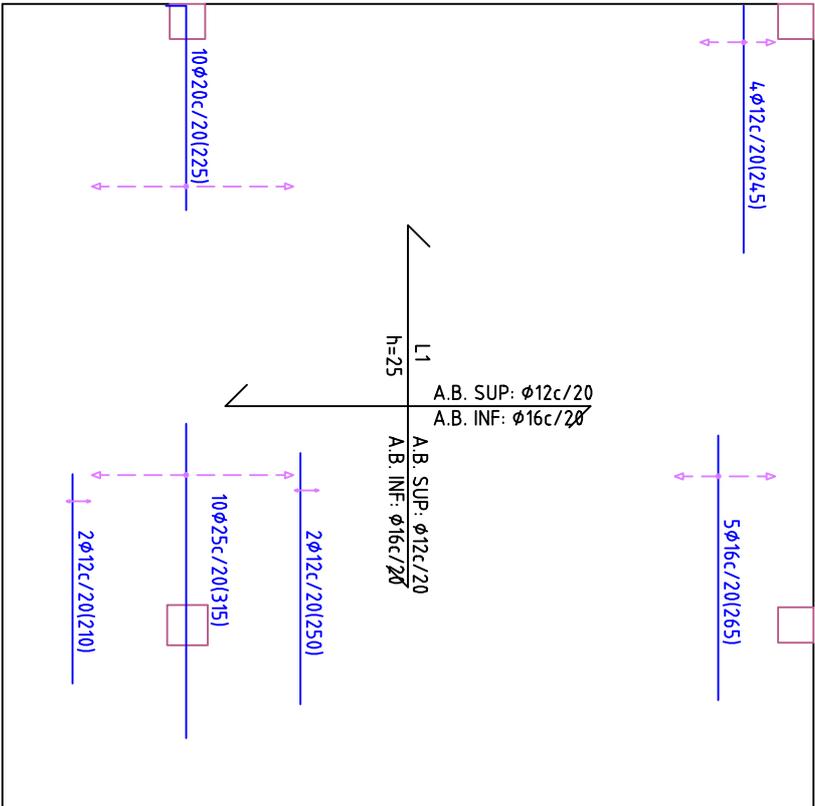
| Materiales                           | Hormigón      |                 |         | Acero            |               |                  |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|---------|------------------|---------------|------------------|
|                                      | Control       | Características | Control | Características  | Control       | Características  |
| Elemento Zona/Planta                 | Nivel Control | Cof. Ponde.     | Tipo    | Consistencia     | Nivel Control | Cof. Ponde. Tipo |
| Acero en armaduras                   |               |                 |         | Tamaño máx. fido | Normal        | γ s415 B-500S    |
| Acero estructural                    |               |                 |         |                  | Normal        | γ s415 A42b      |
| Forjado tipo losa de hormigón armado | Estándar      | γ c130          | HA-25   |                  | Normal        | γ s415           |
| Ejecución (acciones)                 | Meso          | γ c135 y 0.150  |         | Blindo (h.3 mil) | I             | Normal           |
| Exposición/ambiente                  | I             |                 |         |                  |               | γ s415 B-500S    |
| Recurrimientos nominales (mm)        | 30            | 35              | 40      |                  |               |                  |

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE-08, EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SI SE EFECTUA EL CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE-08, EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.



|  |   |   |                                 |                     |   |                   |                      |
|--|---|---|---------------------------------|---------------------|---|-------------------|----------------------|
|  | INSTITUCIONES:<br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA<br>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS | TÍTULO DEL PROYECTO:<br>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes 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 | AUTOR:<br>MANUEL BURRAGO MORENO | FECHA:<br>MAYO-2012 | PLANO:<br>Edificio Experimental, Forjados F-01 y F-02 Armado Base y Refuerzos Transversales | ESCALA:<br>1 / 75 | N.º DE PLANO:<br>3.1 |
|--|---|---|---------------------------------|---------------------|---|-------------------|----------------------|

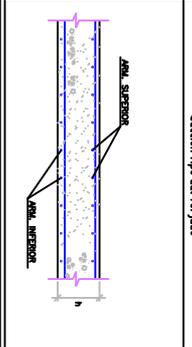


CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

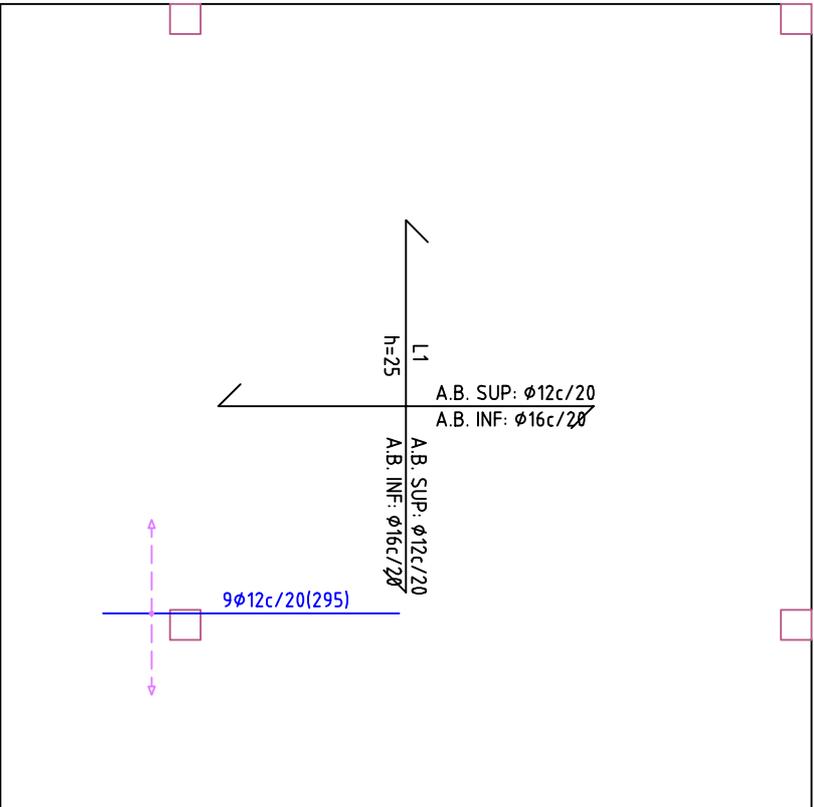
| Materiales                          | Control       |                  |       | Hormigón     |                   | Control             |               | Acero        |        |
|-------------------------------------|---------------|------------------|-------|--------------|-------------------|---------------------|---------------|--------------|--------|
|                                     | Nivel Control | Coef. Ponde.     | Tipo  | Consistencia | Tamaño máx. grido | Exposición Ambiente | Nivel Control | Coef. Ponde. | Tipo   |
| Elemento Zona/Planta                |               |                  |       |              |                   |                     |               |              |        |
| Acero en armaduras                  |               |                  |       |              |                   |                     | Normal        | 7 s15        | B-5005 |
| Acero estructural perfiles          |               |                  |       |              |                   |                     | Normal        | 7 s15        | A42b   |
| Ferido tipo losa de hormigón armado | Estándar      | 7 c150           | HA-25 | Bajo B-100   | 20 mm             | I                   | Normal        | 7 s15        | B-5005 |
| Ejecución (acciones)                | hiena         | 7 e135<br>7 e150 |       |              |                   |                     |               |              |        |
| Exposición/ambiente                 | I             | IIa              | IIb   |              |                   |                     |               |              |        |
| Recurrimientos nominales (mm)       | 30            | 35               | 40    |              |                   |                     |               |              |        |

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE-08, EQUIVALE A CONTROL NORMAL - SOLAPES SEGÚN EHE-08
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA



|  |   |
|--|---|
|  | <b>INSTITUCIONES</b><br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA<br>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS   |
|  | <b>TÍTULO DEL PROYECTO</b><br>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes 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 |
| <b>AUTOR</b><br>MANUEL BURTAGO MORENO  | <b>FECHA</b><br>MAYO-2012   |
| <b>PLANO</b><br>Edificio Experimental, Forjados F-01 y F-02 Armado Base y Refuerzos Longitudinales | <b>ESCALA</b><br>1 / 75   |
| <b>Nº DE PLANO</b><br>3.2  |   |



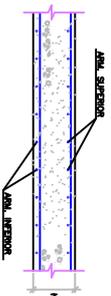
CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

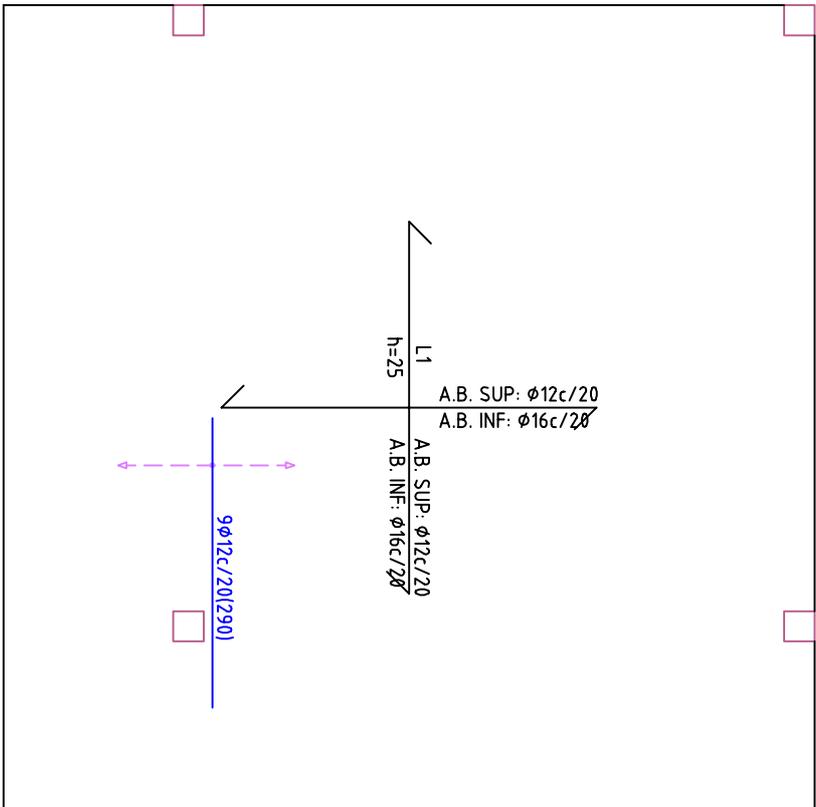
| Materiales                           | Control       |                 | Hormigón |                                  | Control       |             | Acero         |                 |
|--------------------------------------|---------------|-----------------|----------|----------------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|
|                                      | Nivel Control | Cof. Ponde.     | Tipo     | Consistencia                     | Nivel Control | Cof. Ponde. | Nivel Control | Cof. Ponde.     |
| Elemento Zona/Planta                 |               |                 |          | Tamaño máx. grano                |               |             |               |                 |
| Acero en armaduras                   |               |                 |          |                                  |               |             |               |                 |
| Acero estructural perfiles           |               |                 |          |                                  |               |             |               |                 |
| Forjado tipo losa de hormigón armado |               |                 |          |                                  |               |             |               |                 |
| Ejecución (acciones)                 | Meso          | 7 c-135 y 0-150 | HA-25    | Blindo (h=3 cm)                  | 20 mm         | I           | Normal        | 7 c-15 y B-5005 |
| Exposición/ambiente                  | I             | IIa             | IIb      | Adaptado a la instrucción EHE-08 |               |             |               |                 |
| Recurvamientos nominales (mm)        | 30            | 35              | 40       |                                  |               |             |               |                 |

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE-08, EQUIVALE A CONTROL NORMAL
- SI SE USAN PERFILES DE ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.

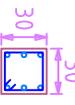
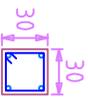
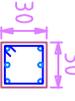
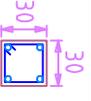
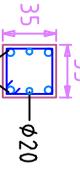
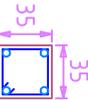
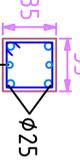
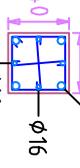
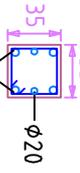
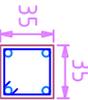
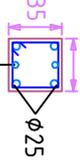
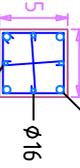
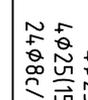
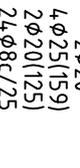
Sección tipo del forjado





| CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES   |               |                    |       |              |                   |                     |               |              |        |
|---|---------------|--------------------|-------|--------------|-------------------|---------------------|---------------|--------------|--------|
| Materiales  | Control       |                    |       | Hormigón     |                   |                     | Acero         |              |        |
|   | Nivel Control | Coef. Ponde.       | Tipo  | Consistencia | Tamaño máx. grido | Exposición Ambiente | Nivel Control | Coef. Ponde. | Tipo   |
| Elemento Zona/Planta  |               |                    |       |              |                   |                     |               |              |        |
| Acero en armaduras  |               |                    |       |              |                   |                     |               |              |        |
| Acero estructural perfiles  |               |                    |       |              |                   |                     |               |              |        |
| Forjado tipo losa de hormigón armado  | Estándar      | γ c=150            | HA-25 | Bajo B-100   | 20 mm             | I                   | Normal        | γ s=15       | B-5005 |
| Ejecución (acciones)  | hiena         | γ c=135<br>γ s=150 |       |              |                   |                     |               |              |        |
| Exposición/ambiente   | I             | I/a                | I/b   |              |                   |                     |               |              |        |
| Recurrimientos nominales (mm)   | 30            | 35                 | 40    |              |                   |                     |               |              |        |
| <p><b>Notas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- CONTROL ESTADÍSTICO EN EHE-08, EQUIVALE A CONTROL NORMAL</li> <li>- SOLAPES SEGÚN EHE-08</li> <li>- EL ACERO UTILIZADO DEBERÁ ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO</li> <li>- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA</li> </ul> |               |                    |       |              |                   |                     |               |              |        |
| <p>Sección tipo del forjado</p>   |               |                    |       |              |                   |                     |               |              |        |

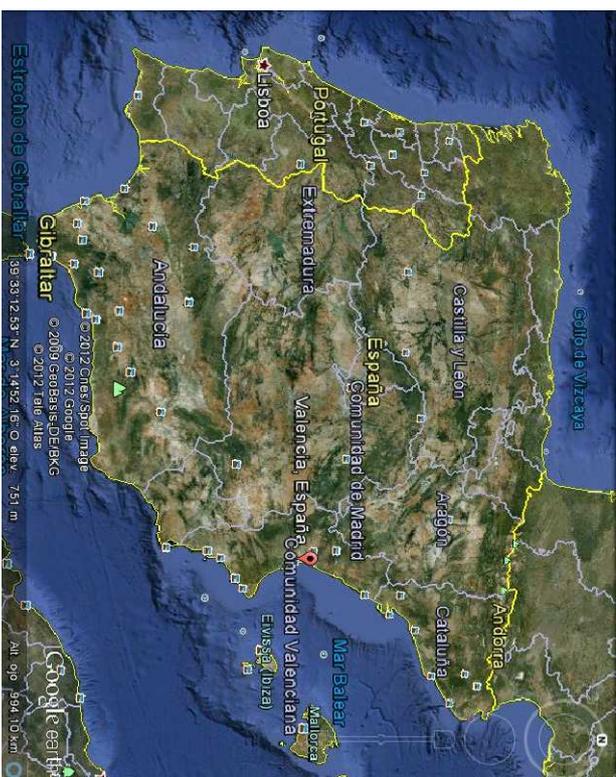
|   |   |  |                               |   |                             |                               |
|---|---|--|-------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------|
| <p>INSTITUCIONES</p> <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> <p>Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos</p> | <p>TÍTULO DEL PROYECTO</p> <p>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes 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</p> | <p>AUTOR</p> <p>MANUEL BURTRAGO MORENO</p> | <p>FECHA</p> <p>MAYO-2012</p> | <p>PLANO</p> <p>Edificio Experimental, Forjado de Cubierta Armado Base y Refuerzos Longitudinales</p> | <p>ESCALA</p> <p>1 / 75</p> | <p>Nº DE PLANO</p> <p>4.2</p> |
|---|---|--|-------------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------|

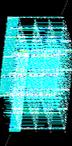
|          | P1  | P2   | P3  | P4   |
|----------|---|--|---|--|
| CUBIERTA |  <p>6<math>\phi</math>16<br/>25<math>\phi</math>6c/20</p>  |  <p>4<math>\phi</math>16<br/>25<math>\phi</math>6c/20</p> |  <p>6<math>\phi</math>16<br/>25<math>\phi</math>6c/20</p>  |  <p>4<math>\phi</math>20<br/>25<math>\phi</math>6c/20</p>   |
|          |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>2<math>\phi</math>20<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p>   |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p>   |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>2<math>\phi</math>20<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p>   |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>4<math>\phi</math>16<br/>25<math>\phi</math>8c/15<br/>2x25<math>\phi</math>8c/15</p>   |
| PLANTA 1 |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>2<math>\phi</math>20<br/>4<math>\phi</math>25(159)<br/>2<math>\phi</math>16(125)<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p> |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p>   |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>2<math>\phi</math>20<br/>4<math>\phi</math>25(159)<br/>2<math>\phi</math>20(125)<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p> |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>4<math>\phi</math>16<br/>4<math>\phi</math>25(159)<br/>4<math>\phi</math>16(105)<br/>25<math>\phi</math>8c/20<br/>2x25<math>\phi</math>8c/20</p> |
|          |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>2<math>\phi</math>20<br/>4<math>\phi</math>25(159)<br/>2<math>\phi</math>16(125)<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p> |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p>   |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>2<math>\phi</math>20<br/>4<math>\phi</math>25(159)<br/>2<math>\phi</math>20(125)<br/>24<math>\phi</math>8c/25</p> |  <p>4<math>\phi</math>25<br/>4<math>\phi</math>16<br/>4<math>\phi</math>25(159)<br/>4<math>\phi</math>16(105)<br/>25<math>\phi</math>8c/20<br/>2x25<math>\phi</math>8c/20</p> |

CUBIERTA  
PLANTA 2  
PLANTA 1  
CIMENTACIÓN

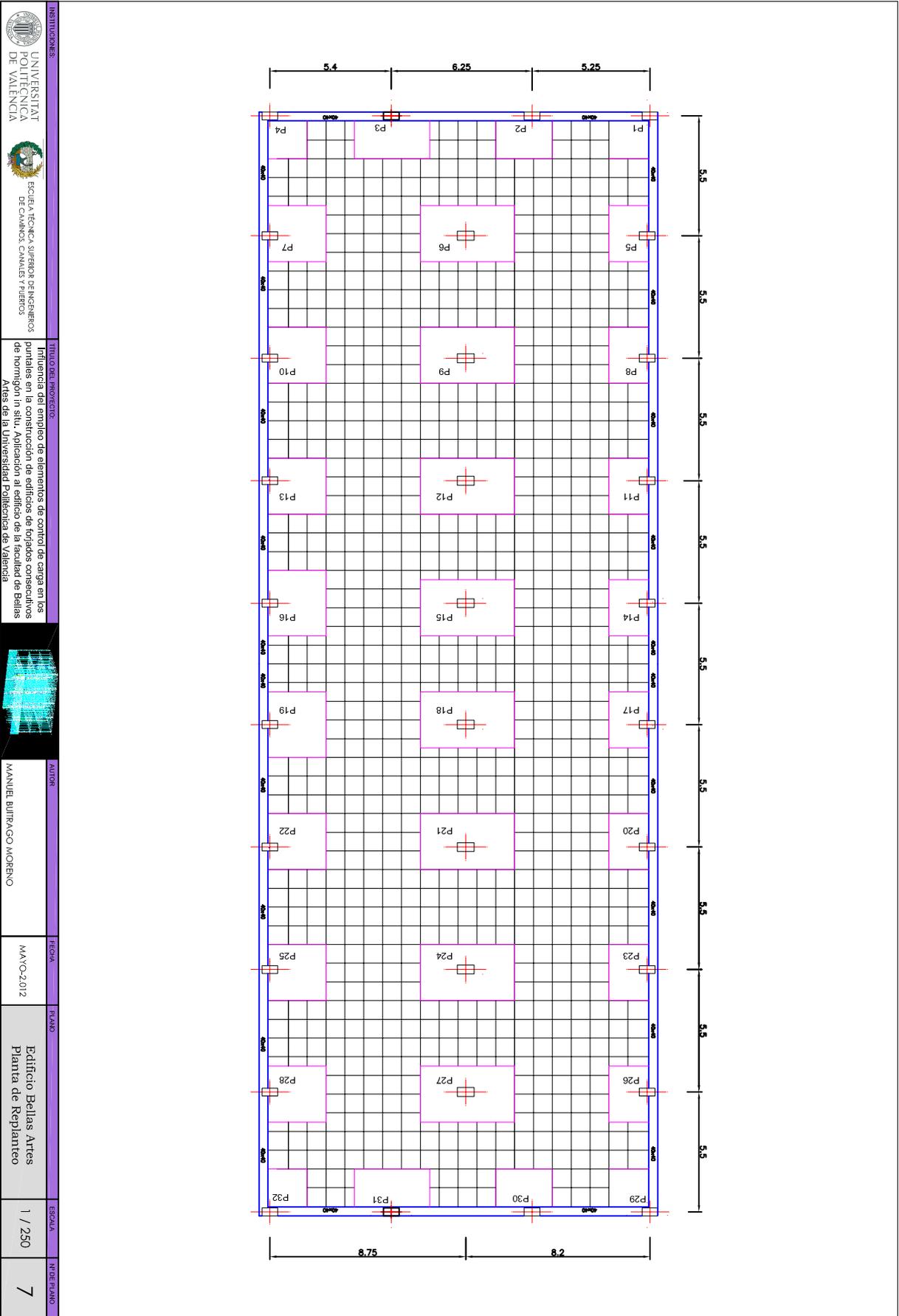
| Resumen Acero Forjados 1 a 3 Pilares | Long. total (m) | Peso+10% (Kg) | Total |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|-------|
| B 500 S, CN $\phi$ 6                 | 108,5           | 26            |       |
| $\phi$ 8                             | 329,6           | 14,3          |       |
| $\phi$ 16                            | 81,8            | 14,2          |       |
| $\phi$ 20                            | 4,7,2           | 128           |       |
| $\phi$ 25                            | 151,8           | 644           | 1083  |

Cuadro de pilares  
Hormigón: HA-25, Control Estadístico  
Acero: B 500 S, Control Normal

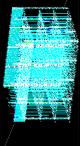


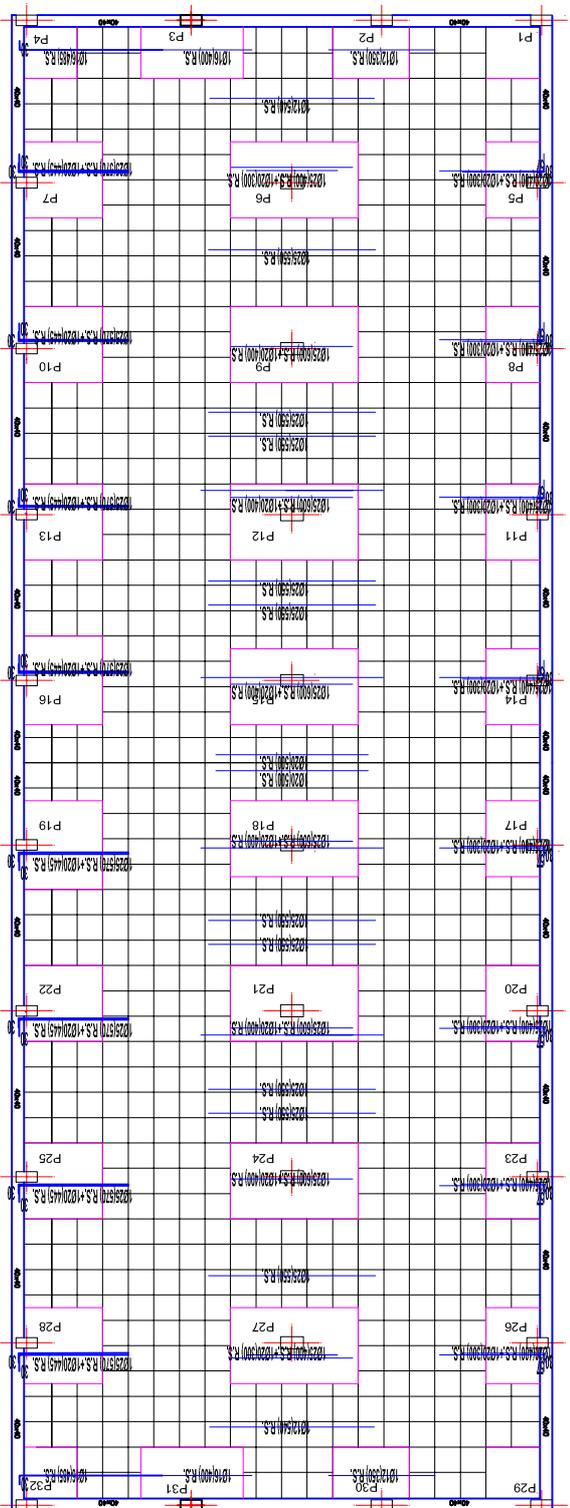
|   |   |   |   |                                       |   |   |
|---|---|---|---|---------------------------------------|---|---|
| <p><b>INSTITUCIONES:</b></p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos</p> | <p><b>TÍTULO DEL PROYECTO:</b></p> <p>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes en la construcción de edificios de torres consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia</p> |  | <p><b>AUTOR:</b></p> <p>MANUEL BURRAGO MORENO</p> | <p><b>FECHA:</b></p> <p>MAYO 2012</p> | <p><b>PLANO:</b></p> <p>Edificio Bellas Artes<br/>Situación y emplazamiento</p> | <p><b>ESCALA:</b></p> <p><b>Nº DE PLANO:</b></p> <p>6</p> |
|---|---|---|---|---------------------------------------|---|---|

*Influencia del empleo de elementos de control de carga en puentes*

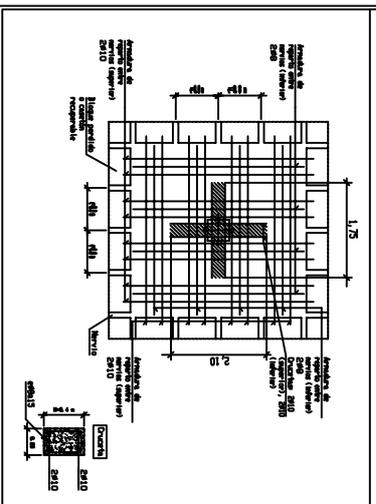


Apéndice I. Planos

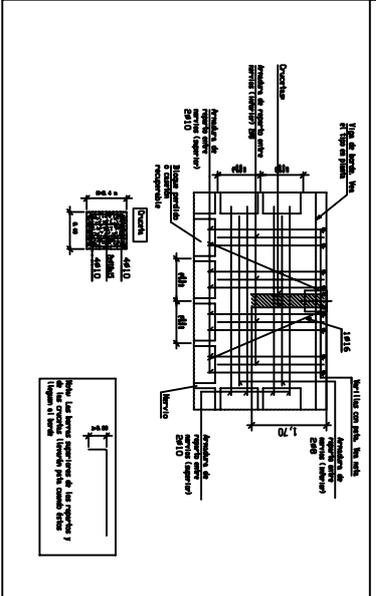
|  |  |   |  |                                |  |                               |                              |
|--|--|---|--|--------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|
| <p>INSTITUCIONES:</p>  <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p>  <p>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS</p> | <p>TÍTULO DEL PROYECTO:</p> <p>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes en la construcción de edificios de torres consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia</p> |  | <p>AUTOR:</p> <p>MANUEL BURRAGO MORENO</p> | <p>FECHA:</p> <p>MAYO-2012</p> | <p>PLANO:</p> <p>Edificio Bellas Artes<br/>Planta de Replanteo</p> | <p>ESCALA:</p> <p>1 / 250</p> | <p>Nº DE PLANO:</p> <p>7</p> |
|--|--|---|--|--------------------------------|--|-------------------------------|------------------------------|



Armadura de montaje de abaco central con pilar de hormigón.



Armadura de montaje de abaco de medianería con pilar de hormigón.



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

| Materiales                             | Hormigón |         |         | Acero           |         |
|--|----------|---------|---------|-----------------|---------|
|  | Elemento | Nivel   | Control | Características | Control |
| Zona/Fuente                            | Central  | Control | Control | Características | Control |
| Acero en armaduras                     |          | Control | Control | Características | Control |
| Acero estructural                      |          | Control | Control | Características | Control |
| Perfiles                               |          | Control | Control | Características | Control |
| Ferrolado tipo lasa de hormigón armado |          | Control | Control | Características | Control |
| Estructura (Accional)                  |          | Control | Control | Características | Control |
| Especificación ambiente                |          | Control | Control | Características | Control |
| Requisitos mínimos                     |          | Control | Control | Características | Control |
| Normativas (mm)                        |          | Control | Control | Características | Control |

| Materiales |          |         |         |
|------------|----------|---------|---------|
| Control    | Elemento | Nivel   | Control |
| 30         | Control  | Control | Control |
| 35         | Control  | Control | Control |
| 40         | Control  | Control | Control |

Adaptado a la instrucción EHE-48

CONTROL ESTADÍSTICO DE BENE-DE-ESPAÑA A CONTROL NORMAL

- CONTROL ESTADÍSTICO DE BENE-DE-ESPAÑA A CONTROL NORMAL

- EL ACERO UTILIZADO DEBE ESTAR GARANTIZADO CON UN

- DISTINTIVO RECONOCIDO

- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE

- PROYECTO SE VERIFICAN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.

Sección tipo del ferrolado

INSTITUCIONES: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCALA: 1 / 250

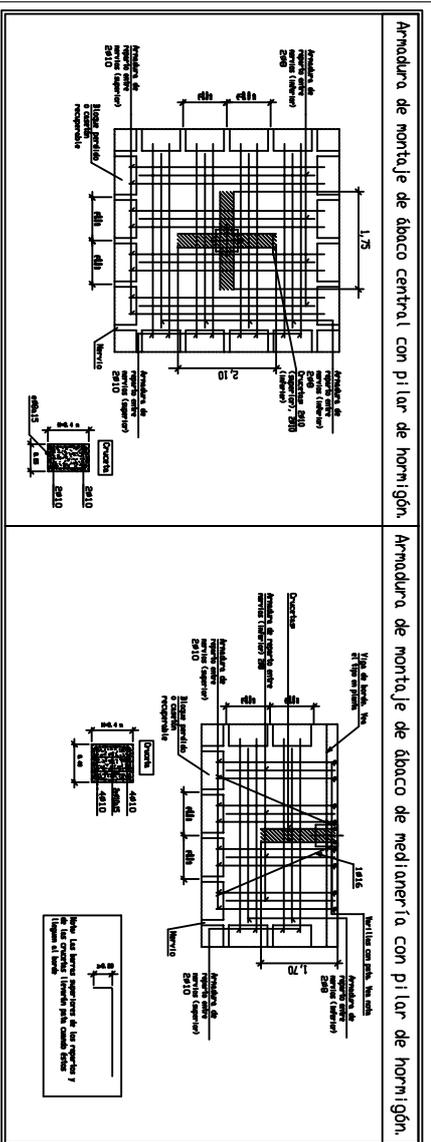
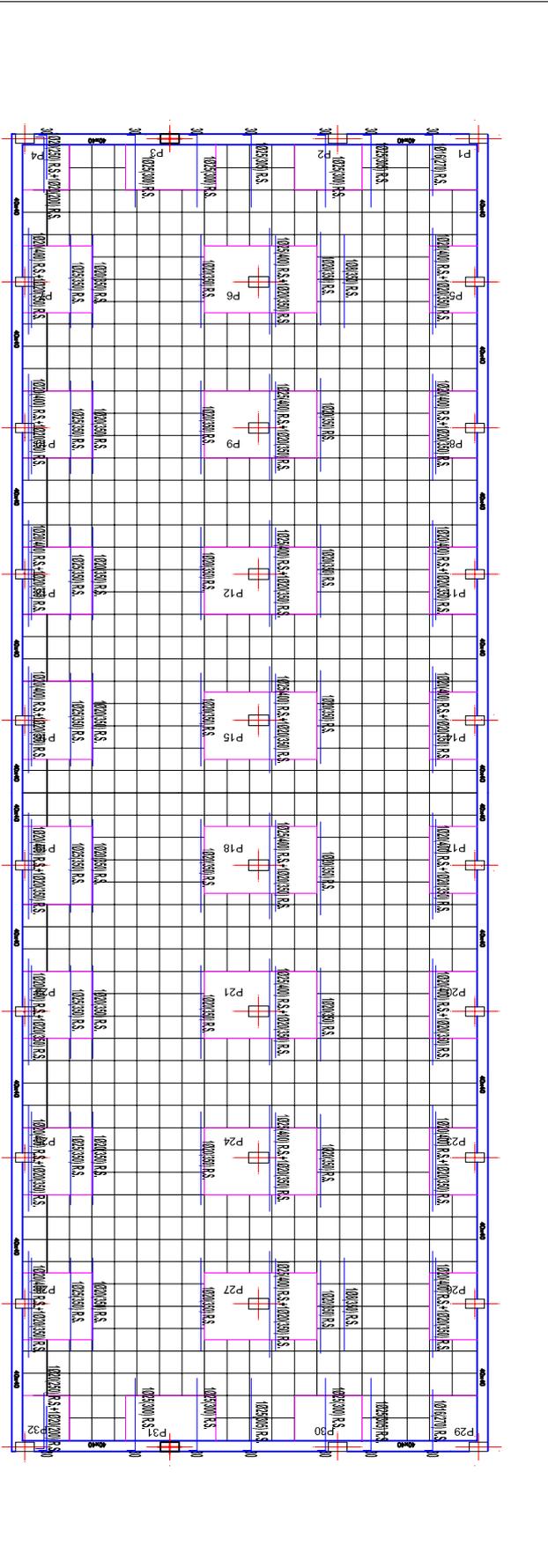
Nº DE PLANO: 8.1

TÍTULO DEL PROYECTO: Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes en la construcción de edificios de torres consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia

AUTOR: MANUEL BURRAGO MORENO

FECHA: MAYO-2012

PLANO: Edificio Bellas Artes. Armadura base y reforzados transversales superiores



**CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES**

| Materiales                         | Hormigón  |                 | Acero     |                 |
|------------------------------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
|                                    | Control   | Características | Control   | Características |
| Elemento                           | Nivel     | Control         | Nivel     | Control         |
| Zona/Planta                        | Ceef.     | Ponche.         | Ceef.     | Ponche.         |
| Aforo en armaduras                 | Tipos     | Comistencia     | Tipos     | Comistencia     |
| Acero estructural                  | Tamaño    | max. fido       | Epesición | Ambiente        |
| Acero pasivo                       | Epesición |                 | Nivel     | B-500S          |
| Recub. por capa de hormigón armado | Nivel     |                 | Nivel     | B-500S          |
| Epesición (acabado)                | Epesición |                 | Nivel     | B-500S          |
| Epesición/ambiente                 | Epesición |                 | Nivel     | B-500S          |
| Resistencia (nominal)              | Epesición |                 | Nivel     | B-500S          |

**Notas**

- CONTROL ESTADÍSTICO BI DEE-48. EQUIVALE A CONTROL NORMAL.
- SI LA RESISTENCIA DEBIDA A LA TENSIÓN DE TRACCIÓN ES SUPERIOR A LA DEBIDA A LA TENSIÓN DE COMPRESIÓN, SE DEBE APLICAR EL CONTROL ESTADÍSTICO BI DEE-48.
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.

**Sección tipo del forjado**

**INSTITUCIONES:** UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**ECIPIA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYEROS DE CAMINOS, CANALS I FERROS**

**TÍTULO DEL PROYECTO:** Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes en la construcción de edificios de torres consecutivos de hormigón in situ. Aplicación al edificio de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia

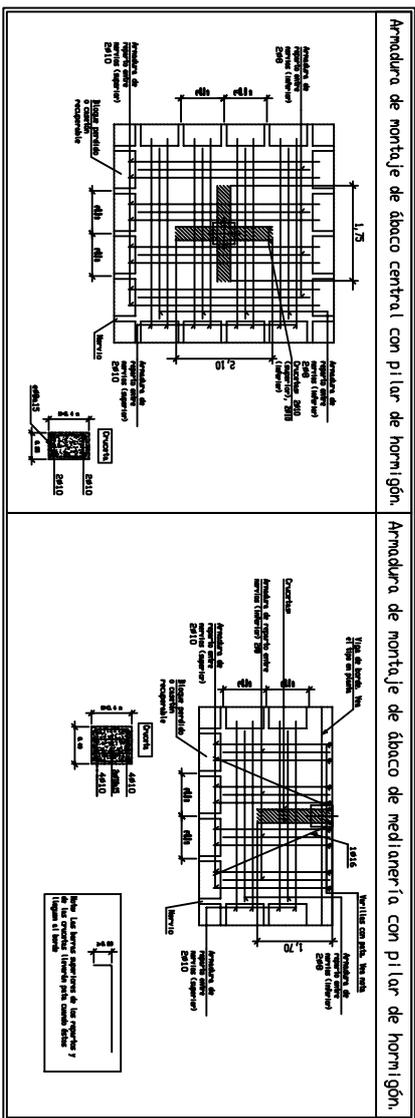
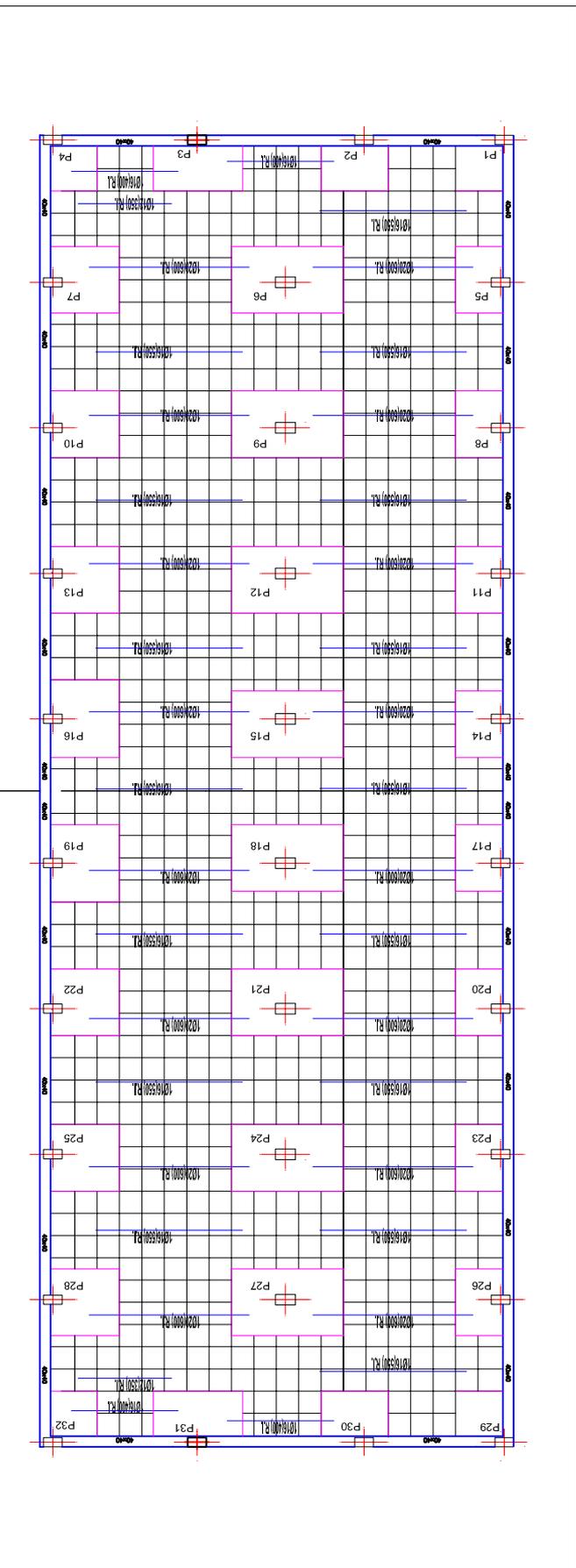
**AUTORE:** MANUEL BURRAGO MORENO

**FECHA:** MAYO-2012

**PLANO:** Edificio Bellas Artes. Armadura base y refuerzos longitudinales superiores

**ESCALA:** 1 / 250

**Nº DE PLANO:** 8.2



**CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES**

| Herramienta                          | Control       |               | Hormigón |                     | Acero         |               |
|--------------------------------------|---------------|---------------|----------|---------------------|---------------|---------------|
|                                      | Nivel Control | Codif. Fichas | Tamaño   | Exposición Ambiente | Nivel Control | Codif. Fichas |
| Elemento                             |               |               |          |                     |               |               |
| Elemento                             |               |               |          |                     |               |               |
| Acero en armaduras                   |               |               |          |                     |               |               |
| Acero estructural                    |               |               |          |                     |               |               |
| Perfiles                             |               |               |          |                     |               |               |
| Formado tipo losa de hormigón armado | Estándar      | 7 c109        | HA-25    | Medio (B-1) III     | Medio         | 7 s115 B-5005 |
| Función (acciones)                   | Medio         | 7 c115        |          |                     | Medio         | 7 s115 B-5005 |
| Exposición/ambiente                  | I             | Ia            |          |                     |               |               |
| Requisitos mínimos (mm)              | 30            | 35            | 40       |                     |               |               |

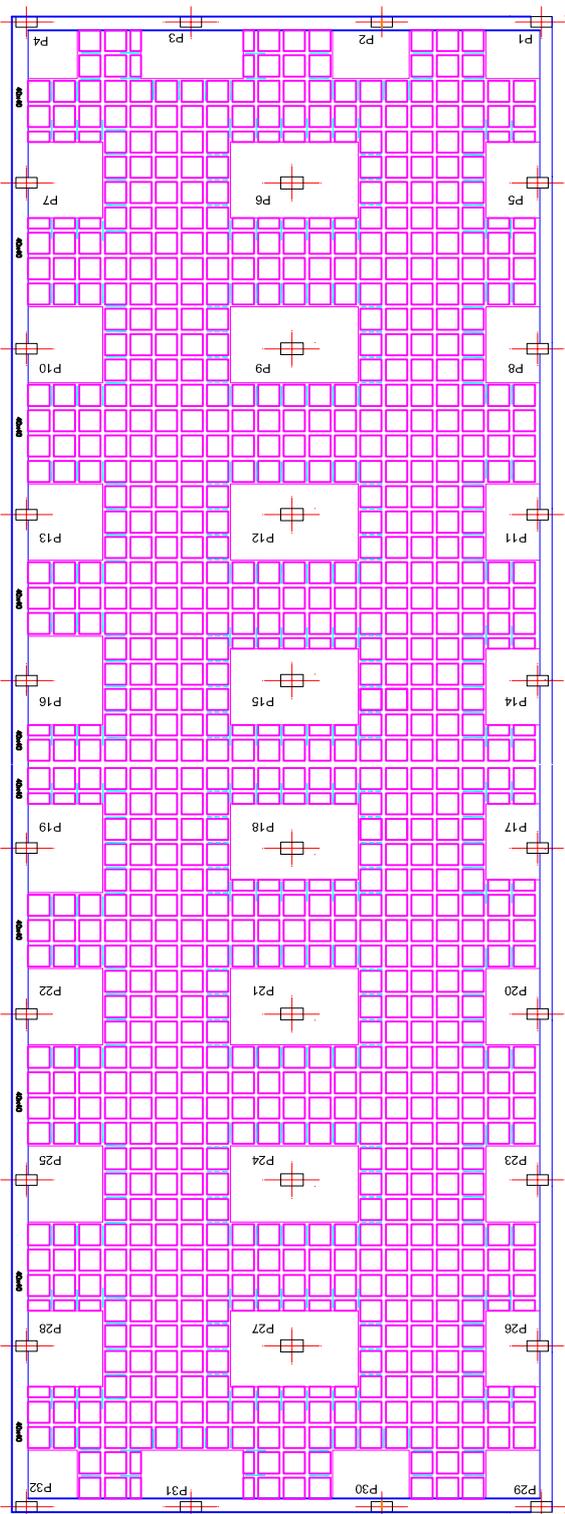
**Notas**

- CONTROL ESTADÍSTICO DE BENE-EN EQUIVALE A CONTROL NORMAL.
- SÓLO SE SIGUE DE BENE-EN CUANDO ESTAS CUANTIFICADO CON UN DISTINTO RECONOCIMIENTO.
- TODOS LOS DATOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE ARQUITECTURA.

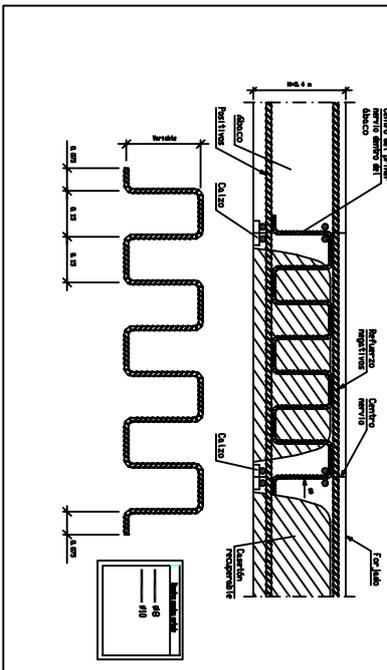
**Sección tipo del forjado**

|                      |  |  |  |
|----------------------|--|--|--|
| <p>INSTITUCIONES</p> | <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA</p> <p>ESCALA</p>                         | <p>ECIENIA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA DE CAMIONS, CANALS I FERROUS</p> <p>TÍTULO DEL PROYECTO</p> | <p>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes 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</p> |
| <p>AUTOR</p>         | <p>MANUEL BURRAGO MORENO</p>   | <p>FECHA</p>   | <p>MAYO-2012</p>   |
| <p>ESCALA</p>        | <p>Edificio Bellas Artes. Armadura base y refuerzos transversales interiores</p> | <p>Nº DE PLANO</p>   | <p>1 / 250</p>   |
| <p>Nº DE PLANO</p>   | <p>8.3</p>   |  |  |





Refuerzo de nervios a cortante en salida de ábaco mediante espirales.  
Forjado reticular. Casetón recuperable.



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

| Materiales                             | Control       |             | Hormigón |              | Características  |                      | Acero         |             |
|--|---------------|-------------|----------|--------------|------------------|----------------------|---------------|-------------|
|  | Nivel Control | Cof. Pavim. | Tipo     | Consistencia | Tamaño máx. nº 8 | Exposición ambiental | Nivel Control | Cof. Pavim. |
| Ejemplo Zona/obra                      |               |             |          |              |                  |                      |               |             |
| Acero en armaduras                     |               |             |          |              |                  |                      |               |             |
| Acero estructural perfiles             |               |             |          |              |                  |                      |               |             |
| Forjado tipo lasa de hormigón armado   |               |             |          |              |                  |                      |               |             |
| Ejecución (accidental)                 |               |             |          |              |                  |                      |               |             |
| Exposición/ambiente                    |               |             |          |              |                  |                      |               |             |
| Resistencia nominal (f <sub>td</sub> ) |               |             |          |              |                  |                      |               |             |

Notas

- CONTROL ESTADÍSTICO EN BIC-40 EQUIVALE A CONTROL NORMAL.
- SOLARES SEGÚN BIC-40
- EL ACERO UTILIZADO DEBERÍA ESTAR GARANTIZADO CON UN DISTINTIVO RECONOCIDO
- TODOS LOS DIBUJOS RELATIVOS A LA GEOMETRÍA DE ESTE PROYECTO SE VERIFICARÁN CON LOS PLANOS DE PRODUCTIVA.

Sección tipo del forjado

Ábaco superior y nervio  
Estado inferior  
Nervio  
Caja de concreto  
Estado superior

|  |  |  |                                |                    |   |                   |                    |
|--|--|--|--------------------------------|--------------------|---|-------------------|--------------------|
|  | INSTITUCIONES<br>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA<br>ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS | TÍTULO DEL PROYECTO<br>Influencia del empleo de elementos de control de carga en los puentes 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 | AUTOR<br>MANUEL BURRAGO MORENO | FECHA<br>MAYO-2012 | PLANO<br>Edificio Bellas Artes. Refuerzo de nervios a cortante en salida de ábaco | ESCALA<br>1 / 250 | Nº DE PLANO<br>8.5 |
|--|--|--|--------------------------------|--------------------|---|-------------------|--------------------|



## APÉNDICE II. REGISTRO FOTOGRÁFICO

### II.1 Introducción

En el presente apéndice se muestra un registro fotográfico de los diferentes edificios escogidos. En primer lugar, se mostrarán las imágenes correspondientes al edificio experimental y, en segundo lugar, las correspondientes al edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.

### II.2 Registro fotográfico del edificio experimental

#### II.2.1 Cartel informativo



Fig. II.1 Cartel informativo instalado en el emplazamiento del edificio experimental

## **II.2.2 Cimentación**



Fig. II.2 Hormigón de limpieza y replanteo de la cimentación



Fig. II.3 Hormigonado de la losa de cimentación

### ***II.2.3 Pilares del forjado 1***



Fig. II.4 Hormigonado de los pilares del primer forjado

### ***II.2.4 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 1***



Fig. II.5 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 1



Fig. II.6 Sistema de cimbrado forjado 1

### ***II.2.5 Armado del forjado 1***



Fig. II.7 Armado del forjado 1

### II.2.6 Hormigonado del forjado 1

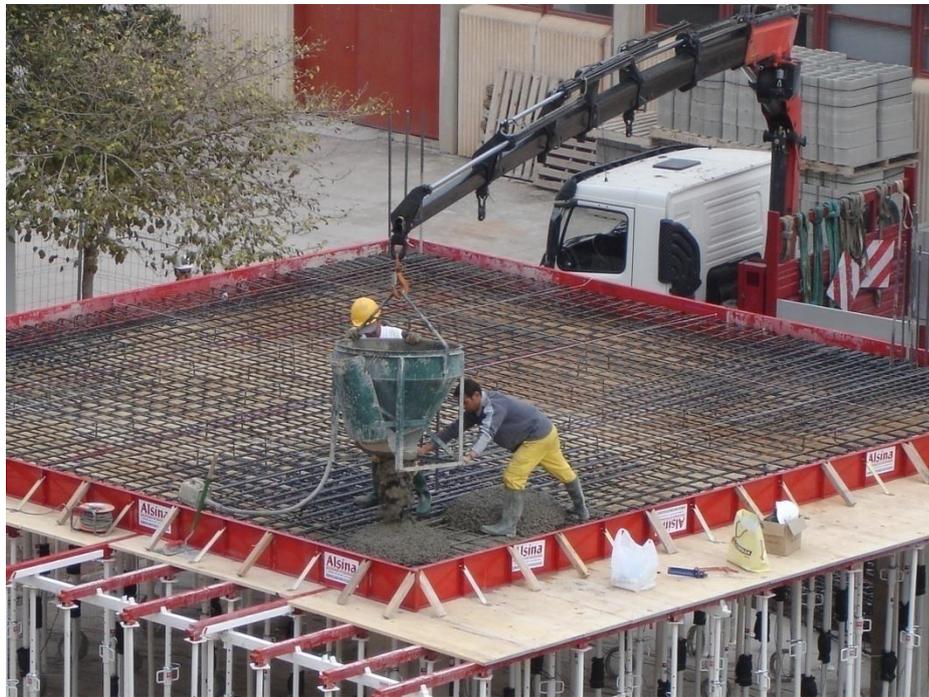


Fig. II.8 Hormigonado del forjado 1



Fig. II.9 Instalación de termopares en el hormigón del forjado 1



Fig. II.10 Probetas de hormigón curadas en las mismas condiciones que el forjado 1



Fig. II.11 Hormigonado del forjado 1

### ***II.2.7 Pilares del forjado 2***



Fig. II.12 Montaje del encofrado de los pilares del forjado 2

### ***II.2.8 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 2***



Fig. II.13 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 2

### ***II.2.9 Clareado del forjado 1***



Fig. II.14 Clareado del forjado 1



Fig. II.15 Clareado del forjado 1

### II.2.10 Armado del forjado 2



Fig. II.16 Armado del forjado 2

### II.2.11 Hormigonado del forjado 2



Fig. II.17 Hormigonado del forjado 2



Fig. II.18 Hormigonado del forjado 2



Fig. II.19 Curado del forjado 2

### ***II.2.12 Hormigonado de los pilares del forjado 3***



Fig. II.20 Hormigonado de los pilares del forjado 3

### ***II.2.13 Clareado del forjado 2***



Fig. II.21 Clareado del forjado 2



Fig. II.22 Clareado del forjado 2

### ***II.2.14 Descimbrado del forjado 1***



Fig. II.23 Descimbrado del forjado 1



Fig. II.24 Descimbrado del forjado 1

### ***II.2.15 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 3***



Fig. II.25 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 3

### ***II.2.16 Armado del forjado 3***



Fig. II.26 Armado del forjado 3

### ***II.2.17 Hormigonado del forjado 3***



Fig. II.27 Hormigonado del forjado 3



Fig. II.28 Hormigonado del forjado 3

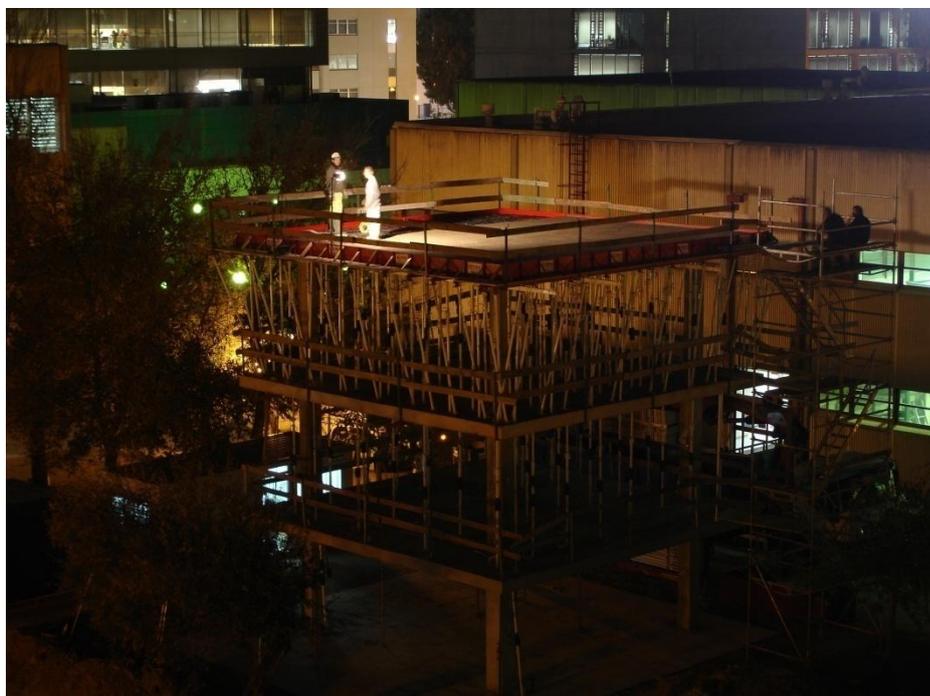


Fig. II.29 Hormigonado del forjado 3

### ***II.2.18 Clareado del forjado 3***



Fig. II.30 Clareado del forjado 3



Fig. II.31 Manipulación del basculante de las sopandas principales durante la operación de clareado



Fig. II.32 Clareado del forjado 3

### *II.2.19 Carga en el forjado 3*



Fig. II.33 Instalación de balsas plásticas para aplicar la carga en el forjado 3



Fig. II.34 Balsas plásticas para aplicar la carga en el forjado 3



Fig. II.35 Llenado del las balsas plásticas para aplicar la carga en el forjado 3



Fig. II.36 Aplicación de la carga en el forjado 3

### ***II.2.20 Descimbrado del forjado 2***



Fig. II.37 Descimbrado del forjado 2

### ***II.2.21 Descimbrado del forjado 3***



Fig. II.38 Descimbrado del forjado 3

## II.3 Registro fotográfico del edificio de la facultad de Bellas Artes

### II.3.1 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 1



Fig. II.39 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 1



Fig. II.40 Instalación de casetones recuperables del forjado 1



Fig. II.41 Conexión muro-forjado

### ***II.3.2 Hormigonado del forjado 1***



Fig. II.42 Hormigonado del forjado 1



Fig. II.43 Hormigonado del forjado 1 y ejecución de pilares del nivel 2

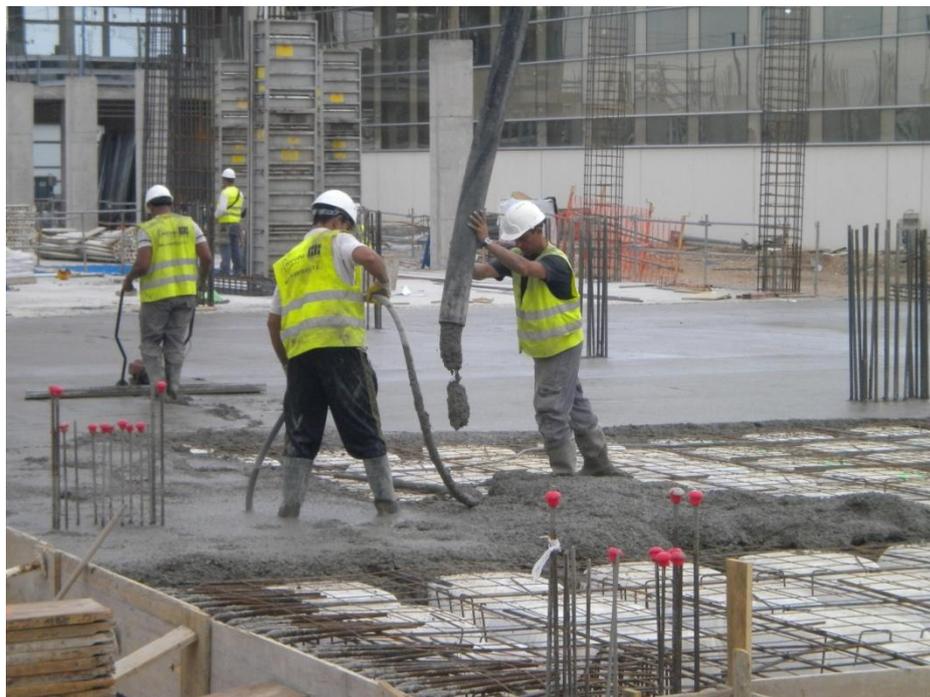


Fig. II.44 Hormigonado y vibrado del forjado 1



Fig. II.45 Curado del hormigón del forjado 1

### ***II.3.3 Pilares y elementos de seguridad del forjado 2***



Fig. II.46 Pilares y elementos de seguridad del forjado 2

### ***II.3.4 Clareado del forjado 1***



Fig. II.47 Clareado del forjado 1

### ***II.3.5 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 2***



Fig. II.48 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 2

### **II.3.6 Hormigonado del forjado 2**



Fig. II.49 Hormigonado del forjado 2



Fig. II.50 Hormigonado del forjado 2

### II.3.7 Clareado del forjado 2



Fig. II.51 Clareado del forjado 2



Fig. II.52 Clareado del forjado 2

### ***II.3.8 Descimbrado del forjado 1***



Fig. II.53 Descimbrado del forjado 1

### ***II.3.9 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 3***



Fig. II.54 Instalación del sistema de cimbrado del forjado 3



Fig. II.55 Elementos de seguridad del forjado 3

### ***II.3.10 Hormigonado del forjado 3***



Fig. II.56 Hormigonado del forjado 3

### ***II.3.11 Clareado del forjado 3***



Fig. II.57 Clareado del forjado 3

### ***II.3.12 Descimbrado del forjado 2***



Fig. II.58 Descimbrado del forjado 2

### II.3.13 Hormigonado del forjado 4



Fig. II.59 Hormigonado del forjado 4

## APÉNDICE III. ESTIMACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE LOS FORJADOS

### III.1 Introducción

El desarrollo del modelo de Elementos Finitos de los Capítulos 3-4 y 5 considera que la rigidez de los forjados evoluciona en función del tiempo. Esta particularidad plantea la necesidad de estimar el valor del módulo de elasticidad del hormigón de cada uno de los forjados, para cada una de las fases constructivas consideradas en el modelo de Elementos Finitos.

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 justifican los valores del módulo de elasticidad considerados para los elementos de hormigón integrados en los modelos numéricos.

### III.2 Evolución del módulo de elasticidad del edificio experimental

#### III.2.1 Datos de partida

El primer 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 III.1 muestra los resultados de los ensayos de las probetas.

Tabla III.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 y en los forjados de hormigón. En las Figuras III.1, III.2 y III.3 se muestra la evolución de la temperatura de los forjados 1, 2 y 3, respectivamente.

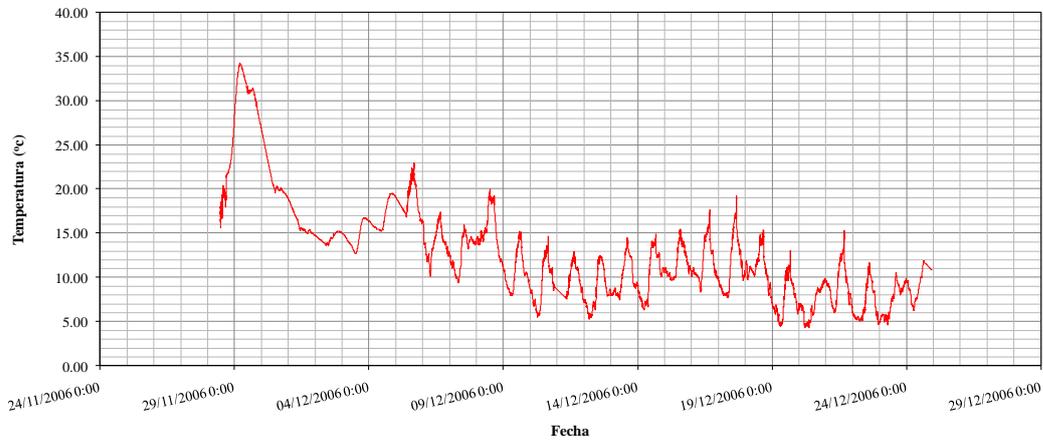


Fig. III.1 Temperaturas registradas en el hormigón del forjado 1

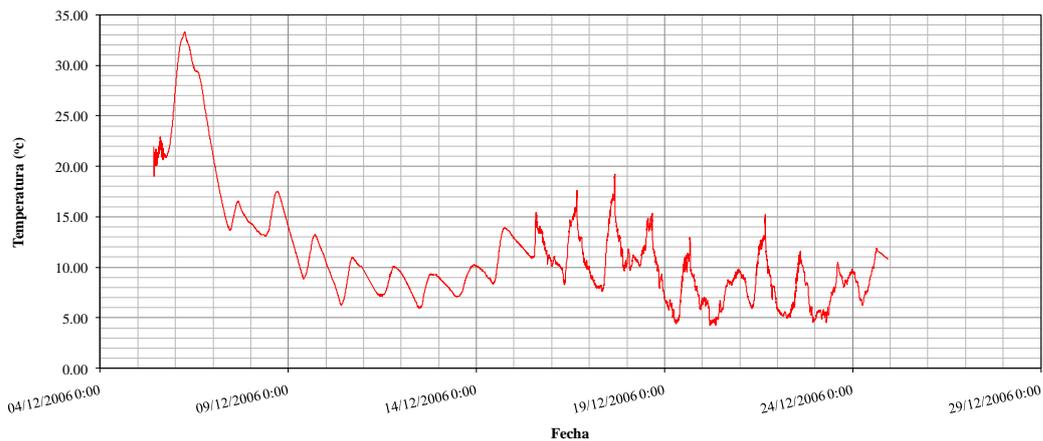


Fig. III.2 Temperaturas registradas en el hormigón del forjado 2

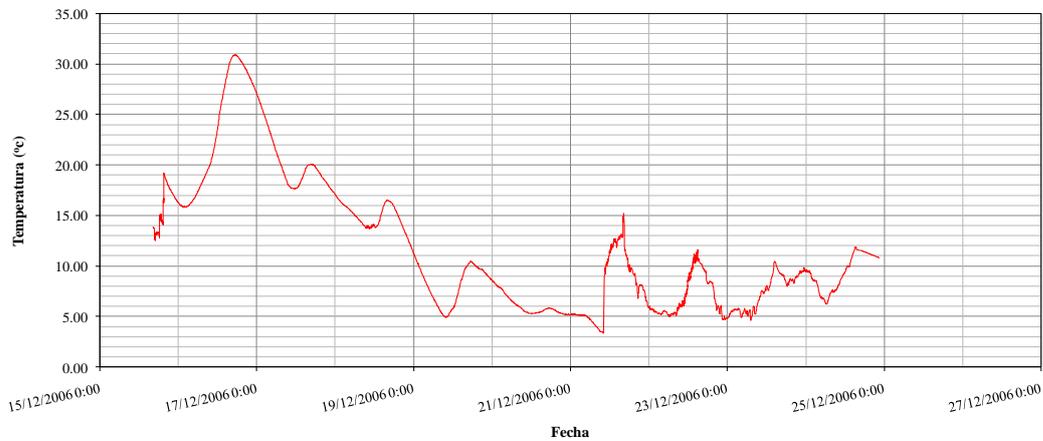


Fig. III.3 Temperaturas registradas en el hormigón del forjado 3

En la Tabla III.2 se observa la evolución media diaria de temperaturas en las probetas de hormigón del forjado 1 y del hormigón de los 3 forjados.

Tabla III.2 Evolución de la temperatura del hormigón de las probetas del forjado 1 y de los forjados del modelo experimental

| Tiempo (Días) | Temperatura promedio (°C) Probeta F+01 | Temperatura promedio (°C) F+01 | Temperatura promedio (°C) F+02 | Temperatura promedio (°C) F+03 |
|---------------|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1             | 15.76                                  | 29.37                          | 27.21                          | 17.40                          |
| 2             | 12.28                                  | 26.04                          | 22.91                          | 25.53                          |
| 3             | 13.08                                  | 16.59                          | 14.53                          | 16.23                          |
| 4             | 14.62                                  | 14.63                          | 13.91                          | 13.39                          |
| 5             | 12.70                                  | 14.29                          | 12.10                          | 7.92                           |
| 6             | 15.55                                  | 16.20                          | 9.22                           | 5.15                           |
| 7             | 15.42                                  | 18.53                          | 7.88                           | 7.04                           |
| 8             |  | 20.33                          | 7.44                           | 7.46                           |
| 9             |  | 13.06                          | 8.99                           | -                              |
| 10            |  | 14.37                          | 12.10                          | -                              |
| 11            |  | 12.94                          | 12.15                          | -                              |
| 12            |  | 9.76                           | 11.85                          | -                              |
| 13            |  | 10.87                          | 12.20                          | -                              |
| 14            |  | 9.03                           | 11.26                          | -                              |
| 15            |  | 8.93                           | 7.48                           | -                              |
| 16            |  | 9.80                           | 7.02                           | -                              |
| 17            |  | 11.36                          | 6.98                           | -                              |
| 18            | 12.42                                  | 12.65                          | 7.52                           | -                              |
| 19            |  | 11.09                          | -                              | -                              |
| 20            |  | 12.01                          | -                              | -                              |
| 21            |  | 10.97                          | -                              | -                              |
| 22            |  | 7.52                           | -                              | -                              |
| 23            |  | 7.84                           | -                              | -                              |
| 24            |  | 7.14                           | -                              | -                              |
| 25            |  | 8.55                           | -                              | -                              |
| 26            |  | -                              | -                              | -                              |
| 27            |  | -                              | -                              | -                              |
| 28            |  | -                              | -                              | -                              |

### III.2.2 Aplicación de la madurometría

La estimación del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados del modelo experimental se realizó 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 de los tres forjados durante el proceso constructivo.

En el siguiente apartado se describe brevemente el método de la madurez, justificando los valores del módulo de elasticidad empleados en el desarrollo del modelo numérico experimental del presente Proyecto Final de Carrera.

### III.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) y Alvarado (2009).

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. III.1) (Guo 1989) (Laplante 1994), P. Freiesleben Hansen y E.J. Pedersen en 1977 propusieron la Ec. III.2 de tiempo equivalente (CEB 1992).

$$k = A \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T}} \quad (\text{III.1})$$

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 una 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).

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left( e^{\frac{E}{R} \left( \frac{1}{273+T_R} - \frac{1}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \quad (\text{III.2})$$

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  $\Delta t_i$  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. III.3.

$$j = \sum_{i=0}^{i=t} \left( e^{\left( 13.65 \cdot \frac{4000}{273+T_i} \right)} \cdot \Delta t_i \right) \tag{III.3}$$

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).

### III.2.2.2 Estimación del módulo de elasticidad

La Figura III.4 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 III.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 III.3 muestra el tiempo equivalente para la probeta de hormigón. La Figura III.5 muestra la línea de tendencia para la evolución del módulo de elasticidad para una temperatura de referencia de 20°C.

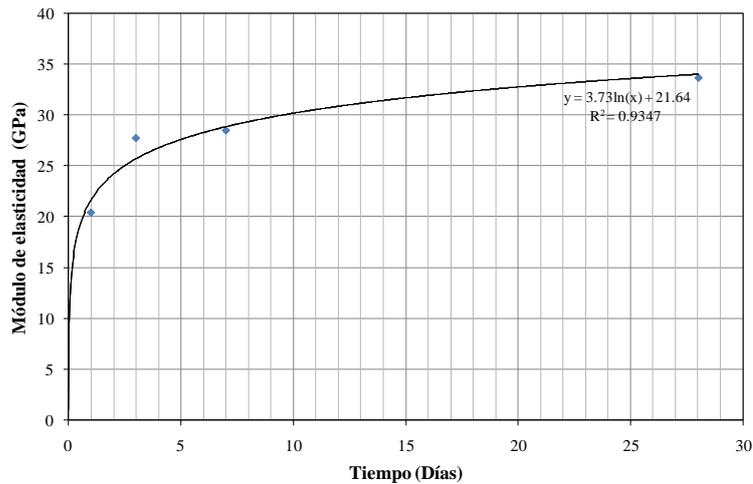


Fig. III.4 Evolución del módulo de elasticidad de la probeta de hormigón

Tabla III.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                                |

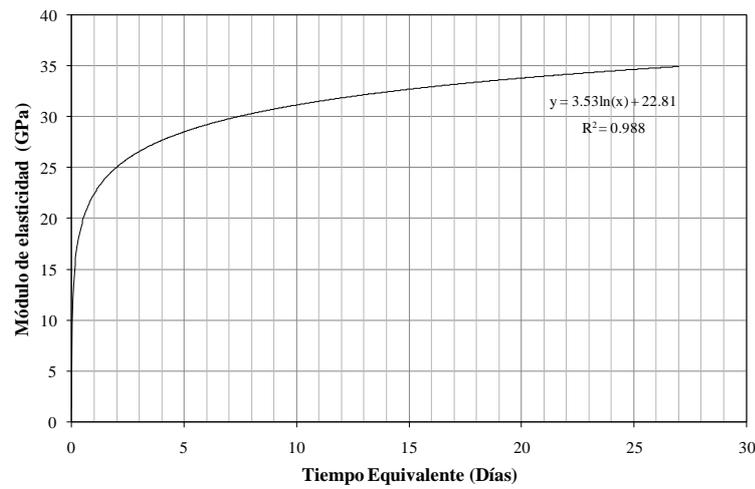


Fig. III.5 Evolución del módulo de elasticidad para el tiempo equivalente temperatura de referencia 20°C

Tabla III.4 Tiempo equivalente para el hormigón de cada uno de los forjados

| Tiempo (Días) | Temperatura promedio (°C) F+01 | Tiempo Equivalente F+01 (Días) | Temperatura promedio (°C) F+02 | Tiempo Equivalente F+02 (Días) | Temperatura promedio (°C) F+03 | Tiempo Equivalente F+03 (Días) |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1             | 29.37                          | 1.52                           | 27.21                          | 1.39                           | 17.40                          | 0.88                           |
| 2             | 26.04                          | 2.84                           | 22.91                          | 2.53                           | 25.53                          | 2.17                           |
| 3             | 16.59                          | 3.69                           | 14.53                          | 3.30                           | 16.23                          | 3.00                           |
| 4             | 14.63                          | 4.46                           | 13.91                          | 4.04                           | 13.39                          | 3.73                           |
| 5             | 14.29                          | 5.22                           | 12.10                          | 4.77                           | 7.92                           | 4.29                           |
| 6             | 16.20                          | 6.06                           | 9.22                           | 5.32                           | 5.15                           | 4.77                           |
| 7             | 18.53                          | 6.99                           | 7.88                           | 5.87                           | 7.04                           | 5.30                           |
| 8             | 20.33                          | 8.00                           | 7.44                           | 6.42                           | 7.46                           | 5.84                           |
| 9             | 13.06                          | 8.72                           | 8.99                           | 7.00                           | -                              | -                              |
| 10            | 14.37                          | 9.48                           | 12.10                          | 7.69                           | -                              | -                              |
| 11            | 12.94                          | 10.20                          | 12.15                          | 8.37                           | -                              | -                              |
| 12            | 9.76                           | 10.80                          | 11.85                          | 9.05                           | -                              | -                              |
| 13            | 10.87                          | 11.45                          | 12.20                          | 9.73                           | -                              | -                              |
| 14            | 9.03                           | 12.03                          | 11.26                          | 10.39                          | -                              | -                              |
| 15            | 8.93                           | 12.62                          | 7.48                           | 10.93                          | -                              | -                              |
| 16            | 9.80                           | 13.23                          | 7.02                           | 11.46                          | -                              | -                              |
| 17            | 11.36                          | 13.89                          | 6.98                           | 11.99                          | -                              | -                              |
| 18            | 12.65                          | 14.59                          | 7.52                           | 12.53                          | -                              | -                              |
| 19            | 11.09                          | 15.24                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 20            | 12.01                          | 15.92                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 21            | 10.97                          | 16.57                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 22            | 7.52                           | 17.11                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 23            | 7.84                           | 17.67                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 24            | 7.14                           | 18.20                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 25            | 8.55                           | 18.77                          | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 26            | -                              | -                              | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 27            | -                              | -                              | -                              | -                              | -                              | -                              |
| 28            | -                              | -                              | -                              | -                              | -                              | -                              |

Así, la ecuación que representa la evolución del módulo de elasticidad del hormigón es:

$$E_t = 3.53 \cdot \ln(j) + 22.81 \quad (\text{III.4})$$

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.

Entonces, para determinar la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados, se hace necesario determinar el tiempo equivalente para una temperatura de referencia de 20°C. En la Tabla III.4, a partir de la ecuación III.3, se muestran los valores del tiempo equivalente para el hormigón de cada uno de los forjados.

Obtenido el tiempo equivalente para el hormigón de cada uno de los forjados, y empleando la ecuación III.4 se estima la evolución del módulo de elasticidad. Las Figuras III.6, III.7 y III.8 muestran la evolución del módulo de elasticidad del hormigón de los forjados 1, 2 y 3, respectivamente.

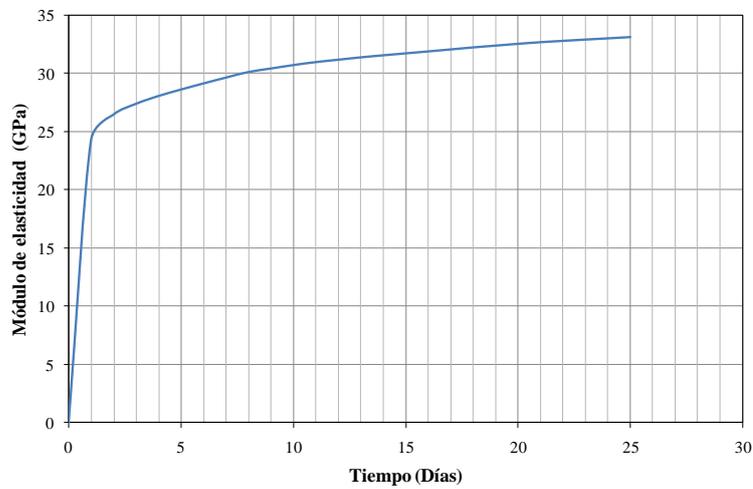


Fig. III.6 Estimación del módulo de elasticidad del forjado 1

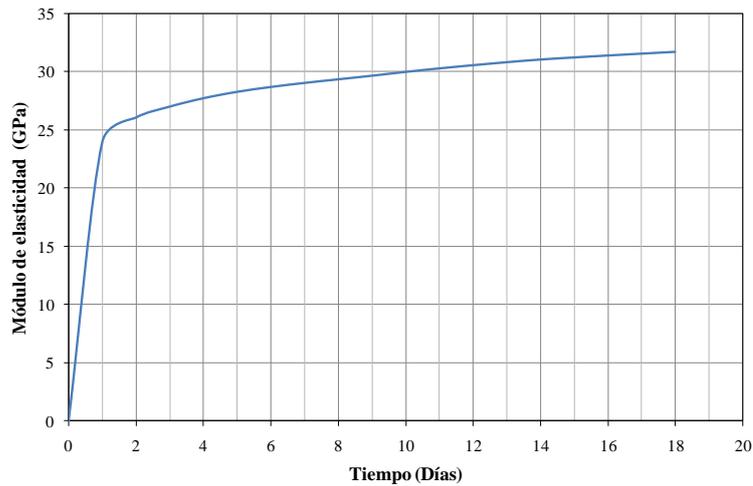


Fig. III.7 Estimación del módulo de elasticidad del forjado 2

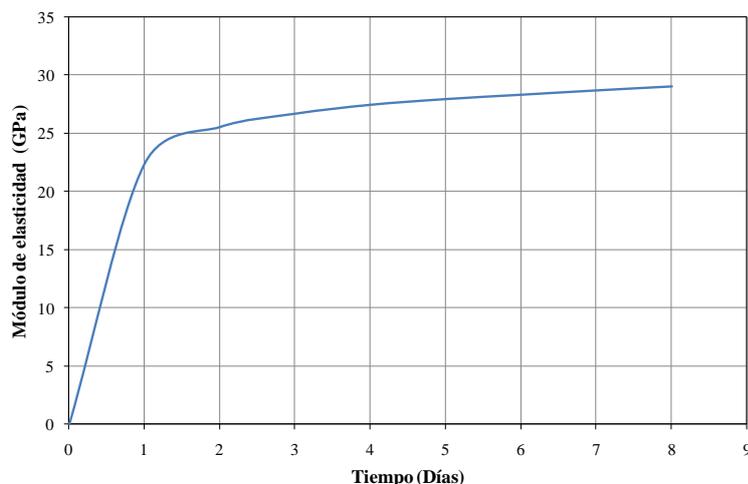


Fig. III.8 Estimación del módulo de elasticidad del forjado 3

### III.3 Evolución del módulo de elasticidad del edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia

Para este caso, se ha utilizado una metodología totalmente distinta puesto que no se tienen datos de partida debido a que, durante la obra, no se registraron temperaturas en el hormigón de cada uno de los forjados ni tampoco se disponen de datos del módulo de elasticidad de ninguna probeta para estimarlo. Por ello se ha decidido utilizar la metodología que viene recogida en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08).

Debido a que no se tienen datos sobre temperatura en los forjados, se ha decidido adoptar como valor universal para todos una temperatura de 20 °C. Por lo que, volviendo a la técnica de la madurometría, el tiempo en días es idéntico al tiempo equivalente.

Según la EHE-08, para estimar el módulo de elasticidad del hormigón a una edad distinta a los 28 días, hay que tener en cuenta que el crecimiento del módulo con la edad no es igual al que experimenta la resistencia a compresión. De forma más precisa, el módulo de elasticidad puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$E_{cm}(t) = \left( \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} * E_{cm} \quad (III.5)$$

donde,  $E_{cm}(t)$  es el módulo de elasticidad a los  $t$  días buscado,  $E_{cm}$  es el módulo de elasticidad a los 28 días,  $f_{cm}$  es la resistencia media a compresión a los 28 días y  $f_{cm}(t)$  es la resistencia media a compresión a los  $t$  días.

Según el artículo 39.6 de la EHE-08, para el cálculo del módulo de elasticidad secante a los 28 días, se adoptará:

$$E_{cm} = 8.500 * \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (III.6)$$

Además añade que, siempre que no se conozca la resistencia media real del hormigón a 28 días,  $f_{cm}$  se puede estimar a partir de la resistencia característica a la misma edad,  $f_{ck}$ , mediante la expresión  $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$ . En este caso quedará,  $f_{cm} = 30 + 8 = 38 \text{ N/mm}^2$ .

Por lo que, el módulo de elasticidad estimado a los 28 días para el hormigón del edificio de la facultad de Bellas Artes es:

$$E_{cm} = 8.500 * \sqrt[3]{38} = 28576,79 \text{ MPa} \tag{III.7}$$

Por último, solo queda determinar el valor de la resistencia a compresión media del hormigón a los t días. Para ello, según la EHE-08, se podrá admitir como valores de la resistencia media a compresión a los t días de edad los dados por la siguiente fórmula:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) * f_{cm} \tag{III.8}$$

donde,  $\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s * \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{1/2}\right]\right\}$  es un coeficiente que depende de la edad del hormigón, y s es un coeficiente que depende del tipo de cemento y que adopta para este caso el valor de 0,25 por ser un cemento normal de endurecimiento rápido.

Con todo ello, se está en disposición para calcular el módulo de elasticidad del hormigón a los t días. En la Tabla III.5 pueden observarse los valores adoptados para los distintos días del hormigón y en la Fig. III.9 se puede observar su evolución.

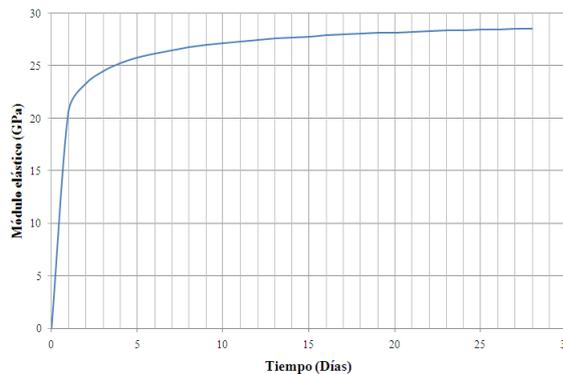


Fig. III.9 Evolución del módulo de elasticidad

Tabla III.5 Módulo de elasticidad adoptado para los distintos días

| t (días) | Ecm(t) (GPa) | t (días) | Ecm(t) (GPa) |
|----------|--------------|----------|--------------|
| 0        | 0,00         | 15       | 27,80        |
| 1        | 20,70        | 16       | 27,89        |
| 2        | 23,26        | 17       | 27,97        |
| 3        | 24,49        | 18       | 28,05        |
| 4        | 25,25        | 19       | 28,12        |
| 5        | 25,79        | 20       | 28,18        |
| 6        | 26,19        | 21       | 28,24        |
| 7        | 26,51        | 22       | 28,30        |
| 8        | 26,77        | 23       | 28,35        |
| 9        | 26,98        | 24       | 28,40        |
| 10       | 27,17        | 25       | 28,45        |
| 11       | 27,33        | 26       | 28,49        |
| 12       | 27,47        | 27       | 28,54        |
| 13       | 27,59        | 28       | 28,57        |
| 14       | 27,70        |          |              |

## APÉNDICE IV. COMPROBACIÓN ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. FISURACIÓN

### IV.1 Introducción

A lo largo del presente Proyecto Final de Carrera se han ido mostrando datos de abertura de fisura. Para el cálculo, se ha utilizado como marco de referencia la normativa española EHE-08. A continuación se exponen los criterios seguidos para el cálculo así como para la limitación de la abertura.

### IV.2 Limitación de la abertura de fisura

Como ya se ha dicho en los apartados 3.2 del Capítulo 3 y 5.2 del Capítulo 5 del presente Proyecto Final de Carrera, la clase general de exposición es No Agresiva designada como “I” y que corresponde a interiores de edificios no sometidos a condensaciones.

Según la EHE-08 en su artículo 5º, apartado 5.1.1.2 “Exigencia de aptitud al servicio”, para la clase de exposición “I”, la máxima abertura de fisura para hormigón armado es de 0,4 mm.

Si se presta atención a todos los registros de resultados que aparece en el Capítulo 4 y en el Capítulo 6, se podrá observar como ninguna abertura de fisura excede de este límite y quedan, además, bastante alejadas. Con lo que, añadiendo que la fisuración es muy reducida zonalmente, se puede afirmar que se produce en una zona muy restringida y es muy reducida.

### IV.3 Cálculo de la abertura de fisura

Según la EHE-08, la comprobación general del Estado Límite de Fisuración por tracción consiste en satisfacer la siguiente inequación:

$$w_k \leq w_{m\acute{a}x} \quad (IV.1)$$

donde  $w_k$  es la abertura característica de fisura y  $w_{m\acute{a}x}$  es la abertura máxima de fisura definida en el anterior apartado.

Además añade, como es evidente, que la comprobación a fisuración solo se realizará si se produce fisuración, es decir, si la tensión en la fibra más traccionada del hormigón supera la resistencia media a flexotracción  $f_{ctm,\eta}$ :

$$f_{ctm,\eta} = \max\{(1,6 - h/1000) * f_{ct,m}; f_{ct,m}\} \quad (IV.2)$$

donde  $h$  es el canto en mm. y  $f_{ct,m}$  es la resistencia media a tracción que se calcula mediante la expresión:

$$f_{ct,m} = 0,30 * f_{ck}^{2/3} \quad (IV.3)$$

que depende de la resistencia característica a compresión del hormigón que será distinta dependiendo de los días de vida del hormigón como se ha especificado en el Apéndice III.

A lo largo del proyecto se ha expresado de forma similar, diciendo que se produce fisuración si el momento que aparece es superior al momento a partir del cual se produce la fisuración ( $M_{cr}$ ).

### IV.3.1 Método general de cálculo de la abertura de fisura

Para el cálculo de la abertura característica de fisura, se utiliza la siguiente expresión:

$$w_k = \beta * s_m * \varepsilon_{sm} \quad (IV.4)$$

donde:

$\beta$  es un coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico y vale 1,7 para los casos aquí presentes.

$s_m$  es la separación media de fisuras, expresadas en mm:

$$s_m = 2 * c + 0,2 * s + 0,4 * k_1 * \frac{\emptyset * A_{c,eficaz}}{A_s} \quad (IV.5)$$

$\varepsilon_{sm}$  es el alargamiento medio de las armaduras, teniendo en cuenta la colaboración del hormigón entre fisuras:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} * \left[ 1 - k_2 * \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \geq 0,4 * \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (IV.6)$$

$c$  es el recubrimiento geométrico de las armaduras traccionadas. (Ver Apéndice I. Planos)

$s$  es la distancia entre barras longitudinales. (Ver Apéndice I. Planos)

$k_1$  es un coeficiente que representa la influencia del diagrama de tracciones en la sección. Para los casos presentes se ha tomado el valor de 0,125 de flexión simple al despreciar la presencia de axiles muy pequeños.

$\emptyset$  es el diámetro de la barra traccionada más gruesa. (Ver Apéndice I. Planos)

$A_{c,eficaz}$  es el área de hormigón de la zona de recubrimiento en donde las barras a tracción influyen de forma efectiva en la abertura de las fisuras.

$A_s$  es la sección total de las armaduras situadas en el área  $A_{c,eficaz}$ . (Ver Apéndice I. Planos)

$\sigma_s$  es la tensión de servicio de la armadura pasiva en la hipótesis de sección fisurada.

$E_s$  es el módulo de deformación longitudinal del acero.

$k_2$  es un coeficiente que vale 0,5 para los presentes casos.

$\sigma_{sr}$  es la tensión de la armadura en la sección fisurada en el instante en que se fisura el hormigón, lo cual se supone que ocurre cuando la tensión de tracción en la fibra más traccionada de hormigón alcanza el valor de  $f_{ctm,fl}$ .

Debido a la gran cantidad de valores que se debían calcular, se ha programado en distintas hojas de cálculo para acelerar el proceso, dependiendo del edificio y de la zona de cálculo de la

fisuración. A modo de ejemplo, la Fig. IV.1 muestra una de las hojas de cálculo para el cálculo de la abertura de fisura y en donde se realiza la comprobación de fisuración.

| DATOS                             |            | FÓRMULAS  | VALORES    |            |
|-----------------------------------|------------|---|------------|------------|
| W <sub>máx</sub>                  | 0,4        | "Wk=β*Sm*esm"   | 0,02412121 | (mm) OK    |
| Ambiente I                        | 0,4        |   |            |            |
| Ambiente IIb                      | 0,3        | β   | 1,7        |            |
| h (m)                             | 0,35       | $S_m = 2 \cdot c + 0.2 \cdot s + 0.4 \cdot K_1 \cdot (\Phi \cdot A_{c,eficaz}) / A_s$ | 107,195304 | (mm)       |
| fct,m,fl (Mpa)                    | 2,85       | c (mm)  | 30         |            |
| Ib (m4)                           | 0,00357292 | s (mm)  | 100        |            |
| Es (Mpa)                          | 210000     | K1  | 0,125      |            |
| Z (m)                             | -0,175     | Φ (mm)  | 25         |            |
| Ma (KN*m/m)                       | 58,19      | A <sub>c,eficaz</sub> (mm <sup>2</sup> )  | 87500      |            |
| Na (KN/m)                         | 1,14       | A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> )   | 4021,83402 |            |
| Ec (Mpa)                          | 31012,84   | $esm = (\sigma_s / Es) \cdot (1 - K_2 \cdot ((Mcr / Ma)^2))$                          | 0,00013237 |            |
| n=Es/Ec                           | 6,77138888 | Mcr   | 58,1144584 | KN*m/m     |
| A's (mm <sup>2</sup> )            | 1005,31    | σ <sub>s</sub>  | -55,449591 | Mpa        |
| d' (mm)                           | 46         | x (+) (mm)  | 99,575719  | 1 mm       |
| A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> ) | 4025,17    | x (-) (mm)  | -167,64593 | 1 ERROR mm |
| d                                 | 295        | ifg   | 1388693141 | mm4        |
| b (mm)                            | 1000       | K2  | 0,5        |            |
| t (días)                          | 12         | $esm = (\sigma_s / Es) \cdot 0.4$   | 0,00010562 |            |
| Ec                                | 31012,84   | esm   | 0,00013237 |            |
| fct,m,fl (Mpa)                    | 2,846      |   |            |            |
| Sep. entre barras (m)             | 0,1        |   |            |            |

Fig. IV.1 Hoja de cálculo para el cálculo de la abertura de fisura

## APÉNDICE V. JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

### V.1 Introducción

Como a lo largo del Proyecto Final de Carrera se ha ido mencionando, uno de los tres grandes objetivos perseguidos en la instalación de elementos de control de carga en puntales es el realizar procesos constructivos más económicos. Por ello y como se ha expuesto, debido a la instalación de los elementos de control de carga en puntales, se consigue disminuir la carga máxima que recibe el sistema de apuntalamiento con lo que el diseño de dicho sistema, al tener inferior capacidad resistente, es más económico.

En el presente Apéndice se tratará de cuantificar de qué magnitud se estaría hablando de forma general y particularizada para el edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia.

### V.2 Datos de partida

En primer lugar, cabe decir que, elegida la altura de funcionamiento de un puntal, la gama de puntales existente en el mercado en cuanto a capacidad resistente es muy reducida. Por ello y para tener una magnitud representativa del valor económico que tiene un puntal dependiendo de su capacidad resistente, se utilizará un valor expresado en euros por KiloNewton resistente (€/KN).

Para ello, necesitamos saber qué precio tiene un puntal para el período del proceso constructivo. Consultando distintos catálogos de diversas empresas, se ha convenido establecer el precio del alquiler de un puntal en 7 céntimos de euro al día. Además, también es conocido que el proceso constructivo del edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia es de 60 días contando con el descimbrado del séptimo forjado.

En segundo lugar, el proceso constructivo para el edificio en cuestión se ha planteado para utilizar la mínima cantidad de material de forma que con un juego y medio de puntales sea suficiente para la construcción de todo el edificio. Si se utilizaran más puntales, el ahorro económico aún sería más pronunciado. Para el edificio de la facultad de Bellas Artes, el número de puntales de un juego que se necesitan para una planta recién hormigonada es de 1176 puntales. El área en planta de un forjado del edificio en cuestión es de 822'4 m<sup>2</sup>. Por lo que para una planta recién hormigonada tenemos 1'43 puntales/m<sup>2</sup> y para una planta clareada 0,71 puntales/m<sup>2</sup>.

Por último, para obtener el ratio €/KN, se ha decidido adoptar la resistencia media de aquellos puntales que tienen una altura de funcionamiento de entre 2 y 4 m. Consultando los distintos catálogos se ha decidido utilizar una resistencia media de 27 KN (2.700 Kg). Por lo que el precio de cada puntal por KN de resistencia y por día en la obra es:

$$0,07 \left( \frac{\text{€}}{\text{día*puntal}} \right) / 27 \text{ (KN)} = 0,002593 \left( \frac{\text{€}}{\text{KN*día*puntal}} \right) \quad (\text{V.1})$$

### V.3 Justificación económica

En primer lugar, de forma particular para el edificio de la facultad de Bellas Artes de la Universidad Politécnica de Valencia, el proceso constructivo es de 60 días por lo que el precio de un puntal para todo el proceso constructivo es:

$$0,002593 \left( \frac{\text{€}}{\text{KN*día*puntal}} \right) * 60 \text{ (días)} = 0,155556 \left( \frac{\text{€}}{\text{KN*puntal}} \right) \quad (\text{V.2})$$

Debido a que en obra se necesita un juego y medio de puntales, siendo de 1176 puntales el número de puntales de un juego, se tiene el coste por KN de resistencia de la totalidad de los puntales:

$$0,155556 \left( \frac{\text{€}}{\text{KN*puntal}} \right) * 1,5 * 1176 \text{ (puntales)} = 274,4 \left( \frac{\text{€}}{\text{KN}} \right) \quad (\text{V.3})$$

Ahora, multiplicando este precio por la máxima carga en KN que aparece en los distintos modelos (25'7 KN, 15 KN y 12 KN respectivamente), tendremos el coste en € de los puntales necesarios para la construcción del edificio de la facultad de Bellas Artes. Los resultados se pueden observar en la Tabla V.1, además del ahorro en € y en porcentaje que supone el empleo de elementos de control de carga en puntales para distintos niveles de plastificación.

Tabla V.1 Coste y ahorro comparativo de la totalidad de puntales de los diferentes modelos planteados

|             | Coste      | Ahorro (%) | Ahorro (€) |
|-------------|------------|------------|------------|
| Modelo 1 E  | 7.052,08 € |            |            |
| Modelo 2 EP | 4.116,00 € | 41,63%     | 2.936,08 € |
| Modelo 3 EP | 3.292,80 € | 53,31%     | 3.759,28 € |

Se puede observar como el precio de los puntales para esta obra se reduce de forma considerable. Llegados a este punto, hay que considerar el precio del elemento de control de carga que se deberá instalar en la parte superior de los puntales. Puesto que es un elemento que todavía no existe, se planteará el máximo precio que pueda tener para que las condiciones económicas sean iguales que la alternativa de no disponer elementos de control de carga. Debido a que para el Modelo 2 EP (nivel de plastificación de 15 KN) solo se necesitan elementos de control de carga en puntales en el primer forjado cuando este está clareado, el número de elementos de control de carga será el correspondiente a medio juego (588 puntales). De esta forma, dividiendo el ahorro del citado modelo (2.936'08 €) entre el número de elementos de control de carga en puntales necesario, se obtiene el precio máximo que deberá tener cada elemento de control de carga.

$$\frac{2936,08 \text{ (€)}}{588 \text{ (elementos)}} = 4,99 \left( \frac{\text{€}}{\text{elemento}} \right) \quad (\text{V.4})$$

Este precio, para este caso, resulta ser de 4'99 €, precio que resulta ser muy holgado para un pequeño elemento de cualquier material.

Para el Modelo 3 EP (nivel de plastificación de 12 KN) el precio máximo que pueda tener un elemento de control de carga es más restrictivo porque se ha planteado un modelo con necesidad de instalación de muchos elementos de control de carga. Para ser exactos, son necesarios elementos de control de carga en todas las plantas clareadas salvo en la séptima donde ya no existe una inmediatamente superior. Realizando el mismo cálculo tenemos:

$$\frac{3759,28 (\text{€})}{588*6 (\text{elementos})} = 1,07 \left( \text{€/elemento} \right) \quad (\text{V.5})$$

Precio que está dentro de los márgenes razonables del coste de un elemento de control de carga en puntales. Por lo general, se puede concluir, que existirá mejor rendimiento económico cuánto más exigente sea el nivel de plastificación siempre y cuando solo aparezca comportamiento plástico de los puntales en el primer forjado clareado. Por ello, la alternativa más económica en este caso es la perteneciente al Modelo 2 EP (nivel de plastificación de 15 KN).

En segundo lugar, para tratar el tema de forma general para cualquier fase de construcción de edificios con el proceso constructivo utilizado, se puede obtener el coste de los puntales por metro cuadrado de edificio en planta de los diferentes modelos planteados. Para ello se divide el coste de un juego y medio de puntales por el área en planta de un forjado. Los resultados y el ahorro entre los distintos modelos aparecen en la Tabla V.2.

Tabla V.2 Coste y ahorro comparativo de los puntales por metro cuadrado de edificio de los diferentes modelos planteados

|             | Coste (€/m2) | Ahorro (€/m2) |
|-------------|--------------|---------------|
| Modelo 1 E  | 8,58         |               |
| Modelo 2 EP | 5,00         | 3,57          |
| Modelo 3 EP | 4,00         | 4,57          |

Y ahora, por ejemplo, estimando el coste del elemento de control de carga en puntales en 0'50 €, se tiene:

$$0,50 \left( \text{€/elemento} \right) * \frac{0,71 (\text{elementos})}{1 (\text{m}^2)} = 0,355 \left( \text{€/m}^2 \right) \quad (\text{V.6})$$

que es un coste que se debe añadir al coste anterior, con lo que para los modelos que solo tengan comportamiento plástico en la primera planta clareada se suma el coste directamente y los que lo tengan en todas las plantas clareadas se suma este coste multiplicado por el número de plantas totales del edificio menos una. Para el caso concreto tratado, se multiplicaría por 6. La Tabla V.3 refleja los costes totales de los puntales más los elementos de control de carga y el ahorro comparativo por metro cuadrado de edificio de los diferentes modelos planteados.

Tabla V.3 Coste total y ahorro comparativo por metro cuadrado de edificio de los diferentes modelos planteados

|             | Coste puntales (€/m2) | Coste elementos (€/m2) | Coste total (€/m2) | Ahorro (€/m2) | Ahorro (%) |
|-------------|-----------------------|------------------------|--------------------|---------------|------------|
| Modelo 1 E  | 8,58                  | 0,00                   | 8,58               |               |            |
| Modelo 2 EP | 5,00                  | 0,355                  | 5,36               | 3,22          | 37,49%     |
| Modelo 3 EP | 4,00                  | 0,355*6                | 6,13               | 2,44          | 28,47%     |

Como se puede observar, se llega a la misma conclusión, y es que existirá mejor rendimiento económico cuánto más exigente sea el nivel de plastificación siempre y cuando solo aparezca comportamiento plástico de los puntales en el primer forjado clareado.

Por último, hasta el momento, solo se ha considerado la instalación de elementos de control de carga en aquellos puntales existentes en una planta en el momento en el que alguno de ellos vaya a tener comportamiento plástico. Por ejemplo, para el caso particular tratado, solo se han dispuesto en los puntales de las sopandas principales que son los que permanecerán una vez clareado el forjado. Para mayor seguridad, se deberían instalar en todos los puntales de una planta para evitar cualquier tipo de confusión y/o catástrofe y, en caso de no entrar en funcionamiento, tener algún dispositivo que sirva para saberlo y poder aprovecharlo en etapas posteriores. Por ello, el coste de estos elementos de control de carga no son imputables al coste de la obra puesto que, aunque se dispongan, se pueden reutilizar.

También cabe decir que el coste total anteriormente especificado disminuiría porque todos los elementos de control de carga de una planta clareada no se comportan de forma plástica (Ver isolíneas de carga en el apartado 5.6.3 del Capítulo 5) y, por tanto, se pueden reutilizar y el rendimiento económico aún será mayor que el especificado anteriormente.