

2 Influencia del proceso constructivo en el cálculo de la estructura

2.1 Introducción

En este capítulo se pretende sintetizar las principales investigaciones realizadas sobre algunos de los conceptos que serán de interés en este trabajo.

Se podrá especial interés en el comportamiento del hormigón a cortas edades, la respuesta del hormigón frente a acciones reológicas, la transmisión de cargas durante la construcción y métodos para la determinación de la edad del descimbrado de estructuras de hormigón.

2.2.1 Comportamiento del hormigón a corto y a largo plazo

La determinación de las características del hormigón a cortas edades es de especial importancia para el estudio de las estructuras en situación de proceso de construcción.

La determinación de sus propiedades es difícil de generalizar en una expresión común.

Fernández Gómez, en su Tesis Doctoral [1], determinó experimentalmente las curvas de evolución mecánica de hormigones realizados con diferentes tipos de cementos y mostro las diferencias existentes entre estos, por ello, sería ideal que el fabricante aportara sus propias curvas de evolución.

La alternativa más utilizada es adoptar la formulación que contempla el CEB-90 para la evolución de la resistencia del hormigón. Posteriormente, esta expresión se comparó con datos experimentales obteniéndose diferencias menores de 12% para edades comprendidas entre 7 y 28 días. Para edades inferiores a 3 días las diferencias eran del orden del 20%.

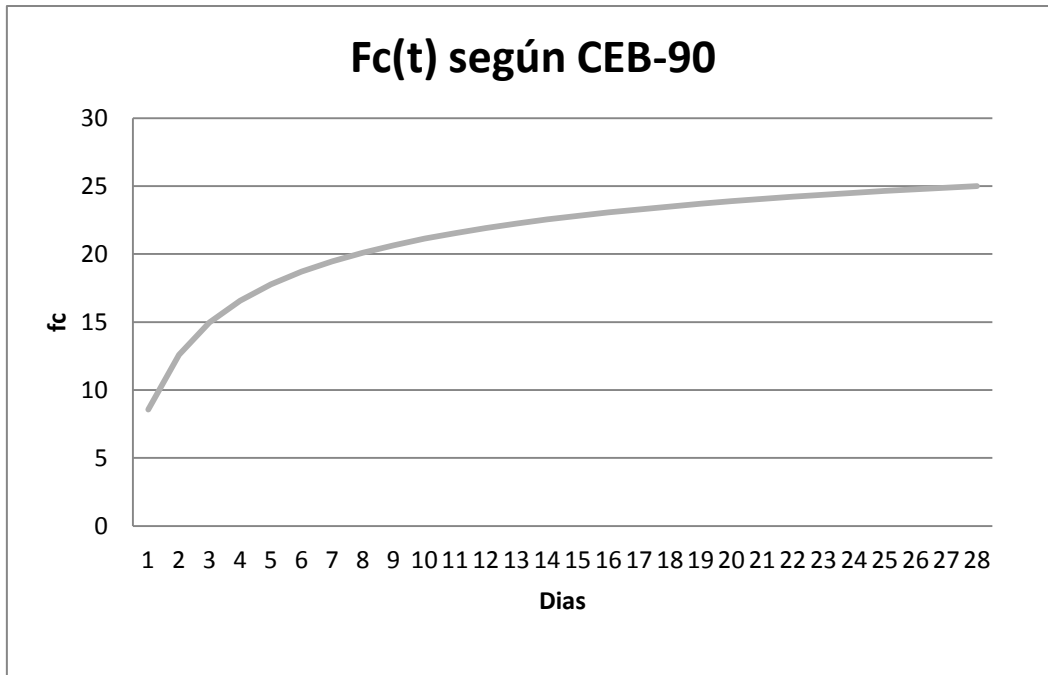
La resistencia a compresión del hormigón depende, a parte de las características del material, de otros factores como son la rapidez de aplicación de las cargas, el confinamiento, etc.

Según el CEB-90 se tiene la siguiente expresión (También adoptaba por la EHE 2008) para determinar la resistencia a compresión en función de la edad del hormigón:

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{c,28}$$

Dónde:

$$\beta_{cc}(t) = e^{0,25 \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right]}$$



$$E_c(t) = \beta_E(t) \cdot E_C$$

Dónde:

$$\beta_E(t) = \sqrt{\beta_{cc}(t)}$$

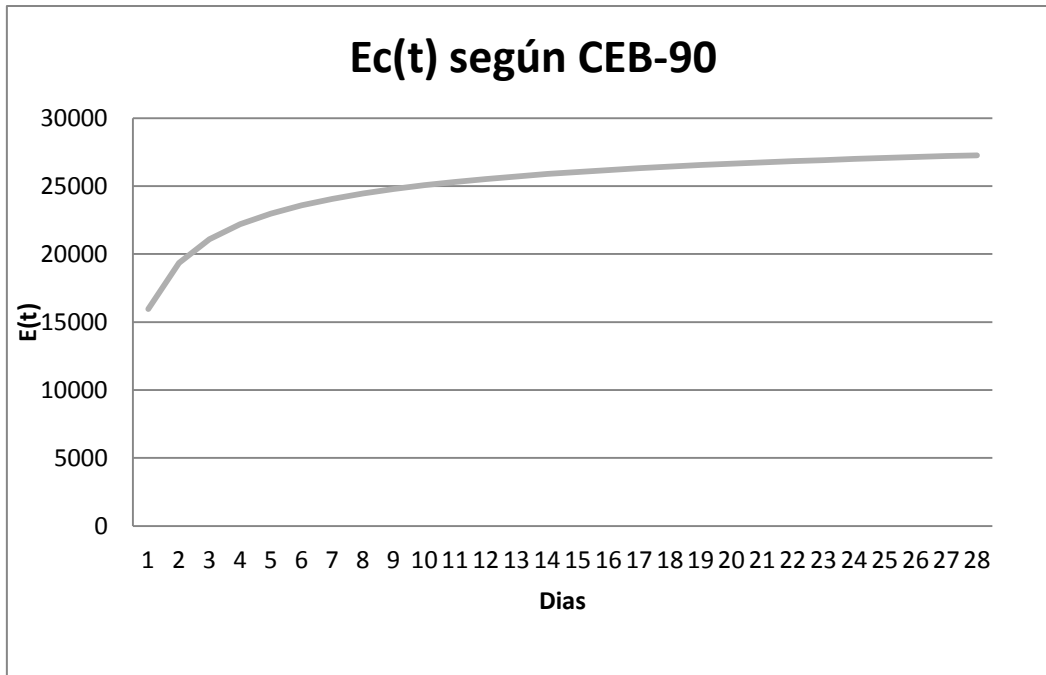
Para $T=20^{\circ}C$

Si se tienen temperaturas distintas a $20^{\circ}C$ el CEB-90 indica la utilización de una edad ficticia t' :

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i e^{\left[-\left(\frac{4000}{273+T_i}-13,65\right)\right]}$$

Dónde:

Δt_i es el número de días en que la temperatura ambiente media diaria (T_i) puede ser considerada constante.



2.2.2 Cálculo por etapas en estructuras de hormigón armado

Introducción

El cálculo convencional de estructuras consiste en insertar en el programa de cálculo la geometría final, aplicar las cargas y calcular. Esto es válido para la aplicación de cargas horizontales o cargas gravitatorias que se presentan en la estructura finalizada pero para las cargas como las del peso propio, en rigor, debería tenerse en cuenta que la estructura se ejecuta por etapas por lo que no tiene sentido considerar en el cálculo una planta que aún no está construida, por ello, es necesario la aplicación del cálculo secuencial.

El cálculo convencional lleva a que en las plantas superiores se acumulen desplazamientos verticales inexistentes y consecuentemente los esfuerzos diferirán del cálculo secuencial o por etapas.

Así pues, un esquema general de cálculo secuencial puede verse en la *figura 1.1a*.

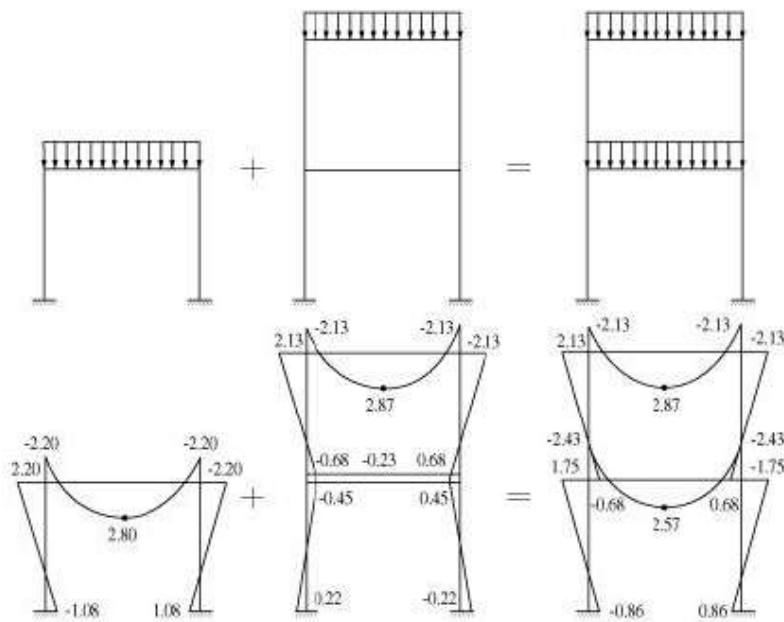


Figura 1.1a Análisis secuencial o por etapas

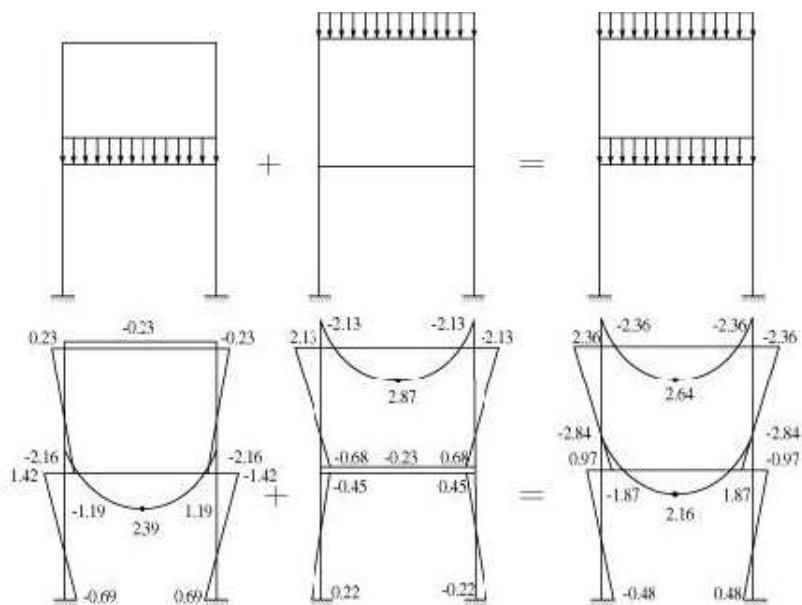


Figura 1.1b Análisis convencional

En este apartado se muestra el análisis de los momentos de cálculo mediante la aplicación de ambos en la estructura de hormigón armado estudio de este trabajo.

Para el edificio en cuestión se ha realizado un cálculo convencional y otro de forma secuencial aplicando simplemente la carga del peso propio.

Este cálculo se ha realizado mediante el programa de cálculo de estructuras SAP2000, el cual dispone de un módulo de cálculo no lineal que permite considerar la construcción por etapas (staged construction).

A continuación se presentan los valores numéricos obtenidos en relación a los dos tipos de cálculos.

Estudio de los desplazamientos verticales en diferentes elementos

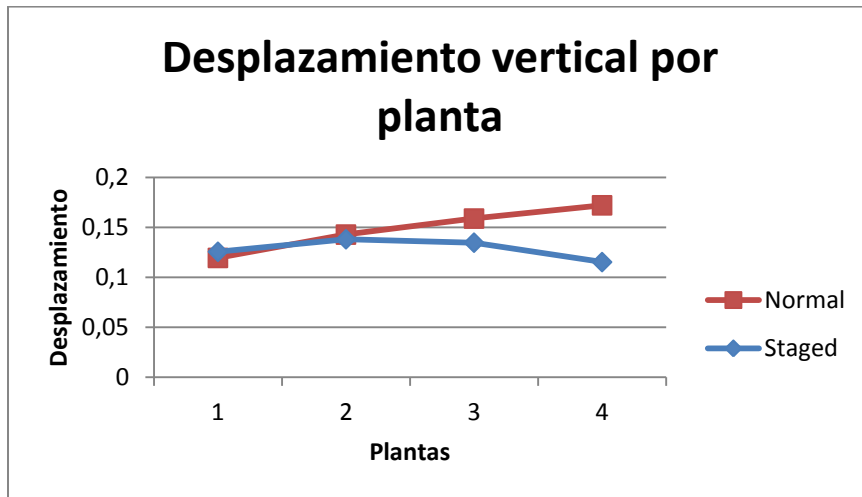


Figura 1.2 Desplazamiento vertical en el punto medio la losa

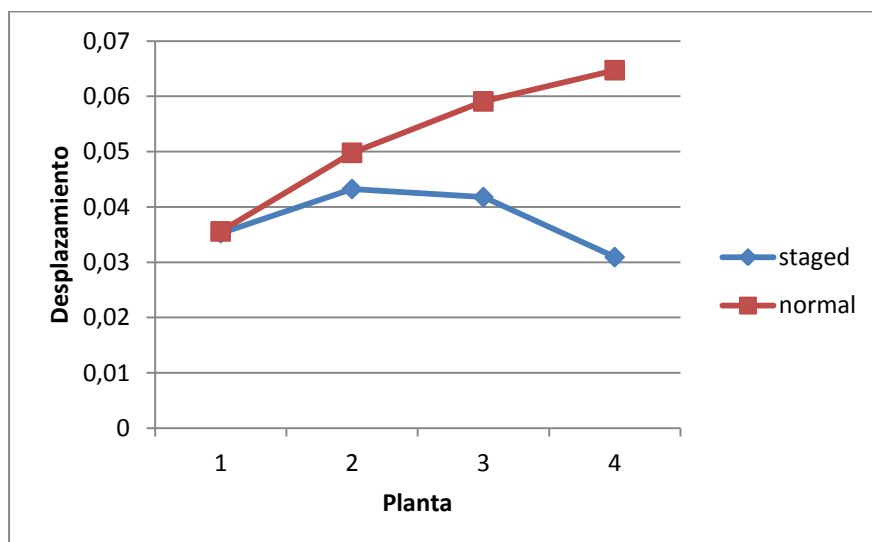


Figura 1.3 Desplazamiento vertical en el punto medio de la viga

Estudio de los momentos flectores en diferentes elementos

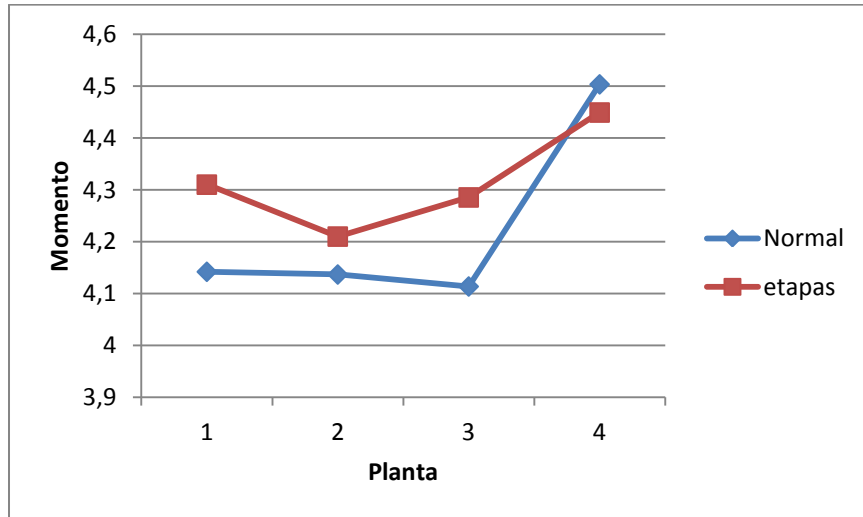


Figura 1.4 Momento en el punto medio de la viga

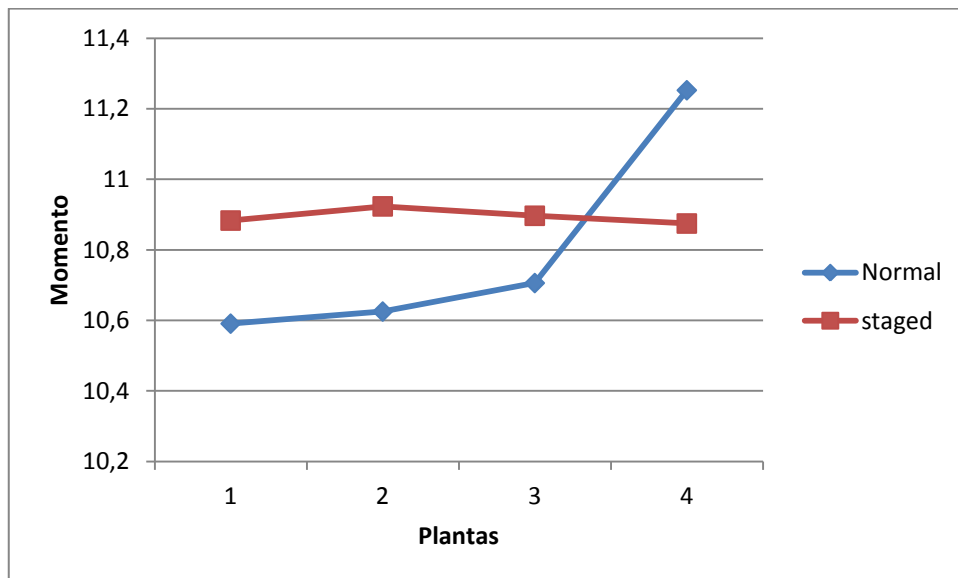


Figura 1.5 Momento en el punto medio de la losa

Conclusiones

Como ya se expuso en el apartado introductorio de este punto, en los gráficos se puede observar como los desplazamientos en la última planta presentan diferencias importantes entre los dos procedimientos de cálculo. Se comprueba que en el caso de cálculo convencional,

los desplazamientos en las últimas plantas son mucho mayores respecto a los realmente existentes, que son mostrados en el cálculo secuencial.

En cuanto a los momentos flectores, en las primeras plantas, estos son mayores al considerar un análisis secuencial mientras que, como era de esperar, en la última planta son menores respecto al análisis convencional.

2.2.4 Transmisión de cargas durante la construcción

Es de gran importancia, como ya se ha comentado en el apartado anterior, el conocimiento de las cargas actuantes durante la construcción.

Su determinación mediante modelos teóricos dependerá evidentemente de lo realista que sea dicho modelo.

A continuación se describen brevemente algunos de los modelos teóricos propuestos.

Método simplificado (Grundy&Kabaila (1963))

Es el primer modelo publicado y es muy utilizado en la actualidad debido a su sencillez.

El Método Simplificado asume una serie de hipótesis que hacen que el modelo sea fácilmente aplicable a cualquier tipo de obra.

Las principales suposiciones del modelo son las siguientes:

1. Comparados con la rigidez a flexión de las losas, se considera que los puntales son infinitamente rígidos.
2. Todas las losas de hormigón poseen la misma rigidez. Aunque sus edades sean muy distintas, las solicitaciones obtenidas con rigidez variable de losas no difieren excesivamente respecto a las obtenidas mediante la suposición de rigidez constante.
3. Los puntales se encuentran suficientemente cerca como para que sus cargas sean asimiladas a cargas uniformemente distribuidas sobre los forjados.
4. Los efectos de retracción y fluencia del hormigón son despreciables.
5. Los puntales ubicados bajo la planta inferior del edificio se apoyan sobre un suelo infinitamente rígido.

Respecto a la primera hipótesis, los autores del modelo señalaron que esta suposición está justificada cuando se emplean puntales de acero. Cuando se emplean puntales menos rígidos, como pueden ser los de madera, esta afirmación no será tan exacta, pero los resultados obtenidos se encontrarían por el lado de la seguridad.

En un ciclo constructivo típico de un edificio de hormigón de varias plantas, existen dos tipos de operaciones que afectan a las solicitaciones a las que se ven sometidos los forjados de

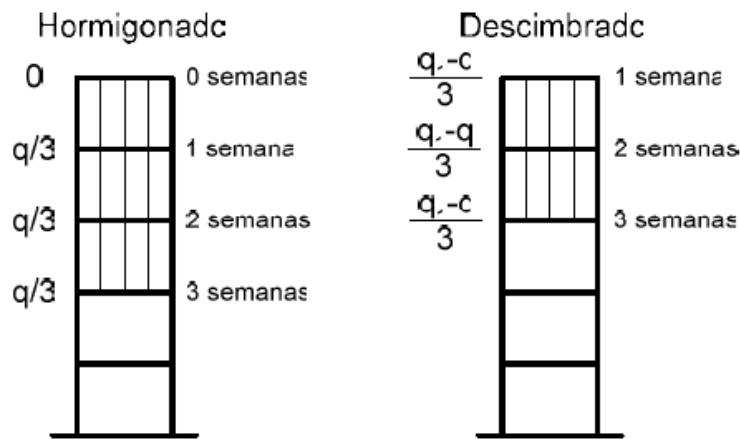
hormigón. Atendiendo a las hipótesis asumidas por el modelo, las ecuaciones que rigen el cálculo de cargas correspondiente a cada operación serán las siguientes:

a) Hormigonado de una nueva planta. Si hay n plantas cimbradas, el peso propio q de la planta recién hormigonada se distribuye equitativamente entre los n forjados inferiores apuntalados, correspondiendo a cada uno:

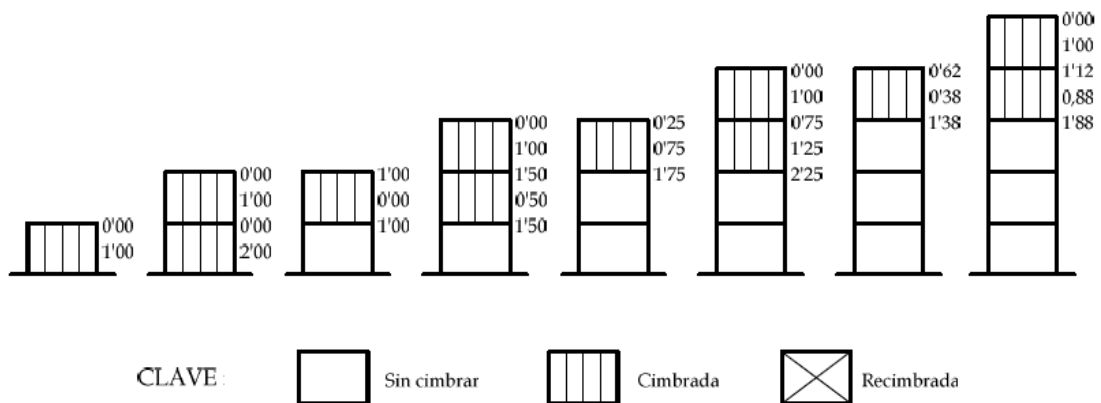
$$\frac{q}{n} \text{ kg/m}^2$$

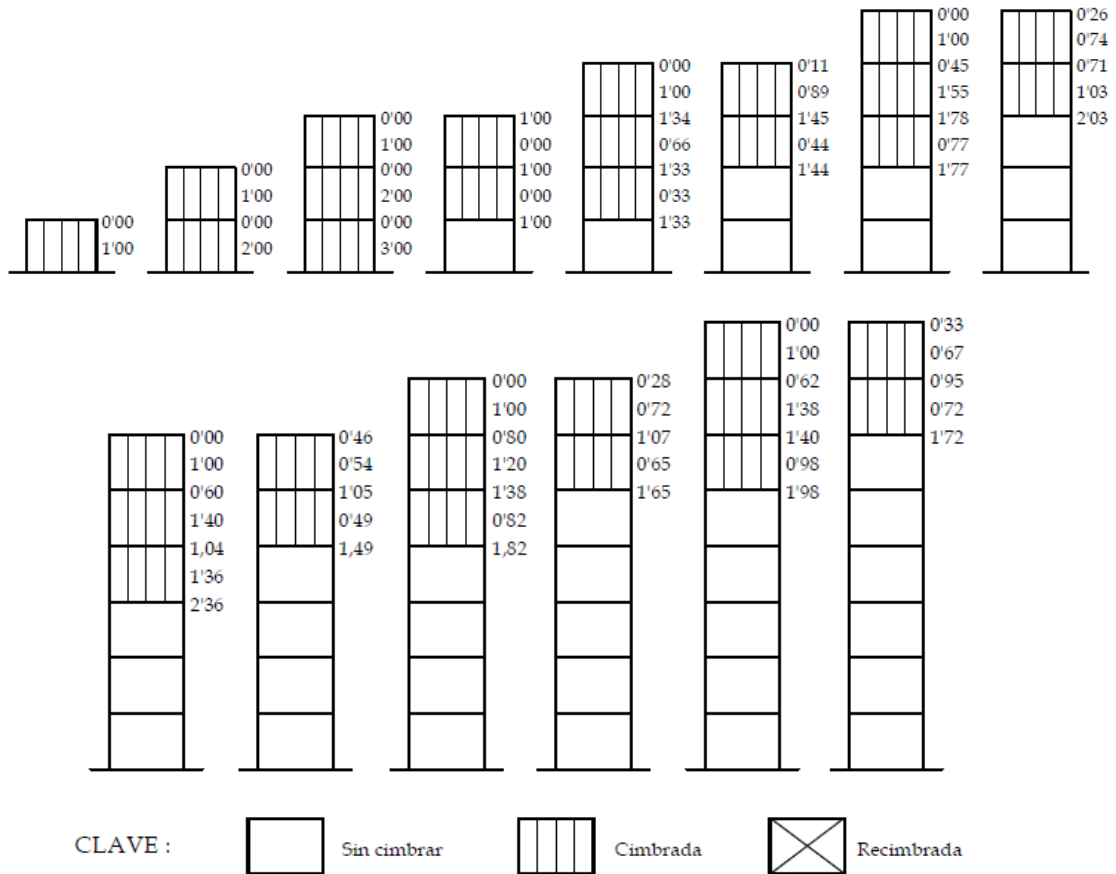
b) Descimbrado de la planta inferior. Si hay n plantas cimbradas, al descimbrar la inferior, la diferencia entre la carga total q_1 que resistía y su peso propio q se distribuye entre los n forjados superiores, correspondiendo a cada uno:

$$\frac{q_1 - q}{n} \text{ kg/m}^2$$

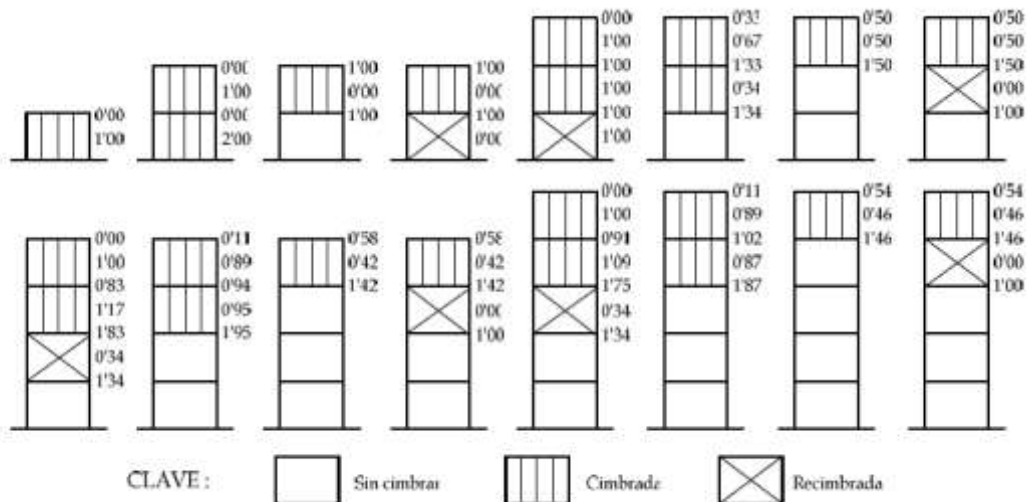


Por lo tanto, la aplicación del Método Simplificado conduce a distribuciones de cargas que son independientes de algunos parámetros importantes de la obra, como por ejemplo la distancia entre pilares, la altura libre entre plantas, el ritmo constructivo, las dimensiones de los forjados o la resistencia característica del hormigón empleado. En consecuencia, el método presenta una distribución de cargas en la estructura que es función exclusivamente del esquema constructivo empleado, es decir, del número de plantas apuntaladas y reapuntaladas.





En las siguientes figuras se muestran las cargas en losas y puntales calculadas mediante el Método Simplificado para distintos esquemas constructivos típicos: dos plantas apuntaladas, tres plantas apuntaladas o dos plantas apuntaladas y una reapuntalada. Estas cargas se expresan con un coeficiente, resultado de dividir la carga que soporta el elemento por la que soportaría si estuviese sometido únicamente a la acción del peso propio de un forjado.



Se observa que la máxima sollicitación se obtiene en el caso de tres plantas apuntaladas siendo el valor de 2,36. Para dos plantas apuntaladas se obtiene un valor máximo de 2,25. Se aprecia que el valor máximo aparece siempre en la planta n , siendo n el número de plantas apuntaladas.

Por otro lado, si se utiliza la técnica del recimbrado se obtiene una carga máxima de 1,95.

Modelo de Liu et al. (1985, 1986)

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

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

EFM (Stivaros y Halvorsen (1990))

El EFM propone un modelo en dos dimensiones de la estructura considerando las siguientes hipótesis:

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

Método simplificado de Fang et al. (2001)

Fang et al. (2001) propusieron un nuevo método para el cálculo de la transmisión de cargas en la construcción de edificios en altura. La principal consideración de este nuevo método, es considera 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:

1. Modelo bidimensional, considerando la unión entre puntales y forjado como una articulación.
2. Se considera la variación del módulo de elasticidad con el tiempo de los elementos de hormigón.
3. La cimentación se considera como infinitamente rígida.
4. El modelo es incremental. Esto significa que considera la acumulación de cargas y desplazamientos.
5. 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.

2.2.5 Determinación del plazo de descimbrado

Llegado a un determinado momento es necesario descimbrar las estructuras y por razones económicas es necesario que este plazo sea lo más corto posible. Su determinación depende de las características del hormigón en ese instante y de las cargas a las que se ve sometida la estructura.

Se analizan a continuación varias propuestas para la determinación de dicho plazo.

Método de la instrucción EHE 2008

Así pues, la expresión propuesta por la EHE para determinar el plazo de descimbrado es la siguiente:

$$j = \frac{400}{\left(\frac{Q}{G} + 0,5\right) \cdot (T + 10)} = \frac{400}{\left(\frac{16,18 - 8,75 \cdot k}{8,75 \cdot k} + 0,5\right) \cdot (20 + 10)}$$

Dónde:

Q es la diferencia entre la carga que actúa en situación de proyecto y la carga que actúa en una determinada fase constructiva

G es la carga que actúa en una determinada fase de construcción

T es la temperatura media durante la construcción

J el número de días necesarios para descimbrar una planta determinada

Cuando no se dispone de datos suficientes se pueden aplicar los plazos mostrados en la siguiente tabla.

Temperatura superficial del hormigón (° C)	≥ 24°	16°	8°	2°
Encofrado vertical	9 horas	12 horas	18 horas	30 horas
Losas				
Fondos de encofrado	2 días	3 días	5 días	8 días
Puntales	7 días	9 días	13 días	20 días
Vigas				
Fondos de encofrado	7 días	9 días	13 días	20 días
Puntales	10 días	13 días	18 días	28 días

JIMÉNEZ MONTOYA, GARCÍA MESEGUER y MORÁN CABRÉ dan la siguiente tabla para el plazo de desencofrado de fondos y apeos.

Media aritmética de las máximas y mínimas temperaturas diarias	Q/G		
	0	0,5	1,0
5°C	8 semanas	4 semanas	2,5 semanas
10°C	6 semanas	3 semanas	2 semanas
15°C	5 semanas	2,5 semanas	12 días
20°C	4 semanas	2 semanas	10 días

Método de Calavera & Fernández Gómez

RELACIONES DE RESISTENCIA				RELACIÓN DE MÓDULOS DE DEFORMACIONES
COMPRESIÓN	TRACCIÓN ADHERENCIA RASANTE	FLEXIÓN		
		CUANTÍA BAJA	CUANTÍA ALTA	
$\frac{f_{cj}}{f_{c28}}$	$\sqrt[3]{\left(\frac{f_{ct,j}}{f_{ct,28}}\right)^2}$	-	-	$\sqrt[3]{\left(\frac{f_{cj}}{f_{ck,28}}\right)}$
0,25	0,40	0,81	-	0,63
0,50	0,63	0,94	0,85	0,79
0,75	0,83	0,99	0,88	0,91
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Del análisis de la tabla se deduce que las resistencias que evolucionan más despacio son las de tracción, adherencia y rasante.

Así pues, se podrá realizar el descimbrado cuando:

$$f'_{ck,0} \geq \frac{\gamma'_f}{\gamma_f} \alpha f'_{ck,28}$$

Siendo α la relación entre la carga actuante en el momento del descimbrado y la carga considerada en proyecto.

Para determinar la resistencia del hormigón en el momento del descimbrado, propone dos tipos de métodos:

a) Métodos directos

Se basan bien en el control de la resistencia a tracción del hormigón, mediante el ensayo de probetas moldeadas curadas en las mismas condiciones que el hormigón puesto en obra, o bien en el control de la madurez del hormigón.

b) Métodos experimentales

Se basan en el conocimiento de las curvas de evolución de la resistencia a tracción del hormigón, en diferentes situaciones de curado.

Sebastià Miquel Ribot