

*Indirect methods of estimate  
striking period through the  
concrete strength evolution*

# Métodos de cálculo indirectos del periodo de descimbrado a partir de la evolución de la resistencia del hormigón



## **Autores**

**CÁNOVES, J.** Universitat Politècnica de València  
jcanoves@csa.upv.es  
Valencia, España

**CALVET, V.** Universitat Politècnica de València  
vccalrod@upv.es  
Valencia, España

**BENLLOCH, J.** Universitat Politècnica de València  
jabenllo@csa.upv.es  
Valencia, España

**VALCUENDE, M.** Universitat Politècnica de València  
mvalcuen@csa.upv.es  
Valencia, España

**Fecha de recepción** 16/06/2012

**Fecha de aceptación** 10/12/2012

## Resumen

En este trabajo se propone un nuevo método de cálculo del periodo de descimbrado de la estructura de hormigón armado que es una alternativa a los métodos de cálculo actuales, directos e indirectos, del periodo de descimbrado (p. ej. realización de ensayos de resistencia, ajuste de los métodos a la realidad de los hormigones actuales). Al mismo tiempo se ajusta o modifica el método de cálculo del periodo de descimbrado propuesto por Benlloch (1996). Para ello, se parte del análisis de la evolución de la resistencia carac-

terística a tracción de los hormigones habitualmente empleados en edificación HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa (tipificados según EHE-08). Los datos empleados han sido extraídos de una base de datos compuesta por 67.785 datos de resistencia a compresión, a los que mediante un estudio estadístico y las ecuaciones especificadas por la Instrucción de Hormigón Estructural Española de 2008 (EHE-08), se han obtenido unas ecuaciones y gráficas que estiman la evolución de la resistencia a tracción.

**Palabras clave:** Descimbrado, resistencia, hormigón, temperatura.

## Abstract

*This paper proposes a new method of calculating the striking period of the reinforced concrete structure that is an alternative to current methods for calculating, direct and indirect, of the striking period (eg. resistance testing, adjustment methods to the current reality of concrete). At the same time adjusts or modify the calculating method of the striking period proposed by Benlloch (1996). For this, is done on the analysis of the evolution of the*

*concrete characteristic tensile strength commonly used in building HA-30/B/20/IIa and HA-25/B/20/IIa (categorized according to EHE-08). The data used are taken from a database composed of 67.785 compressive strength data, that through a statistician study and the equations specified by the Spanish Code on Structural Concrete of 2008 (EHE-08), have obtained some equations and graphs to estimate the tensile strength evolution.*

**Key words:** Striking, strength, concrete, temperature.

## 1. Introducción

En la actualidad se han propuesto un gran número de métodos de cálculo de los coeficientes de carga de la estructura durante el proceso constructivo: como son los métodos simplificados de Calderón, Alvarado y Adam (2011); Beeby (2001); Duan y Chen (1995); Fang, Zhu, Geng y Liu (2001); Grundy y Kabaila (1963); Mosallam y Chen (1990); y los métodos computacionales mediante elementos finitos como los de Alvarado, Calderón, Gash y Adam (2010); Chen y Mossallam (1991); Díaz (2008); Liu, Chen y Bowman (1985b); Moragues, Catalá y Pellicer (1994); Stivaros y Halvorsen (1990). Sin embargo, los métodos de cálculo del periodo de descimbrado de la estructura de hormigón armado, como los de Benlloch (1996); Calavera (1988); Calavera y Fernández (1991); Chen y Mossallam (1991); Marí y Serrá (1995), son muy limitados en número.

Los métodos de cálculo actuales del periodo de descimbrado pueden ser directos e indirectos. Los métodos directos como los de Calavera (1988); Marí y Serrá (1995) están basados en la realización de ensayos de resistencia a tracción sobre el hormigón durante la construcción de la estructura. Estos presentan el inconveniente de la conversión de los valores medios de los ensayos en característicos con un pequeño número de datos de resistencia a tracción. Además, el método de Marí y Serrá (1995) debe de comprobar cada estado límite último y de servicio, por lo que requiere la realización de un mayor número de ensayos (p. ej. el cálculo del módulo elástico). Por lo tanto, estos dos métodos pueden ser, en la práctica, poco adecuados en obras de escasa envergadura. Los métodos indirectos como el L.R.F.D (Chen y Mosallam, 1991); Benlloch (1996); Calavera y Fernández (1991) son de gran utilidad en todo tipo de obras, debido a que no requieren la realización de ningún ensayo. Sin embargo, los métodos L.R.F.D (Chen y Mosallam, 1991); Benlloch (1996) presentan el inconveniente de la necesidad de ser modificados o actualizados a medida que cambian las propiedades mecánicas de los hormigones, debido a que los hormigones actuales son tipificados con una mayor resistencia y presentan una evolución de la resistencia más rápida que los hormigones producidos hace unos años. Además, el método de Calavera y Fernández (1991) debe resolver un inconveniente, práctico que no teórico, aun mayor, puesto que para su empleo se debe conocer la evolución de la resistencia a tracción del cemento empleado en el hormigón considerado.

Por lo tanto, debido a los inconvenientes de los métodos de cálculo del periodo de descimbrado existentes, este trabajo propone un nuevo método de cálculo

indirecto del periodo de descimbrado que resuelve el inconveniente de la realización de ensayos de resistencia del hormigón de los métodos directos y, el inconveniente de la necesidad de actualización de los métodos indirectos a la realidad de los hormigones actuales. Al mismo tiempo, también se propone el ajuste o modificación del método desarrollado por Benlloch (1996), debido a que dicho método indirecto se calculó con base en los resultados obtenidos de resistencia a compresión de hormigones fabricados hace más de una década y sometidos a curado normalizado. La principal diferencia entre ambos métodos se debe a que el método modificado calcula los días necesarios para una temperatura de curado normalizado de 20°C y posteriormente con la temperatura de curado ajusta los días teóricos de descimbrado mediante las ecuaciones propuestas por el Código Modelo (1990) o por la antigua Instrucción de Hormigón Estructural Española "EH-91". En cambio, el método propuesto calcula directamente los días teóricos de descimbrado para cada temperatura inicial de curado del hormigón.

## 2. Metodología

El parámetro crítico para el descimbrado de la estructura de hormigón armado es la resistencia a tracción del hormigón (Calavera y Fernández, 1991); puesto que es, de todas las propiedades mecánicas del hormigón, la que evoluciona más lentamente. De hecho, los métodos indirectos propuestos por Benlloch (1996); Calavera y Fernández (1991); Chen y Mossallam (1991) están basados en la evolución de la resistencia a tracción. Por lo tanto, para desarrollar el nuevo método de cálculo y ajustar el método Benlloch (16) se parte de los datos de resistencia a compresión obtenidos en el anterior estudio, donde se han desarrollado unas expresiones para la estimación de la evolución de 3 a 28 días de la resistencia a compresión de los hormigones preparados de obra HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa (Tabla 1 y 2), tipificados de acuerdo a la EHE-08 (p. ej. el HA-25/B/20/IIa es un hormigón de resistencia característica de proyecto a compresión de 25 MPa, consistencia blanda, tamaño máximo del árido de 20 mm y ambiente normal con humedad alta), más empleados en la Cuenca Mediterránea Española durante los últimos años. Posteriormente, debido a que no se disponen de datos de resistencia a tracción de los diferentes hormigones preparados de obra, puesto que no es un ensayo de control obligatorio en las obras, se ha optado por la aplicación de las ecuaciones especificadas por la Instrucción de Hormigón Estructural de 2008 "EHE-08" a los resultados de las Tablas 1 y 2, estimando así la evolución de la resistencia característica a tracción de 3 a 28 días en los hormigones HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa.

**Tabla 1.** Resistencia característica a compresión y ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión del HA-25 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura.

Datos a regresar / Regression data	Ecuación de cálculo / Calculation equation	f <sub>ck</sub> , MPa, (%)		
		3 días/days	7 días/days	28 días/days
Toda la muestra / All sample	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,481345 + 0,156187*ln(días)	16,30 (65,0)	19,79 (79,0)	25,01 (100,0)
Intervalo 5<T≤10°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,420555 + 0,173653*ln(días)	15,74 (62,9)	18,26 (73,0)	25,38 (101,0)
Intervalo 10<T≤15°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,475318 + 0,157298*ln(días)	16,22 (64,9)	19,57 (78,0)	26,06 (100,0)
Intervalo 15<T≤20°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,476716 + 0,16699*ln(días)	16,38 (65,5)	20,37 (81,0)	25,73 (103,0)
Intervalo 20<T≤25°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,490947 + 0,153865*ln(días)	16,35 (65,4)	19,96 (80,0)	25,02 (100,0)
Intervalo 25<T≤30°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,496372 + 0,147706*ln(días)	16,52 (66,1)	19,61 (78,0)	24,67 (99,0)
Intervalo 30<T≤35°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,567204 + 0,102778*ln(días)	17,42 (69,7)	18,52 (74,0)	22,90 (92,0)

**Tabla 2.** Ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a compresión del HA-30 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura.

Datos a regresar / Regression data	Ecuación de cálculo / Calculation equation	f <sub>ck</sub> , MPa, (%)		
		3 días/days	7 días/days	28 días/days
Toda la muestra / All sample	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,62245 + 0,114894*ln(días)	21,78 (74,0)	25,31 (86,0)	29,52 (100,0)
Intervalo 10<T≤15°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,479839 + 0,180419*ln(días)	19,41 (66,0)	25,52 (86,0)	31,65 (107,0)
Intervalo 15<T≤20°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,571603 + 0,141952*ln(días)	21,25 (72,0)	25,24 (86,0)	30,62 (104,0)
Intervalo 20<T≤25°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,588356 + 0,137207*ln(días)	21,60 (73,0)	25,70 (87,0)	30,60 (104,0)
Intervalo 25<T≤30°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,673626 + 0,08925*ln(días)	22,86 (77,0)	25,13 (85,0)	28,78 (97,0)
Intervalo 30<T≤35°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,722895 + 0,0707754*ln(días)	22,63 (77,0)	26,77 (91,0)	27,66 (94,0)
Intervalo 35<T≤39°C	% de f <sub>ck</sub> a 28 días = 0,863989 + 0,0263511*ln(días)	26,25 (89,0)	27,23 (92,0)	28,08 (95,0)

En un anterior estudio se analizó la influencia de los principales parámetros tecnológicos (tipo de cemento, relación agua/cemento, contenido de cemento, adiciones, aditivos y consistencia) y ambientales (temperatura y tiempo de conservación de las probetas en obra) en la evolución de la resistencia de los hormigones HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa, probando estadísticamente que el parámetro más significativo en la evolución de la resistencia de dichos hormigones preparados de obra es la temperatura inicial de curado. Por lo tanto, de acuerdo con Ortiz, Aguado, Agulló, García y Zemeño (2008); Gómez y Vidal (2006), el método propuesto calculará los días teóricos necesarios para el descimbrado de la estructura de hormigón armado dependiendo de la temperatura inicial de curado.

### 3. Resultados

En el anterior estudio se partió de una base de datos, proporcionados por más de 15 empresas productoras de hormigón en la Cuenca Mediterránea Española, compuesta por 67.782 datos de resistencia media a compresión de diferentes hormigones preparados de obra, agrupados en 12.892 lotes en los que se registran resistencias medias a edades comprendidas entre los 3, 7, 28 y 60 días. Se calculó la evolución de la resistencia característica a compresión de 3 a 28 días, para cada intervalo de temperatura inicial de curado, de los dos hormigones preparados de obra más empleados durante el periodo de tiempo de 2000 a 2011 en el caso del HA-25/B/20/IIa (Tabla 1) y de 2006 a 2011 en el caso del HA-30/B/20/IIa (Tabla 2).

Debido a que la resistencia crítica para el descimbrado de la estructura de hormigón armado es la resistencia a tracción (Calavera y Fernández, 1991), se aplica la Ecuación 1, propuesta por la EHE-08, a los valores de la resistencia característica a compresión obtenidos en el estudio anterior (Tablas 1 y 2), calculando así la resistencia característica a tracción a 3, 7 y 28 días (Tabla 3) y la evolución de la resistencia característica a tracción de 3 a 28 días para toda la muestra y cada intervalo de temperatura para el hormigón HA-25/B/20/IIA y el HA-30/B/20/IIa. Esta evolución se muestra como el porcentaje de resistencia a j días, para cada intervalo de temperatura y edad, respecto del valor medio obtenido a 28 días de la resistencia característica a tracción de toda la muestra de hormigón, de HA-25/B/20/IIa y HA-30/B/20/IIa (Tabla 4).

$$f_{ct,k} = 0,21 \sqrt[3]{f_{ck}^2} \quad (\text{N/mm}^2) \quad [1]$$

Una vez obtenido el porcentaje de resistencia a tracción a 3, 7 y 28 días respecto del valor medio obtenido a 28 días de la resistencia característica a tracción especificada en proyecto " $f_{ct,k}$ " de cada tipología de hormigón (25 y 30 MPa), se estima la evolución de la resistencia característica a tracción para cada intervalo de temperatura y tipología de hormigón considerada mediante la regresión de los valores medios de la resistencia característica a tracción a 3, 7 y 28 días. Se ha escogido este procedimiento de cálculo, puesto que la media de cada variable (3, 7 y 28 días) uniformiza la variabilidad de las variables que intervienen en ella

**Tabla 3.** Resistencia característica a tracción (en MPa) de toda la muestra y cada intervalo de temperatura del hormigón HA-25 y HA-30.

Tipo hormi. / Concrete Type	Edad (días) / Age (days)	Toda la Muestra / All Sample	Intervalos de temperatura inicial de curado, en °C. Intervals of initial temperature of curing, in °C.						
			5<T≤10	10<T≤15	15<T≤20	20<T≤25	25<T≤30	30<T≤35	35<T≤39
HA-25	3	1,35	1,32	1,34	1,35	1,35	1,36	1,41	
	7	1,53	1,45	1,52	1,56	1,54	1,53	1,47	
	28	1,80	1,81	1,80	1,83	1,79	1,77	1,70	
HA-30	3	1,64		1,51	1,61	1,63	1,70	1,68	1,85
	7	1,81		1,82	1,80	1,83	1,80	1,88	1,90
	28	2,00		2,10	2,05	2,05	1,97	1,92	1,94

**Tabla 4.** Evolución de la resistencia característica a tracción (en %) de toda la muestra y cada intervalo de temperatura del hormigón HA-25 y HA-30

Tipo hormi. / Concrete Type	Edad (días) / Age (days)	Toda la Muestra / All Sample	Intervalos de temperatura inicial de curado, en °C. Intervals of initial temperature of curing, in °C.						
			5<T≤10	10<T≤15	15<T≤20	20<T≤25	25<T≤30	30<T≤35	35<T≤39
HA-25	3	75,0	73,3	74,4	75,0	75,0	75,6	78,3	
	7	85,0	81,0	84,0	87,0	86,0	85,0	82,0	
	28	100,0	101,0	100,0	102,0	99,0	98,0	94,0	
HA-30	3	82,0		76,0	81,0	82,0	85,0	84,0	93,0
	7	91,0		91,0	90,0	92,0	90,0	94,0	95,0
	28	100,0		105,0	103,0	103,0	99,0	96,0	97,0

(p. ej. Tipo de cemento, relación A/C, aditivos, adiciones, contenido de cemento, etc.). Las ecuaciones que calculan la evolución de la resistencia característica a tracción para cada intervalo de temperatura y para toda la muestra del hormigón cuya resistencia característica especificada de proyecto es de 25 y 30 MPa se muestran en las Tabla 5 y 6, para cada tipo de hormigón respectivamente. Del mismo modo, en las Figuras 1 a 7 y 8 a 14 se muestran las gráficas de evolución de la resistencia característica a tracción, representada en % respecto de la resistencia característica a tracción especificada en proyecto " $f_{ct,k}$ ", de ambos tipos de hormigón.

En la Tabla 4 se observa que la evolución de la resistencia característica a tracción del hormigón HA-30, en todos los intervalos de temperatura y para toda la muestra, es más rápida que en el hormigón HA-25. Este efecto es más notable a edades cortas de 3 a

7 días que a edades posteriores (p. ej. a 20-25°C el HA-30 presenta un % de resistencia característica a tracción respecto de la resistencia característica especificada en proyecto a 3 y 28 días del 82% y 103%, y el HA-25 de 75% y 99%). Al mismo tiempo, también se observa que a mayor temperatura este efecto se incrementa, puesto que a la edad de 3 días y una temperatura de 10-15°C el HA-30 presenta un incremento de resistencia respecto del HA-25 del orden de 1,6% y a una temperatura de 25-30°C se incrementa hasta el 9,4%.

El incremento de la temperatura de curado inicial produce una pérdida de rigidez de la gráfica de evolución de la resistencia característica a tracción, de modo que a mayor temperatura las gráficas presentan un comportamiento más plano que a menor temperatura donde se muestran más rígidas, ver Figs. 1 a 14.

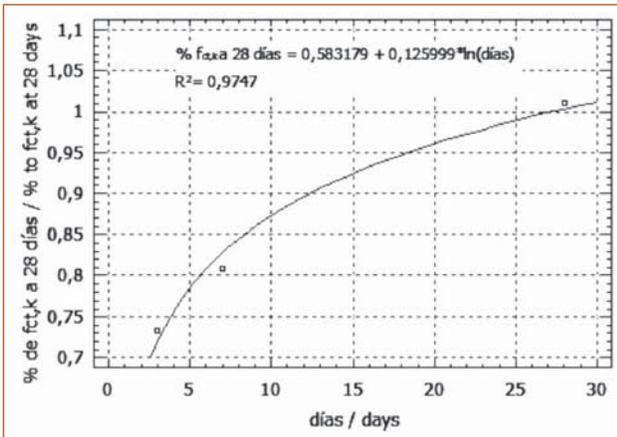
**Tabla 5.** Ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura.

Datos a regresar / Regression data	R <sup>2</sup>	Ecuación de cálculo / Calculation equation
Toda la muestra / All sample	99,89	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,629532 + 0,111562*ln(días)
Intervalo 5<T≤10°C	97,47	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,583179 + 0,125999*ln(días)
Intervalo 10<T≤15°C	99,99	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,617547 + 0,114692*ln(días)
Intervalo 15<T≤20°C	98,89	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,625697 + 0,11964*ln(días)
Intervalo 20<T≤25°C	98,37	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,64112 + 0,106111*ln(días)
Intervalo 25<T≤30°C	99,57	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,650188 + 0,0996491*ln(días)
Intervalo 30<T≤35°C	95,06	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,694872 + 0,0718841*ln(días)

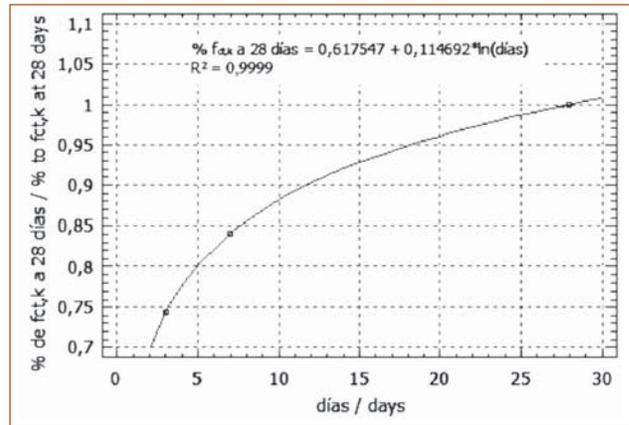
**Tabla 6.** Ecuaciones de cálculo de la evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 para toda la muestra de hormigón y para cada intervalo de temperatura.

Datos a regresar / Regression data	R <sup>2</sup>	Ecuación de cálculo / Calculation equation
Toda la muestra / All sample	96,19	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,741966 + 0,0790532*ln(días)
Intervalo 10<T≤15°C	95,02	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,636697 + 0,12701*ln(días)
Intervalo 15<T≤20°C	99,771	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,704955 + 0,0980336*ln(días)
Intervalo 20<T≤25°C	97,54	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,726543 + 0,092582*ln(días)
Intervalo 25<T≤30°C	99,87	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,779637 + 0,0628989*ln(días)
Intervalo 30<T≤35°C	76,52	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,807318 + 0,049876*ln(días)
Intervalo 35<T≤39°C	96,19	% $f_{ct,k}$ a 28 días = 0,912659 + 0,0175674*ln(días)

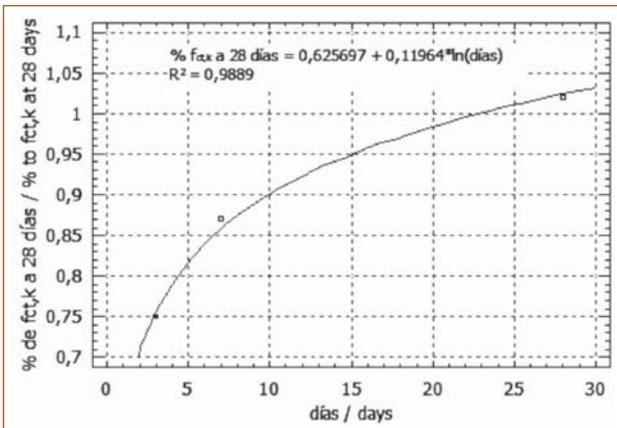
**Fig. 1.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 5 a 10°C.



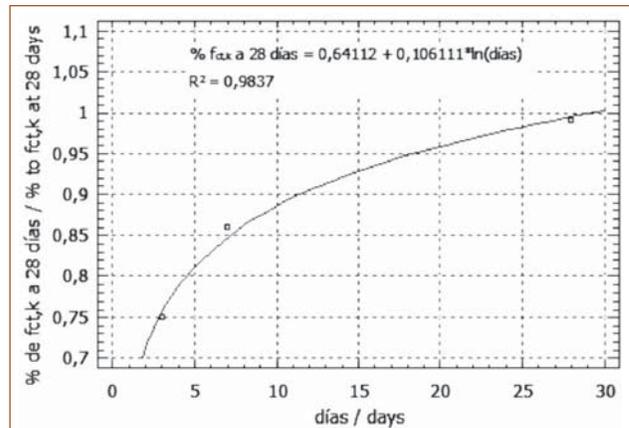
**Fig. 2.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 10 a 15°C.



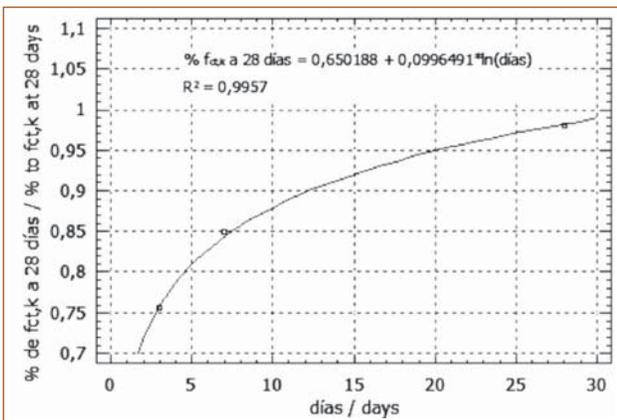
**Fig. 3.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 15 a 20°C.



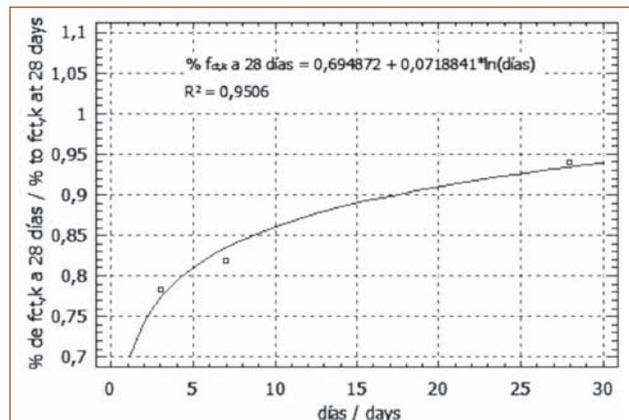
**Fig. 4.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 20 a 25°C.



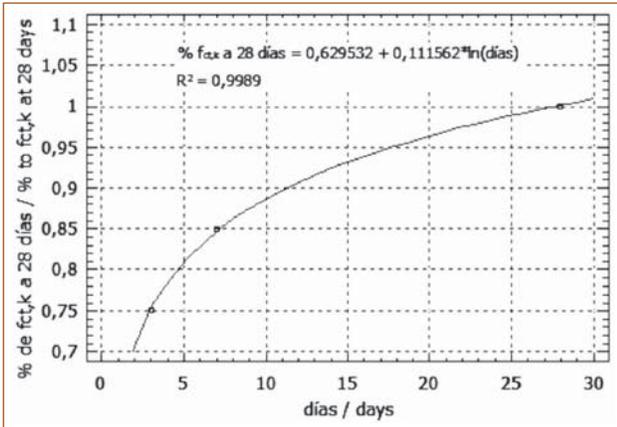
**Fig. 5.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 25 a 30°C.



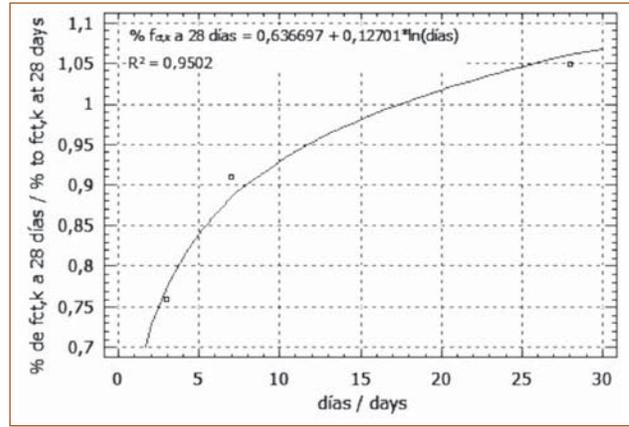
**Fig. 6.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 30 a 35°C.



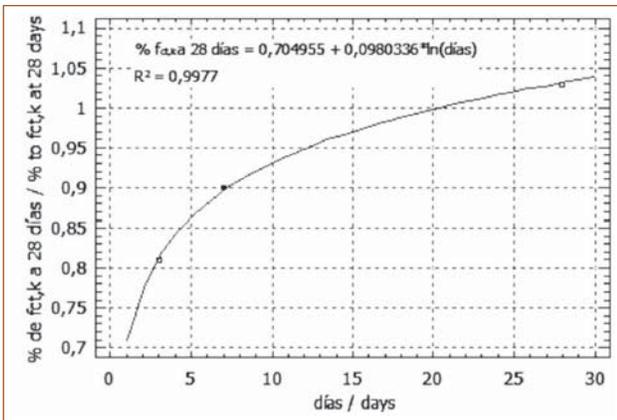
**Fig. 7.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-25 para todos los intervalos de temperatura inicial de curado.



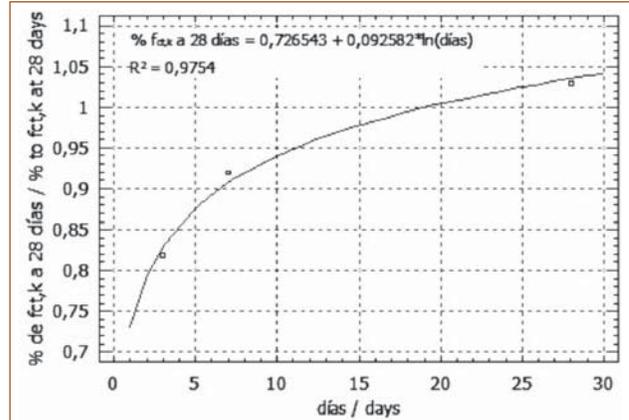
**Fig. 8.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 10 a 15°C.



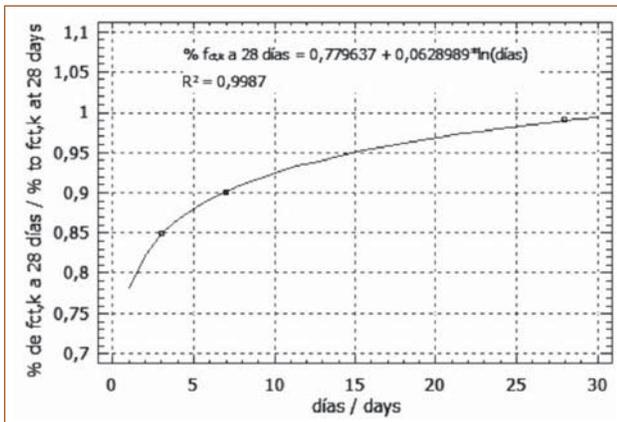
**Fig. 9.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 15 a 20 °C.



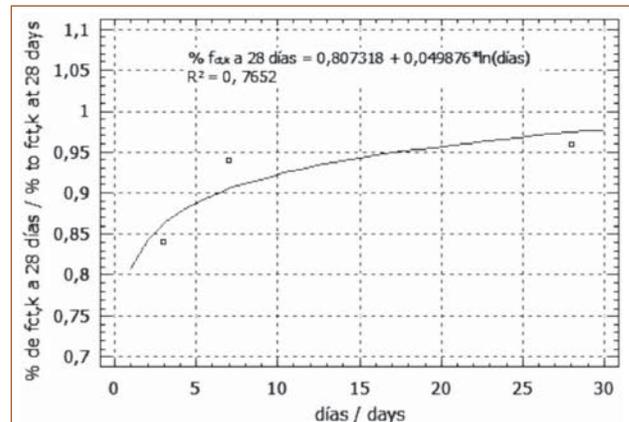
**Fig. 10.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 20 a 25°C.



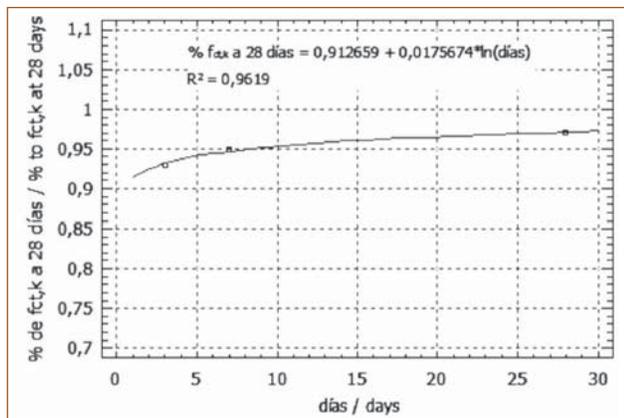
**Fig. 11.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 25 a 30 °C.



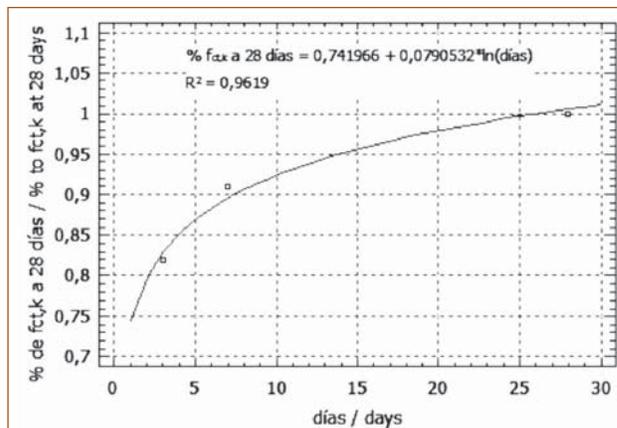
**Fig. 12.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 30 a 35°C.



**Fig. 13.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 en el intervalo de temperatura inicial de curado de 35 a 39°C.



**Fig. 14.** Evolución de la resistencia característica a tracción del HA-30 para todos los intervalos de temperatura inicial de curado.



#### 4. Método propuesto.

Teniendo en cuenta que la resistencia crítica para el descimbrado de las estructuras de hormigón armado es la resistencia a tracción (Calavera y Fernández, 1991) y con los resultados obtenidos de la evolución de la resistencia característica a tracción de los dos hormigones más empleados en la Cuenca Mediterránea Española, HA-25 y HA-30, se propone un nuevo método de cálculo indirecto del periodo de descimbrado.

En este método de cálculo del periodo de descimbrado de la estructura de hormigón armado se debe cumplir, para cada operación constructiva, con la Ecuación 2.

$$f_{ct,k,j} \geq \alpha \cdot f_{ct,k,28} \geq \frac{(K \cdot 1,10 \cdot 1,10 \text{ P.P.} + \text{Sob. Const.}) \cdot Y_f}{Y_f \text{ Carga total}} \cdot f_{ct,k,28} \quad [2]$$

(N/mm<sup>2</sup>)

donde:  $f_{ct,k,j}$  es la resistencia característica a tracción en cada momento,  $j$ , en el que tenga lugar cada operación constructiva.  $\alpha$  es la relación entre la carga que actúa en una determinada situación del proceso constructivo y la carga para la que ha sido calculada la estructura. El coeficiente  $\alpha$  es válido para las condiciones de Estados Límites de Servicio y de Estados Límites Últimos; en este último caso con los coeficientes de mayoración que el técnico proyectista juzgue oportunos.  $K$  es el factor de carga de la estructura considerada. P.P. es el peso propio de la estructura considerada.  $Y_f$  es el coeficiente de ponderación de acciones transitorias desfavorables.  $Y_f$  coeficiente de ponderación de acciones permanentes no constantes o variables.

Si se despeja  $\alpha$ , valor adimensional, de la ecuación 2, también se puede definir como el porcentaje de resistencia característica a tracción a  $j$  días respecto a los 28 días de edad.

$$\alpha = \frac{f_{ct,k,j}}{f_{ct,k,28}} \quad [3]$$

Este método se puede emplear tanto en la fase de proyecto como durante la ejecución de la obra. Si se emplea durante la fase de proyecto, la metodología de uso es la siguiente:

- I. Se calcula el factor de carga "k" en las condiciones de cada operación constructiva mediante cualquier método aprobado por la práctica (Alvarado *et al.*, 2010; Beeby, 2001; Calderón *et al.*, 2011; Chen y Mossallam, 1991; Díaz, 2008; Duan y Chen, 1995; Fang *et al.*, 2001; Grundy y Kabaila, 1963; Liu *et al.*, 1985b; Moragues *et al.*, 1994; Mosallam y Chen, 1990; Stivaros y Halvorsen, 1990).
- II. Con el factor de carga "k" se calcula el coeficiente "α" necesario para que se cumplan las condiciones de los estados límite últimos.
- III. Con el valor del coeficiente "α" necesario se entra en el eje de ordenadas de la gráfica correspondiente al intervalo de temperatura dominante y del tipo de hormigón considerado (Figuras 1 a 14), obteniéndose en el eje de abscisas los días teóricos que deben transcurrir para el descimbrado de dicha fase constructiva.

Si el coeficiente “ $\alpha$ ” necesario para el descimbrado es menor que el valor del porcentaje de resistencia característica a tracción a 3 días respecto de la resistencia característica a tracción especificada en proyecto para cada tipo de hormigón, definido en la Tabla 7, se establece un periodo mínimo de descimbrado de 3 días, debido a que las ecuaciones y gráficas han sido calculadas a partir de datos de resistencia del hormigón a la edad de 3 días. Periodos más cortos exigirían la realización de probetas curadas en condiciones de obra.

Si se emplea el método propuesto durante la ejecución de la obra, se procederá en sentido inverso al propuesto para las condiciones de proyecto:

- I. Mediante las Figuras 1 a 14, y una vez conocida la temperatura y días transcurridos desde el hormigonado, se calcula el coeficiente “ $\alpha$ ”. Para ello se entra en la figura seleccionada por el eje de abscisas obteniendo en ordenadas el coeficiente “ $\alpha$ ”.
- II. Se calcula el factor de carga “ $k$ ” en las condiciones de cada operación constructiva mediante cualquier método aprobado por la práctica (Alvarado *et al.*, 2010; Beeby, 2001; Calderón *et al.*, 2011; Chen y Mossallam, 1991; Díaz, 2008; Duan y Chen, 1995; Fang *et al.*, 2001; Grundy y Kabaila, 1963; Liu *et al.*, 1985b; Moragues *et al.*, 1994; Mosallam y Chen, 1990; Stivaros y Halvorsen, 1990).
- III. Con el factor de carga “ $k$ ” se calcula el coeficiente “ $a$ ” necesario para que se cumplan las condiciones de los estados límite últimos.
- IV. Se comprueba que el coeficiente “ $a$ ” obtenido en las figuras es mayor o igual al calculado para cada operación constructiva.

## 5. Ajuste del método J. Benlloch

Benlloch (1996) estableció unas ecuaciones de cálculo del periodo de descimbrado basándose en la relación

lineal entre el logaritmo de la edad (o más propiamente de la madurez del hormigón) y la resistencia a tracción del hormigón (ecuaciones 4 y 5). Esta consideración ya había sido considerada anteriormente por otros investigadores como Neville (1988).

$$t = e^{\frac{(\alpha - 0,59249)}{0,11541}} \quad (f_{ck} \geq 30,0 \text{ MPa}) \quad [4]$$

$$t = e^{\frac{(\alpha - 0,44976)}{0,16275}} \quad (f_{ck} \leq 25,0 \text{ MPa}) \quad [5]$$

Por lo tanto, si la resistencia característica a tracción a la edad de  $j$  días es (ecuación 6):

$$f_{ct,k,j} \geq A + B \cdot \ln j \quad [6]$$

Con los resultados obtenidos en las Tablas 5 y 6, para el caso de toda la muestra de hormigón, es posible el ajuste del método propuesto por Benlloch (1996) a la realidad de los hormigones preparados de obra durante los últimos años. Para una edad cualquiera,  $j$ , se obtienen las ecuaciones 7 y 8, para el caso de hormigón de  $f_{ck}$  igual a 25 y 30 MPa, respectivamente.

$$f_{ct,k,j} \geq (A + B \cdot \ln j) \cdot f_{ct,k,28} = (0,629532 + 0,111562 \cdot \ln t) \cdot f_{ct,k,28} \quad [7]$$

$$f_{ct,k,j} \geq (A + B \cdot \ln j) \cdot f_{ct,k,28} = (0,741966 + 0,0790532 \cdot \ln t) \cdot f_{ct,k,28} \quad [8]$$

Para la edad de 28 días, se convierte en la identidad siguiente:

**Tabla 7.** Mínimo coeficiente  $a$  a partir del cual son válidas las expresiones y ecuaciones de este método para el HA-25 y HA-30

Tipo hormigón / Concrete type	Toda la Muestra / All Sample	Intervalos de temperatura inicial de curado, en °C / Intervals of initial temperature of curing, in °C.						
		5 < T ≤ 10	10 < T ≤ 15	15 < T ≤ 20	20 < T ≤ 25	25 < T ≤ 30	30 < T ≤ 35	35 < T ≤ 39
HA-25	0,75	0,733	0,744	0,75	0,75	0,756	0,783	---
HA-30	0,82	---	0,76	0,81	0,82	0,85	0,84	0,93

$$f_{ct,k,28} = (0,629532 + 0,111562 \cdot \ln 28) \cdot [9]$$

$$f_{ct,k,28} = 1,00 \cdot f_{ct,k,28}$$

$$f_{ct,k,28} = (0,741966 + 0,0790532 \cdot \ln 28) \cdot [10]$$

$$f_{ct,k,28} = 1,00 \cdot f_{ct,k,28}$$

Dividiendo la Ec. 7 entre la Ec. 9, y la Ec. 8 entre la Ec. 10, se tiene el cociente  $f_{ct,k,j} / f_{ct,k,28}$ , que es, precisamente  $\alpha$ , para los hormigones de resistencia especificada de 25 y 30 MPa, respectivamente.

$$\frac{f_{ct,k,j}}{f_{ct,k,28}} = \alpha = \frac{(0,629532 + 0,111562 \cdot \ln t) \cdot f_{ct,k,28}}{1,00 \cdot f_{ct,k,28}} \rightarrow [11]$$

$$\alpha = (0,629532 + 0,111562 \cdot \ln t)$$

$$\frac{f_{ct,k,j}}{f_{ct,k,28}} = \alpha = \frac{(0,741966 + 0,0790532 \cdot \ln t) \cdot f_{ct,k,28}}{1,00 \cdot f_{ct,k,28}} \rightarrow [12]$$

$$\alpha = (0,741966 + 0,0790532 \cdot \ln t)$$

Despejando los días necesarios para el descimbrado "t" de las expresiones anteriores, se obtienen las Ecs. 13 y 14, para el cálculo del periodo de descimbrado de los hormigones HA-25 y HA-30, respectivamente.

$$t = e^{\frac{(\alpha - 0,629532)}{0,111562}} \quad (f_{ck} = 25 \text{ MPa}) \quad [13]$$

$$t = e^{\frac{(\alpha - 0,741966)}{0,0790532}} \quad (f_{ck} = 30 \text{ MPa}) \quad [14]$$

Finalmente se realiza la corrección de la temperatura de curado del hormigón mediante la Ec. 15 ó 16, ambas propuestas por el Código Modelo (1990) y por la antigua Instrucción de Hormigón Estructural EH-91, respectivamente. Esta última ecuación supone unos valores semejantes que los establecidos en la Tabla 74 definida por la EHE-08 para periodos de desencofrado y descimbrado de elementos de hormigón armado. Al mismo tiempo, se recomienda el empleo de la Ec. 16 puesto que presenta una mayor facilidad operativa que la Ec. 15.

$$t_t = \sum_{j=1}^n \Delta t_j e^{-\left(\frac{4.000}{273 + \frac{T(\Delta t_j)}{T_0}} - 13,65\right)} \quad [15]$$

donde:  $t_t$ , es la edad del hormigón corregida, edad teórica.  $T(\Delta t_j)$ , es la temperatura en °C, durante un periodo de tiempo  $\Delta t_j$ .  $T_0$ , es la temperatura en °C.  $\Delta t_j$ , es el número de días que el hormigón ha permanecido a una temperatura media de  $T$ °C.

$$t_t = \frac{\sum_{i=1}^n [j \cdot (T+10)]}{30} \quad [16]$$

Donde:  $j$ , es el número de días durante los cuales el endurecimiento se efectúa a una temperatura media de  $T$  grados centígrados.

## 6. Conclusiones

Las principales conclusiones extraídas del presente estudio son las siguientes:

La evolución de la resistencia característica a tracción a edades tempranas de 3 a 7 días, en todos los intervalos de temperatura y para toda la muestra, es más rápida en el hormigón HA-30 que en el hormigón HA-25, en ambos casos con cementos portland puros (CEM I, 100% clínker) o con adiciones (CEM II). Este efecto es más notable a edades cortas de 3 a 7 días que a edades posteriores. Al mismo tiempo, también se observa que a mayor temperatura este efecto se incrementa, puesto que a una temperatura de 10-15°C el HA-30 presenta un incremento de resistencia respecto del HA-25 del orden del 1,6% y a una temperatura de 25-30°C se incrementa hasta el 9,4%. Este efecto puede ser debido a una mayor cantidad o una mejor calidad del cemento utilizado en la dosificación del HA-30.

Las gráficas de evolución de la resistencia característica a tracción respecto de la resistencia característica especificada en proyecto varían su comportamiento dependiendo de la temperatura de curado inicial. De modo que el incremento de temperatura de curado inicial produce una pérdida de rigidez de la gráfica, puesto que a mayor temperatura las gráficas presentan un comportamiento más plano que a menor temperatura donde se muestran más rígidas.

Hasta aproximadamente la edad de 7 días la evolución de la resistencia a tracción tiende a ser mayor cuanto mayor es la temperatura inicial de curado (24-48 horas). No obstante, para edades superiores el proceso se invierte y da lugar, en general, a la edad de 28 días a menores resistencias. Este efecto es algo más acusado en los hormigones fabricados con más cantidad o mayor calidad del cemento; es decir, los hormigones HA-30. Además, la forma de sus gráficas de evolución

de la resistencia pronostica un escaso incremento de sus propiedades a edades mayores de 28 días.

En hormigones HA-25 la temperatura inicial de curado en obra óptima se sitúa en el intervalo de temperatura 15-20°C siendo acusada la merma resistente cuando esta temperatura se incrementa notablemente.

En hormigones HA-30 la temperatura inicial de curado en obra óptima es algo más baja que en hormigones HA-25. El intervalo 10-15-20°C produce las mejores características resistentes. Su mayor generación de calor de hidratación puede explicar este comportamiento diferente.

La influencia que la temperatura inicial de curado ha tenido sobre la resistencia a tracción a 3 días ha sido mayor en el hormigón HA-30 que en el HA-25. A edades más avanzadas, la influencia ha sido similar en ambos tipos de hormigón.

Se propone un nuevo método de cálculo indirecto del período de descimbrado de la estructura de hormigón armado que resuelven los inconvenientes de los métodos actuales. Este método es aplicable en hormigones cuya resistencia especificada sea de 25 ó 30 Mpa y en los intervalos de temperatura estudiados en cada caso. Al mismo tiempo presenta una limitación para los

valores del coeficiente  $\alpha$  menores a los especificados para cada intervalo de temperatura, puesto que para estos casos se establece un periodo mínimo de tres días, adecuado para un método de cálculo indirecto.

Se proponen unas nuevas ecuaciones de cálculo del periodo de descimbrado del Método de Benlloch, adaptando el método a las características mecánicas y condiciones de obra de los hormigones empleados a lo largo de los últimos años. Destaca, en los hormigones actuales, el mayor valor del término independiente de las ecuaciones, mientras que se reduce el coeficiente que afecta a la variable "t", edad del hormigón, lo que indica unos materiales con menor influencia de esta variable, el tiempo, para el cálculo de los plazos de descimbrado.

## Agradecimientos

Se agradece al Dr. Rafael Díez Barra, del Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria "INIA" su colaboración en el estudio estadístico de la presente investigación, así como también al Instituto Tecnológico de la Construcción "AIDICO" y a los laboratorios de control de calidad INCIVSA S.L y HORMIUNIÓN S.L.

## Bibliografía

Alvarado, Y., Calderón, P.A., Gasch, I. & Adam, J.M. A. (2010). Numerical study into the evolution of loads on shores and slabs during construction of multi-storey buildings. Comparison of partial striking with other techniques. *Engineering Structures*, 32(10), 3093-102.

Beeby, A.W. (2001). The forces in backprops during construction of flat slab structures. *Structures and Buildings*, 146(3), 307-317.

Benlloch Marco, J. (1996). Sistemas de Cimbrado: Acciones, Plazos y Problemas Constructivos. *Trabajo de investigación para Cátedra de Universidad Politécnica de Valencia del Departamento de Construcciones Arquitectónicas*.

Calavera Ruiz, J. (1988). Cálculo, construcción y patología de forjados de edificación. *Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, INTEMAC, 4ª Edición, Madrid*, ISBN: 84-398-6463-9.

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

Calderón, Pedro A., Alvarado, Yeizid A. & Adam, Jose M. (2011). A new simplified procedure to estimate loads on slabs and shoring during the construction of multistorey buildings. *Engineering Structures*, 33, 1565-1575.

Chen, W.F. & Mosallam, K. (1991). Concrete buildings: Analysis for safe construction. *Boca Raton, Florida, USA*. ISBN:0-8493-85573-70-X.

Díaz, J. (2008). Criterios técnicos para el descimbrado de estructuras de hormigón. *Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid*.

Duan, M.Z. & Chen, W.F. (1995). Improved simplified method for slab and shore load analysis during construction. *Project Report CE-STR-95-24, West Lafayette, Ind*.

- Fang, D.P., Zhu, H.Y., Geng, C.D. & Liu, X.L. (2001). On site measurement of load distribution in reinforced concrete buildings during construction. *ACI Structural Journal*, 98(2), 157-163.
- Gómez, M. S. & Vidal, S. (2006). Influencia en la Resistencia a Compresión de Hormigones por Efecto de la Temperatura Ambiente. *Revista de la Construcción*, 5(1), 56-61.
- Grundy, P. & Kabaila, A. (1963). Construction loads on slabs with shored formwork in multistory buildings. *ACI Structural proceedings*, 60(12), 1729-1738.
- Liu, X.L., Chen, W.F. & Bowman, M.D. (1985b). Construction load analysis for concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, 111(5), 1019-1036.
- Moragues, J.J., 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.
- Marí, A.R & 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.
- Mosallam, K. & Chen, W.F. (1990). Design considerations for formwork in multistorey concrete buildings. *Engineering Structures*, 12(3), 163-172.
- Neville, A. M. (1988). Tecnología del Concreto. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. Editorial Limusa*. ISBN: 968-464-033-5. 1ª Reimpresión.
- Ortiz Lozano, J. A., Aguado de Cea, A., Agulló Fité, L., García Vicente, T. & Zemeño de León, M. E. (2008). Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Bases teóricas. *Materiales de Construcción*. 58, 291, 7-22.
- Stivaros, P.C. & Halvorsen, G.T. (1990). Shoring/Reshoring operations for multistory buildings. *ACI Struct Jorunal*, 87(5), 589-96.