

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES A L'ARQUITECTURA
DEPARTAMENT D'ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO
DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO
DESCIMBRADAS A TEMPRANAS EDADES

ISABEL SERRÀ MARTÍN

Trabajo realizado como parte de los
requisitos exigidos para optar al grado
de Doctor.

Barcelona - Noviembre de 1994

Capítulo 7

PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE PLAZOS DE DESCIMBRADO

En los capítulos anteriores se ha estudiado el efecto de la edad del hormigón al descimbrar en el comportamiento de piezas de hormigón armado frente a los diferentes estados límites. A partir de las conclusiones extraídas de dicho estudio, en el presente capítulo se plantea una metodología para el establecimiento de plazos de descimbrado.

La Instrucción española EH-91, en su artículo 21 titulado "Descimbrado, desencofrado y desmoldeo", establece que para desencofrar el hormigón deberá haber alcanzado la resistencia necesaria para soportar, con suficiente seguridad y sin deformaciones excesivas, los esfuerzos a que va a estar sometido durante y después del descimbrado. En el caso de obras de importancia, y cuando no se posea experiencia de casos análogos, o cuando los perjuicios que pudieran derivarse de una fisuración prematura fueran grandes, se deberán realizar ensayos de información para estimar la resistencia real del hormigón y poder fijar convenientemente los plazos de desencofrado.

En los comentarios se llama la atención a la necesidad de verificar no sólo la resistencia, sino el módulo de deformación en hormigones jóvenes. Se establece, a título orientativo, unos plazos de desencofrado dados por la siguiente expresión, aplicable sólo a hormigones fabricados con cemento portland y en el supuesto de que su endurecimiento se haya llevado a cabo en condiciones ordinarias:

$$j = \frac{400}{\left(\frac{Q}{G} + 0.5\right)(T + 10)}$$

donde:

j = número de días

T = temperatura media, en grados centígrados, de las máximas y mínimas diarias durante los j días

G = carga que actúa sobre el elemento al descimbrar (incluido el peso propio)

Q = carga que actuará posteriormente ($Q + G$ = carga máxima total)

Finalmente se recomienda que la seguridad de la obra no resulte, en ningún momento, inferior a la prevista en servicio.

Los criterios establecidos en la EH-91 pueden considerarse adecuados, aunque de carácter muy general. Además, según Fernández Gómez [1986], la anterior fórmula resulta ser muy conservadora. Por ello se ha considerado conveniente desarrollar parcialmente los criterios generales anteriores para tener en cuenta, a través de expresiones concretas, parámetros usuales en la práctica constructiva. Es decir, además de la relación Q/G y de la temperatura ambiente, en el establecimiento del plazo de desencofrado parece lógico que intervengan la cuantía de armaduras longitudinal y transversal, la geometría de la pieza y las propiedades mecánicas de los materiales, entre otros parámetros conocidos en proyecto y durante la construcción.

La metodología seguida para conseguir el objetivo deseado ha sido determinar, para cada estado límite más común, las características mecánicas que debe presentar el hormigón a fin de que dicho estado límite quede satisfecho, tanto en el momento del descimbrado como durante la vida útil de la estructura. En este contexto, la experimentación realizada en el presente trabajo cobra un carácter especialmente relevante ya que ha permitido comparar el comportamiento, frente a diversos estados límites, de las estructuras de hormigón a tempranas edades con el comportamiento a edades superiores. En consecuencia, se ha podido discernir sobre la aplicabilidad o no para hormigones jóvenes de los criterios utilizados para modelar los mecanismos resistentes en hormigones maduros.

Los estados límites que se han considerado para el establecimiento de los criterios de descimbrado han sido los siguientes:

- Estado límite último (E.L.U.) de agotamiento por solicitaciones normales
- E.L.U. de agotamiento por esfuerzo cortante
- E.L.U. de anclaje
- Estado límite de servicio (E.L.S.) de deformabilidad y
- E.L.S. de fisuración

En principio, se consideran piezas sometidas a flexión simple en las que no se producen torsiones apreciables.

7.1.- ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE AGOTAMIENTO POR FLEXIÓN SIMPLE

En los ensayos realizados se ha podido comprobar que, a pesar de las particularidades del diagrama tensión-deformación del hormigón a tempranas edades, los principios formulados para el comportamiento a flexión de secciones con hormigón maduro son extrapolables al caso de hormigones jóvenes, siempre que pueda considerarse aceptable la hipótesis de adherencia perfecta entre el hormigón y las armaduras. Así pues, en una pieza sometida a flexión simple, la evolución de la capacidad resistente seccional en función de la resistencia del hormigón tiene un gráfico tal como el de la *Figura 7.1.*

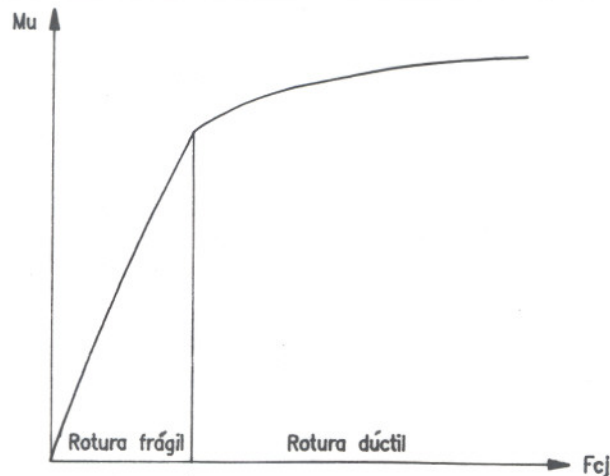


Figura 7.1.- Relación entre el momento flector último y la resistencia a compresión del hormigón

Cuando la rotura es frágil, esto es, cuando el hormigón alcanza su deformación última ϵ_{cu} antes de que el acero en tracción haya llegado a su límite elástico, el momento último se ve muy influido por la resistencia a compresión del hormigón. Sin embargo, cuando la rotura es dúctil (el acero plastifica antes de agotarse el hormigón) el momento último es prácticamente independiente de f_{cd} , estando influido básicamente por la cuantía de armadura de tracción.

Existe un valor mínimo de la resistencia del hormigón a partir del cual la rotura deja de ser frágil (rotura crítica). Este valor se puede obtener estableciendo las ecuaciones de equilibrio seccional que, para sección rectangular, son:

$$0 = \psi f_{cd} b x + A'_s \sigma'_s - A_s \sigma_s$$

$$0 = \psi f_{cd} b x (d - \lambda x) + A'_s \sigma'_s (d - d')$$

De la ecuación de equilibrio de fuerzas se tiene:

$$f_{cd} = \frac{A_s \sigma_s - A'_s \sigma'_s}{\psi b x}$$

Si la rotura es crítica: $\sigma_s = \sigma'_s = f_{yd}$; $\psi = 0.688$ para $\epsilon_c = \epsilon_{cu}$ y la profundidad de la fibra neutra es:

$$x = \frac{d}{1 + \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}}} \approx 0.65d$$

con lo cual:

$$f_c = \frac{A_s f_{yd} - A'_s f_{yd}}{0.688 b d} \left(1 + \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}} \right)$$

$$f_{cd} = 1.453 (\rho - \rho') f_{yd} \left(1 + \frac{\epsilon_y}{\epsilon_{cu}} \right)$$

De cara a establecer un criterio práctico, conviene utilizar los valores usuales por el lado de la seguridad, esto es:

$$f_{yd} \approx 500/\gamma_s = 435 \text{ MPa}; \quad f_{cd} = f_{cj} / \gamma_c$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0035 \text{ (aunque para hormigones jóvenes se sabe que es algo superior)}$$

lo que conduce a la fórmula que se propone a continuación:

$$f_{cj} \geq 1500(\rho - \rho') \quad (f_{cj} \text{ en MPa}) \quad (7.1)$$

en donde f_{cj} es la resistencia del hormigón a la edad de carga (j días) y ρ y ρ' son las cuantías geométricas de armadura de tracción y de compresión, respectivamente. En piezas con sección en T, I, II o cajón, se tomará para b el ancho de la cabeza comprimida.

La resistencia f_{cj} , obtenida según (7.1), es la necesaria para garantizar que prácticamente la sección alcanza su momento último para el que fue proyectada. Con ello se evita tener que verificar la resistencia a flexión de cada sección crítica frente a los esfuerzos solicitantes en el momento del descimbrado. Esto es, la condición $S_d \leq R_u$ queda automáticamente satisfecha.

7.2.- ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE AGOTAMIENTO POR ESFUERZO CORTANTE

La experimentación realizada ha permitido concluir que, en principio, las fórmulas establecidas en la Instrucción EH-91 para la verificación de este estado límite para hormigones maduros parecen extrapolables al caso de hormigones jóvenes, utilizando la resistencia f_{cj} correspondiente al momento del descimbrado:

$$V_d \leq V_{u1} = 0.30 f_{cd} b d (1 + \cotg \alpha)$$

$$V_d \leq V_{u2} = f_{cv} b d + 0.9d A_{st} f_{td} (\sen \alpha + \cos \alpha)$$

Sin perjuicio de que en casos especiales se deban verificar estas ecuaciones en todas las secciones críticas, en el momento del descimbrado cuando el hormigón es muy joven (y por tanto f_{cj} es muy reducido), la rotura más preocupante es la debida a las compresiones oblicuas del alma (véase *Figura 7.2*), que además es de carácter frágil. Por tanto, conviene establecer como criterio general que en el momento del descimbrado la resistencia a compresión del hormigón f_{cj} supere el umbral para el que la rotura deja de ser frágil. En este caso, del mismo modo que en flexión, se tiene garantizada la satisfacción del estado límite puesto que, además de cumplirse la condición de rotura cortante-compresión, se satisface casi con seguridad la de cortante-tracción ya que V_{su} es constante e independiente de f_c .

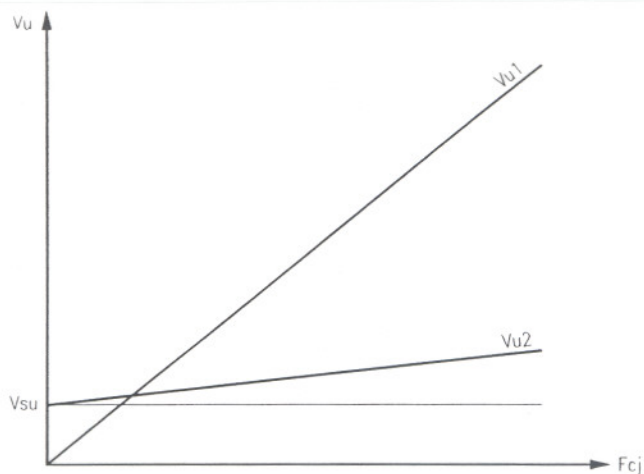


Figura 7.2.- Relación entre el cortante último (V_{u1} y V_{u2}) y la resistencia a compresión del hormigón

Así pues, la ecuación a establecer es:

$$V_{u1} \geq V_{u2} = V_{cu} + V_{su}$$

y para el caso de cercos o estribos verticales ($\alpha = 90^\circ$):

$$0.30f_{cd} bd \geq f_{cv} bd + 0.9A_{st}df_{td}$$

Para simplificar, quedando del lado de la seguridad, puede establecerse que $f_{cv} = 0.04 f_{cd}$ con lo que la ecuación anterior queda:

$$0.26f_{cd}bd \geq 0.9f_{td}dA_{st}$$

o bien

$$f_{cj} \geq 5 \frac{A_{st} f_{td}}{b} \quad (7.2)$$

Expresión aplicable a vigas y losas con armadura transversal.

7.3.- ESTADO LÍMITE ÚLTIMO DE ANCLAJE

La longitud de anclaje de las armaduras se dimensiona con el criterio de que, bajo los esfuerzos de cálculo, se produzca antes el agotamiento del acero que la rotura del anclaje. Para el caso de anclajes por prolongación recta, que son los más usuales, la longitud de anclaje necesaria puede determinarse a través de la ecuación:

$$l_b = \frac{\phi f_{yd}}{4 \tau_{bm}}$$

donde τ_{bm} es la tensión media de adherencia que se puede desarrollar entre la barra y el hormigón que depende de la resistencia del hormigón, del tipo de barra (lisa o corrugada) y del diámetro de la misma; ϕ es el diámetro de la barra y f_{yd} es la resistencia de cálculo del acero.

La tensión media de adherencia se calcula (según la EH-91) a través de las expresiones:

$$\tau_{bm} = \frac{\tau_{bu}}{1.6} \sqrt[3]{\left(\frac{f_{ck}}{225}\right)^2} \quad \text{para barras corrugadas} \quad (7.3)$$

$$\tau_{bm} = \frac{1.2}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck}} \quad \text{para barras lisas}$$

Para barras de diámetro entre 8 y 32 mm: $\tau_{bu} = 130 - 1.9 \phi$ (con τ_{bu} en Kg/cm^2 y ϕ en mm).

Al descimbrar una pieza a temprana edad, las tensiones de adherencia que pueden desarrollarse son menores que las que se desarrollarían a los 28 días al serlo también f_{cj} . Sin embargo, si las cargas que actúan en el momento del descimbrado son también menores, es posible que la longitud de anclaje definida en el proyecto sea válida. Llamando G a las cargas que actúan al descimbrar y Q a las cargas posteriores ($G + Q =$ Carga total), la tensión mayorada generada en la armadura de tracción en el momento del descimbrado puede aproximarse por:

$$\sigma_s = f_{yd} \frac{G}{G+Q}$$

La longitud de anclaje necesaria sería:

$$l'_b = \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{\tau_{bm}} \frac{G}{G+Q} \quad (\text{a los } j \text{ días})$$

$$l_b = \frac{\phi}{4} \frac{f_{yd}}{\tau_{bm}} \quad (\text{a los 28 días})$$

Estableciendo la inequación $l'_b \leq l_b$ entre ambas longitudes se tiene:

$$\tau_{bm} \leq \tau_{bm} \frac{G}{G+Q}$$

o bien, teniendo en cuenta la ecuación (7.3) y suponiendo para τ_{bu} el valor más desfavorable (correspondiente a $\phi = 32$ mm):

$$f_{cj} \geq f_{c,28} \left(\frac{G}{G+Q} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7.4)$$

Ecuación que garantiza la satisfacción del E.L.U. de anclaje en el momento del descimbrado para piezas con diámetros inferiores a 32 mm.

7.4.- ESTADOS LÍMITES DE UTILIZACIÓN

Normalmente las estructuras de hormigón armado se dimensionan con el criterio de satisfacer los estados límites últimos, comprobando posteriormente que los estados límites de utilización (E.L.S.) se satisfacen. Por ello, dado que en los E.L.S. la inequación $S_d \leq R_u$ no se satisface estrictamente, no es posible llegar a criterios objetivos como los alcanzados en los E.L.U. que se han visto. Sin embargo, como planteamiento preliminar se propone la metodología que a continuación se expone.

7.4.1.- Estado límite de deformabilidad

De los resultados experimentales se extrajo como conclusión la necesidad de evaluar la deformabilidad con métodos más precisos que los de la EH-91, para el caso de descimbrado a tempranas edades. Ello es debido a que la fluencia y la retracción del hormigón dan lugar a flechas diferidas importantes, siendo necesarios métodos que expliciten el valor del coeficiente de fluencia y la retracción.

La flecha instantánea (a_{ins}) puede expresarse como λ veces la flecha elástica (a_{el}), siendo λ un factor que introduce el efecto de la fisuración, el cual adopta diversas expresiones según se utilice la fórmula de Branson, el método del Eurocódigo EC-2, o la propuesta por otros autores, pero siempre depende, básicamente, de la relación entre el momento flector de fisuración y el de servicio y de la relación entre las rigideces elástica y totalmente fisurada.

La flecha diferida, que es la más preocupante en el caso de un descimbrado a tempranas edades, puede considerarse proporcional a la instantánea. De acuerdo con la propuesta de A. R. Marí [1994] (véase Capítulo 2), se puede aproximar por:

$$\text{Flecha debida a fluencia} \quad a_{\varphi} = a_{ins} \frac{x}{d} \varphi \frac{1}{1 + 4n\rho'}$$

$$\text{Flecha debida a retracción} \quad a_{cs} = \frac{\varepsilon_{cs}}{d} \frac{l^2}{8} \frac{1}{1 + 4n\rho'} k_b$$

Para simplificar, por una parte conviene agrupar la flecha de retracción y la fluencia y, por otra, para quedar del lado de la seguridad pueden hacerse las siguientes hipótesis:

$$x/d \approx 0.5 \quad (\text{normalmente oscila entre 0.25 y 0.40, según la cuantía de armadura})$$

$\rho' = 0$ (se desprecia el efecto restrictivo de la armadura comprimida)

De esta forma, la flecha debida a cargas permanentes se puede expresar por:

$$a_{tot} = a_{ins}(1 + 0.5 \varphi) = \lambda a_{el}(1 + 0.5 \varphi)$$

El problema del descimbrado prematuro surge cuando la estructura está dimensionada estrictamente por flecha bajo carga a los 28 días, pues entonces se superará el estado límite si se descimbra antes. Sin embargo, es muy posible que al dimensionar en rotura la estructura vaya holgada en servicio, en cuyo caso descimbrar antes puede ser aceptable con criterios de deformabilidad. Designando por a_j la flecha a largo plazo generada por las cargas permanentes aplicadas a los j días y por a_{adm} la flecha admisible debida a carga permanente se tiene:

$$a_{28} = K \frac{Gl^4}{E_{c,28}I} \lambda_{28}(1 + 0.50 \varphi_{28}) < a_{adm} \quad (7.5)$$

$$a_j = K \frac{Gl^4}{E_{cj}I} \lambda_j(1 + 0.50 \varphi_j) = a_{adm} = \frac{a_{adm}}{a_{28}} a_{28} \quad (7.6)$$

donde K es un coeficiente adimensional que depende de las condiciones de vinculación de la pieza ($K = 5/384$ para piezas biapoyadas).

Sustituyendo a_{28} de la expresión (7.6) por el valor dado en (7.5) se deduce:

$$E_{cj} = E_{c,28} \frac{\lambda_j}{\lambda_{28}} \frac{1 + 0.5 \varphi_j}{1 + 0.5 \varphi_{28}} \frac{a_{28}}{a_{adm}}$$

La variación de λ con el tiempo, para el mismo nivel de carga G , depende de la edad del hormigón a través del momento de fisuración (o de la resistencia a tracción). Para una serie de casos estudiados, con evoluciones normales de f_{ct} , λ varía entre 1 para $j = 28$ días y 1.3 para edades muy tempranas de carga. La fórmula anterior puede expresarse así:

$$E_{cj} = E_{c,28} f(j) \frac{a_{28}}{a_{adm}} \quad (7.7)$$

donde $f(j)$ es una función dependiente de la edad del hormigón y que se presenta en la curva de la *Figura 7.3* y en la *Tabla 7.1*.

Esta expresión permite, conocida la flecha debida a la carga permanente

aplicada a los 28 días, calcular el módulo de deformación necesario a la edad del descimbrado para garantizar que la flecha a largo plazo, debida a la carga permanente, no supere el valor admisible. Como se observa, este criterio no es independiente del valor absoluto de las solicitaciones y requiere el conocimiento de la flecha a_{28} y de la flecha admisible que, para cargas permanentes podría considerarse $l/500$.

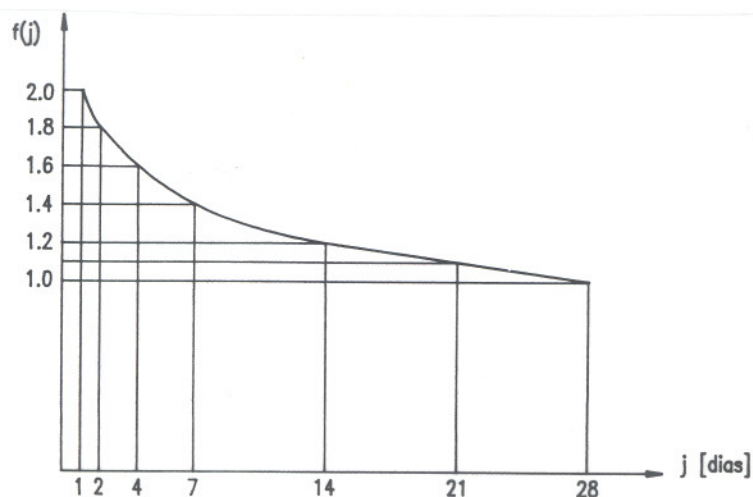


Figura 7.3.- Evolución de la función $f(j)$ en función de la edad de carga.

Tabla 7.1.- Valores de la función $f(j)$.

j [días]	A_j / A_{28}	φ_j	$f(j)$
1	1.30	5.0	2.0
2	1.25	4.5	1.8
4	1.20	4.0	1.6
7	1.15	3.5	1.4
14	1.10	3.0	1.2
21	1.05	2.7	1.1
28	1.00	2.5	1.0

6.4.2.- Estado límite de fisuración

En referencia a este estado límite, dos son los aspectos en que puede afectar un descimbrado temprano. Por una parte, la baja resistencia a tracción de un hormigón joven afecta al momento de fisuración, el cual también es reducido. Por ello, la tensión en la armadura, para un nivel de carga fijo, es mayor cuanto menor es la edad del hormigón y el ancho de fisura aumenta.

Establecer un criterio objetivo para este estado límite es complicado, como lo son las expresiones del ancho de fisura. En tal caso se recomienda calcular el ancho de fisura considerando el momento de fisuración correspondiente al instante del descimbrado y el momento flector de servicio debido a la carga total y comparar con el ancho de fisura máximo permitido ($w_{k,j} \leq w_{lim}$). Esta inecuación puede permitir obtener el valor de f_{cj} necesario para poder descimbrar.

Por otra parte, debido a la reducida resistencia a compresión del hormigón, las tensiones de compresión deben limitarse ya que, de lo contrario, podrían producir microfisuración longitudinal del hormigón. Las repercusiones de ello pueden ser, desde generar unos niveles de fluencia muy superiores a los esperados (se podría rebasar el umbral de fluencia lineal) hasta afectar negativamente a la capacidad resistente del hormigón a largo plazo por haberse producido un daño irreparable en el mismo.

Como consecuencia, se establece como criterio limitar las tensiones de compresión σ_{cj} a los j días a una fracción de la resistencia del hormigón a dicha edad:

$$\sigma_{cj} = k f_{cj}; \quad k < 1 \quad (\text{generalmente } k = 0.4)$$

Normalmente las piezas de hormigón trabajan fisuradas a flexión. En tales secciones, que es donde el hormigón sufre mayores tensiones, la tensión σ_c puede expresarse, para sección rectangular o asimilable (vigas en T o doble T si la fibra neutra cae en la cabeza de compresiones, que suele ser lo más normal) del siguiente modo:

$$\sigma_{cj} \approx \frac{2M_j}{bx_j \left(d - \frac{x_j}{3} \right)} \leq k f_{cj}$$

Si se considera el descimbrado cuando el hormigón ha alcanzado la resistencia especificada f_{ck} :

$$\sigma_{ck} \approx \frac{2M_k}{bx_k \left(d - \frac{x_k}{3} \right)} \leq k f_{ck}$$

donde: x_j y x_k son las profundidades de la fibra neutra al descimbrar y cuando el hormigón adquiere la resistencia de proyecto, respectivamente.

M_j y M_k son el momento flector al descimbrar y el momento total.

Dividiendo miembro a miembro y considerando los momentos proporcionales a las cargas se obtiene:

$$f_{cj} \geq f_{ck} \frac{G}{G+Q} \frac{x_k \left(d - \frac{x_k}{3} \right)}{x_j \left(d - \frac{x_j}{3} \right)} = f_{ck} \frac{G}{G+Q} \alpha$$

El factor α depende de la cuantía de armaduras y del coeficiente de equivalencia $n = E_s / E_c$, el cual varía a lo largo del tiempo. Un simple estudio con secciones rectangulares, variando cuantías desde $\rho = 0.2\%$ hasta $\rho = 2\%$, con $n = 8$ y $n = 12$ demuestra que α varía entre 0.84 y 0.89. Por tanto, un valor conservador puede ser $\alpha = 1$, el cual satisface la relación anterior para $j = k$ si todas las cargas aparecen en el momento del descimbrado.

Consecuentemente, puede obtenerse la siguiente expresión de la resistencia a compresión a los j días para evitar la microfisuración longitudinal por compresiones excesivas en el hormigón:

$$f_{cj} = f_{c,28} \frac{G}{G+Q} \quad (7.8)$$

donde: G es la carga en el momento de descimbrar y
 $G + Q$ es la carga total

Esta relación siempre es más restrictiva que la correspondiente al anclaje (7.4).

7.5.- RESUMEN DE LOS CRITERIOS PROPUESTOS

Como síntesis de los planteamientos expuestos anteriormente, en la *Tabla 7.2* se resumen los criterios prácticos que se proponen para el establecimiento de plazos de descimbrado.

7.6.- EJEMPLO DE APLICACIÓN. CONCLUSIONES

A continuación se presenta el resultado obtenido de la aplicación de los criterios propuestos al caso de las vigas ensayadas en el presente trabajo. Los datos relativos a las características del hormigón, edad y armado de las vigas etc. pueden encontrarse en los capítulos anteriores.

Tabla 7.2.- Criterios propuestos para establecer plazos de descimbrado.

ESTADO LÍMITE	CONDICIÓN A CUMPLIR
FLEXIÓN (f_{cj} en MPa)	$f_{cj} \geq 1500(\rho - \rho')$
CORTANTE	$f_{cj} \geq 5 \frac{A_{st} f_{td}}{b}$
ANCLAJE	$f_{cj} \geq f_{c,28} \left(\frac{G}{G+Q} \right)^{\frac{3}{2}}$
DEFORMABILIDAD	$E_{cj} = E_{c,28} f(j) \frac{a_{28}}{a_{adm}}$
FISURACIÓN	$f_{cj} = f_{c,28} \frac{G}{G+Q}$

FLEXIÓN:

$$f_{cj} \geq 1500(\rho - \rho')$$

$$f_{cj} \geq 1500(0.0111 - 0.0029) = 12.4 \text{ MPa}$$

CORTANTE:

$$f_{cj} \geq 5 \frac{A_{st} f_{td}}{b}$$

$$f_{cj} \geq 5 \frac{2.565 \cdot 10^{-4} \cdot 500}{0.20} = 3.2 \text{ MPa}$$

ANCLAJE:

$$f_{cj} \geq f_{c,28} \left(\frac{G}{G+Q} \right)^{\frac{3}{2}}$$

En la *Tabla 7.3* se presentan los resultados obtenidos para las 8 vigas ensayadas a fluencia.

Tabla 7.3.- Aplicación de la condición de anclaje a las vigas "C".

VIGA	C11	C12	C13	C14	C21	C22	C23	C24
G/G+Q	0.48	0.52	0.52	0.65	0.38	0.47	0.52	0.59
f _{cj} [MPa]	6.6	7.6	7.6	10.5	4.7	6.5	7.5	9.2

DEFORMABILIDAD:

$$E_{cj} = E_{c,28} f(j) \frac{a_{28}}{a_{adm}}$$

En la *Tabla 7.4* se presentan los resultados obtenidos para las 8 vigas ensayadas a fluencia. La flecha admisible se ha limitado a $L / 300 = 12 \text{ mm}$ ya que, en este caso, toda la carga es permanente. La flecha a largo plazo correspondiente a la edad de carga de 28 días ha sido determinada según el procedimiento de la Instrucción EH-91.

Tabla 7.4.- Aplicación de la condición de deformabilidad a las vigas "C".

VIGA	C11	C12	C13	C14	C21	C22	C23	C24
a ₂₈ / a _{adm}	0.625	0.625	0.625	0.625	0.83	0.83	0.83	0.83
f(j)	1.8	1.6	1.4	1.0	1.8	1.6	1.4	1.0
E _{cj} / E _{c,28}	1.12	1.0	0.87	0.625	1.34	1.24	1.064	0.76

FISURACIÓN:

$$f_{cj} = f_{c,28} \frac{G}{G+Q}$$

En la *Tabla 7.5* se presentan los resultados obtenidos para las 8 vigas ensayadas a fluencia.

Tabla 7.5.- Aplicación de la condición de fisuración a las vigas "C".

VIGA	C11	C12	C13	C14	C21	C22	C23	C24
G/G+Q	0.48	0.52	0.52	0.65	0.38	0.47	0.52	0.59
f_{cj} [MPa]	9.6	10.4	10.4	13	7.6	9.4	10.4	11.8

CONCLUSIONES:

En cuanto a la resistencia del hormigón, se observa que el estado límite de flexión es el que exige mayor f_{cj} (12.4 MPa), resultando ser un 62% de la resistencia especificada a los 28 días, excepto en el caso de la viga C14 (descimbrada a los 28 días) en que la condición relativa a fisuración exige una resistencia algo superior (13 MPa).

Sin embargo, en el caso de deformabilidad se observa que para satisfacer el criterio de que la flecha total no supere la limitación de $L/300$ sólo resulta factible descimbrar a partir de los 7 días en la 1ª serie y más adelante en la 2ª, ya que el módulo de deformación requerido no se puede obtener a edades más tempranas.

Este es un caso poco usual pues toda la carga es permanente y fue definida para producir el máximo nivel de tensiones admisibles en servicio ($\sigma_c \approx 0.4 f_{cj}$) en el momento del descimbrado. Por ello las flechas diferidas e instantáneas son muy altas. No obstante, se pone de manifiesto que la resistencia del hormigón no es la única variable a considerar y que, en casos de descimbrado a muy temprana edad o con cargas importantes, es necesario verificar el E.L. de deformabilidad.

Por último, cabe destacar que el criterio establecido para evitar una excesiva microfisuración por compresión resulta ser más restrictivo que la condición de anclaje.

Capítulo 8

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El objetivo esencial de este trabajo es el estudio del comportamiento de vigas de hormigón armado descimbradas a tempranas edades y la propuesta de criterios para el establecimiento de plazos de descimbrado. Se trata, por tanto de una investigación planteada a nivel de estructura en la que, inevitablemente, intervienen las propiedades del hormigón como material y su evolución en el tiempo, pero cuyo estudio no constituye un objetivo primordial de este trabajo.

A continuación se presentan las conclusiones más relevantes extraídas de los estudios experimentales y analíticos realizados, directamente relacionadas con los objetivos planteados. Finalizando el capítulo, se enumeran los aspectos pendientes de estudio, que configuran las líneas abiertas de cara a futuras investigaciones.

8.1.- CONCLUSIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO FRENTE A LOS ESTADOS LÍMITES ÚLTIMOS.

- 1) Las fórmulas propuestas por la Instrucción EH-91 para el dimensionado a flexión y cortante se han mostrado válidas para predecir el comportamiento a tempranas edades, adoptando para el hormigón las características mecánicas del mismo en el momento del descimbrado.
- 2) En relación a las vigas "R", sometidas a ensayo de rotura por flexión inmediatamente después del descimbrado, la edad del hormigón no ha provocado, para las vigas y edades ensayadas, un cambio en la forma de rotura, la cual, en todos los casos, fue dúctil.
- 3) En tales vigas, la edad del hormigón apenas ha influenciado la capacidad portante a flexión, aunque sí el nivel de ductilidad de la pieza, el cual es mayor a mayor edad. La carga última medida experimentalmente coincidió sensiblemente en todos los casos con las predicciones analíticas realizadas.
- 4) En relación a las vigas "C", ensayadas a fluencia y llevadas posteriormente a rotura, no se ha detectado influencia de la existencia

de cargas permanentes aplicadas previamente ni de la edad de aplicación de las mismas, tanto en la forma de rotura como en la capacidad resistente a flexión a largo plazo.

- 5) En todas las vigas ensayadas a cortante, los cercos que atravesaban la grieta principal han alcanzado su límite elástico, mostrando por tanto su efectividad de acuerdo con los criterios de proyecto.
- 6) La edad del hormigón afectó moderadamente al cortante último, que en todos los casos fue superior a la contribución de la armadura transversal e incluso al predicho analíticamente.
- 7) Si se acepta la fórmula aditiva para la predicción de la resistencia frente a la rotura por cortante-tracción, la contribución del hormigón V_{cu} deducida de la experimentación resulta ser superior a la que se obtendría utilizando la resistencia del hormigón f_{cj} en el momento del descimbrado. Ello es debido, probablemente, a que V_{cu} depende más bien de la resistencia a tracción y ésta evoluciona a tempranas edades de forma diferente a la resistencia a compresión, que es la que interviene en la formulación.
- 8) No se ha detectado rotura por agotamiento de las bielas comprimidas de hormigón en ninguna de las vigas ensayadas a cortante.
- 9) El esfuerzo cortante último resistido por las vigas precargadas a fluencia fue siempre inferior al cortante último resistido por la viga R24, llevada a rotura tras ser descimbrada a los 28 días. Ello evidencia que la prefisuración por flexión disminuye la resistencia a cortante a largo plazo.
- 10) No se detectó el agotamiento del anclaje en ninguna de las vigas ensayadas. Sólo en las vigas ensayadas a cortante a las edades de 2 y 4 días se observó un pequeño deslizamiento de la armadura traccionada para niveles de carga cercanos a la rotura.

8.1.- CONCLUSIONES RELATIVAS AL COMPORTAMIENTO FRENTE A LOS ESTADOS LÍMITES DE SERVICIO.

- 1) La separación de fisuras medida experimentalmente, así como el ancho de fisuras deducido indirectamente de los resultados experimentales, concuerdan satisfactoriamente con las obtenidas mediante la formulación propuesta por la Instrucción EH-91 para todas las edades de carga. Por otra parte, la separación entre fisuras no parece depender de la edad del hormigón al cargar.

- 2) En las vigas "R", para un mismo nivel de carga, las flechas instantáneas fueron mayores cuanto menor era la edad de las vigas, constatándose la influencia de la edad del hormigón en la deformabilidad instantánea.
- 3) En relación a las vigas "C", tanto el nivel de prefisuración como el efecto de la fluencia del hormigón contribuyen a aumentar la deformabilidad instantánea a largo plazo.
- 4) La relación flecha diferida/flecha instantánea (factor de flecha) es mayor cuanto menor es la edad de carga de la viga, lo cual pone en evidencia la influencia de la edad del hormigón en la deformabilidad diferida.
- 5) El factor de flecha ha resultado ser, en todas las vigas ensayadas, bastante inferior al coeficiente de fluencia del hormigón obtenido en los ensayos de fluencia sobre probetas.
- 6) Las deformaciones por fluencia y retracción obtenidas en los ensayos sobre probetas son sensiblemente superiores a la deformación medida en las fibras de hormigón más comprimidas de las vigas, a pesar de ser similares los niveles de tensión en vigas y probetas y encontrarse en condiciones ambientales idénticas. El factor de forma, que condiciona la superficie de intercambio hidráulico con el ambiente parece ser determinante en dichos fenómenos. Igualmente, parece importante el efecto del gradiente de tensiones existente en la viga flectada en el desarrollo de la fluencia. Ello cuestiona, en nuestra opinión, la validez de la extrapolación de los resultados de ensayos de fluencia sobre probetas a estructuras reales.
- 7) La predicción de la deformación unitaria de retracción, efectuada mediante el procedimiento propuesto por la Instrucción EH-91 ha dado resultados mucho más bajos que los experimentales. También la predicción del coeficiente de fluencia según la EH-91 ha proporcionado resultados muy por debajo de los experimentales.
- 8) El modelo BP-KX simplificado, propuesto por Bažant, ha proporcionado resultados muy satisfactorios en cuanto a la retracción y suficientemente aceptables en cuanto al coeficiente de fluencia.
- 9) Se ha comprobado que existe una buena correlación entre los factores de flecha y curvatura para todas las vigas ensayadas. Ello implica que, en el caso de vigas biapoyadas en las que la sección más solicitada a flexión está fisurada bajo las cargas permanentes, es posible extrapolar los resultados de un análisis seccional a nivel pieza.

- 10) Se ha constatado experimentalmente que en los ensayos de fluencia en vigas fisuradas bajo carga permanente, la deformación de la armadura traccionada se mantiene casi constante en el tiempo. Ello permite una importante simplificación en el análisis seccional en el tiempo.
- 11) Los métodos simplificados usuales para la estimación de flechas diferidas, propugnados por las normativas vigentes, predicen flechas diferidas sensiblemente inferiores a las medidas experimentalmente para edades tempranas de carga y razonables para carga a los 28 días. Ello evidencia la necesidad de que la formulación utilizada para predecir la flecha contemple, directa o indirectamente, la edad del hormigón y otros parámetros medioambientales, geométricos o de carga que afectan de manera definitiva a la reología del hormigón. El método propuesto por Marí [1994], que lleva explícitos el coeficiente de fluencia del hormigón φ y la deformación unitaria de retracción ε_{cs} ha resultado ser el más adecuado para la predicción de flechas diferidas a tempranas edades.

8.3.- CONCLUSIONES RELATIVAS A PLAZOS DE DESCIMBRADO

- 1) Los estudios experimentales realizados han permitido comprobar si los criterios y fórmulas de proyecto, propugnados en las normas vigentes, son válidos o no para predecir el comportamiento de estructuras de hormigón a tempranas edades, habiéndose identificado, en su caso, métodos alternativos más adecuados. En base a ello se ha planteado una metodología orientada a determinar las propiedades mecánicas del hormigón en el momento del descimbrado que garanticen la satisfacción de los estados límites últimos y de servicio en dicho instante y a lo largo de la vida útil de la estructura.
- 2) En cuanto a los estados límites últimos de agotamiento por flexión y cortante, se han deducido expresiones para la resistencia mínima del hormigón que evitaría la rotura frágil y, a su vez, garantiza prácticamente la satisfacción de dichos estados límites. En dichas expresiones la resistencia mínima del hormigón depende de las cuantías geométricas de armadura longitudinal y transversal, respectivamente.
- 3) El estado límite último de anclaje y el estado límite de microfisuración por compresión quedan satisfechos a través de una resistencia en el momento de descimbrar, proporcional a la resistencia de proyecto a través de un factor dependiente de la relación entre la carga G al descimbrar y la carga total $G+Q$.
- 4) El estado límite de deformación puede resultar mucho más restrictivo a la hora de determinar plazos de descimbrado que los demás estados

límites, a pesar de que el módulo de deformación del hormigón evoluciona más rápidamente que la resistencia a compresión. Ello es debido a que en piezas flectadas y fisuradas, cargadas a tempranas edades, la fluencia del hormigón puede resultar muy alta e incluso superar el umbral de tensiones para el que la fluencia es lineal. Se recomienda, por tanto, que este estado límite sea verificado cuando se prevean descimbrados a edades muy jóvenes del hormigón.

- 5) Los criterios desarrollados para el descimbrado se han aplicado al caso de las vigas ensayadas en el laboratorio, habiendo proporcionado resultados razonables. Los tipos de rotura detectados han coincidido con los que corresponderían a las resistencias del hormigón a la edad de ensayo. Asimismo, el criterio de deformabilidad se ha mostrado adecuado en el sentido de identificar descimbrados prematuros que darían lugar a flechas excesivas.

8.4.- LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

El trabajo realizado ha permitido identificar aspectos todavía no resueltos y ha abierto una línea de futuras investigaciones, que se puede resumir en los siguientes puntos:

- Convendría realizar trabajos experimentales, similares a los aquí descritos, sobre jácenas planas. Ello permitiría representar de forma más fidedigna el tipo de estructura de edificación más común en nuestro país, susceptible de ser perjudicada por descimbrados prematuros. En ellas puede producirse más fácilmente tanto una rotura frágil como una deformabilidad excesiva.
- Sería deseable, asimismo, estudiar vigas continuas, en las que las zonas de momentos negativos son especialmente delicadas y cuya deformabilidad es, sin embargo, menos problemática. Ensayos a más tempranas edades podrían además dar luz a comportamientos diferentes de los observados en la experimentación realizada (por ejemplo, diferentes formas de rotura según la edad).
- Dado que la reducida resistencia del hormigón a tempranas edades puede dar lugar a roturas frágiles, el estudio de una posible rotura por punzonamiento al descimbrar prematuramente resulta un campo de evidente interés.
- Los criterios establecidos para el descimbrado deben considerarse como una primera aproximación que debe ser verificada y contrastada tanto con resultados experimentales de laboratorio o de obra como con simulaciones numéricas. Por otra parte convendría ampliar y mejorar

dichos criterios para el caso de procesos constructivos reales de edificación.

- Hace falta estudiar con más profundidad la fluencia del hormigón a muy temprana edad, investigando los efectos del nivel de carga y del tipo de sollicitación (flexión o compresión).
- Las fórmulas propuestas por la normativa española para la determinación de la tensión última de adherencia (τ_{bu}) se basan en ensayos "beam test" realizados a los 28 días. Se ignora, por tanto, la adecuación de dichas fórmulas para hormigones jóvenes, lo cual debería ser investigado.