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

RESUMEN

El presente trabajo constituye un estudio experimental sobre el comportamiento de vigas de hormigón armado descimbradas a tempranas edades y su contrastación con predicciones analíticas.

El objetivo final de la investigación es el establecimiento de criterios prácticos para determinar plazos de desencofrado que garanticen la seguridad y funcionalidad de las estructuras en todo momento de su vida útil. A tal fin se ha planteado como objetivo previo determinar la influencia de la edad del hormigón en el momento del descimbrado y puesta en cargas de las vigas, sobre su capacidad resistente y deformabilidad, tanto a corto como a largo plazo.

Se han ensayado dos series de 8 vigas biapoyadas de 3,60 *m* de luz y sección rectangular de 20x30 *cm*, dimensionadas para resistir una carga total de servicio de 20 *kN/m*, utilizando como valores de proyecto hormigón H-200 y acero AEH-500N. En cada serie se han realizado dos tipos de ensayos: *Fluencia y Rotura.*

Los ensayos de fluencia estaban orientados al estudio de la deformabilidad diferida de las vigas en función de la edad del hormigón en el momento de carga. Se ha detectado un nivel de deformación diferida muy elevado, especialmente a tempranas edades. Asimismo se han calibrado diversos métodos de cálculo de flechas concluyendo la necesidad de utilizar expresiones en las que aparezcan de forma explícita los parámetros más importantes que afectan a la retracción y a la fluencia del hormigón.

Los ensayos a rotura estaban orientados al estudio de la capacidad resistente de las vigas en función de la edad del hormigón en el instante de puesta en carga. A su vez, estos ensayos han servido para estudiar la deformabilidad instantánea bajo carga creciente. Se ha concluido que a partir de los dos días, que es la edad mínima ensayada, la edad del hormigón apenas influye en la capacidad resistente a flexión pero sí, de forma moderada, en la de cortante. Se ha observado, como era de esperar, una mayor deformabilidad instantánea en las vigas de menor edad. No se han detectado cambios de forma de rotura en función de la edad del hormigón ni roturas frágiles por flexión, así como tampoco agotamiento de la adherencia o del anclaje.

Las vigas ensayadas a fluencia han sido llevadas a rotura con el fin de determinar la influencia de una carga prematura, de carácter permanente, en la capacidad portante a largo plazo. La carga prematura no ha mostrado influencia alguna en la capacidad portante a flexión a largo plazo, pero sí en la resistencia a cortante. El nivel de prefisuración, y sobre todo la fluencia producida por la precarga mantenida, contribuyen a aumentar la deformabilidad instantánea a largo plazo.

Mediante la comparación de los resultados experimentales con predicciones analíticas se ha verificado la validez de las formulaciones de dimensionado frente a estados límites últimos, propuestas en la normativa vigente, para predecir el comportamiento de hormigones jóvenes. Este hecho ha permitido establecer criterios de descimbrado que garantizan la satisfacción de dichos estados límites. Igualmente se ha detectado la importancia de la deformabilidad diferida a la hora de plantear descimbrados prematuros.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE BEHAVIOUR OF R.C. BEAMS UNSHORED AT EARLY AGES

Summary

The present work is an experimental study on the behaviour of reinforced concrete beams loaded at early ages and their contrast with analytical predictions.

The final aim of the research is to establish practical criteria for determining times for removal of shores that ensure the safety and serviceability of the structures throughout therir service life. This objective was achieved through the study of the influence of the concrete age at the time of demolding and loading the beams on their short- and long-term strenth and deformability.

Two series of 8 simply supported reinforced concrete beams of 3.60 m span length have been tested. All the beams had a rectangular cross section of 20x30 cm, and were to resist a total service load of 20 kN/m, using as design values H-200 concrete and AEH-500N steel. In each series two types of test were carried out: *Creep* and *Failure*.

Creep test were oriented to study the time dependent deflections in function of the age of loading. A very high level of time dependent deflection was detected, especially at early ages. Different methods for calculating deflections were also calibrated, and the conclusion was reached that it was necessary to use expressions in which the most important parameters affecting the creep and the shrinkage are expressly stated.

Failure test were oriented to study the strength of the beams as a function of the concrete age at loading. These tests also served to study the instantaneous deformability under increasing load. It was concluded that after two days, which is the minimun age tested, the age of the concrete has hardly any influence on flexural strength, but it does have a moderate influence on the shear strength. As was expected, a greater instantaneous deformability was observed in the beams of less age. The age of concrete did not change the failure mode for any of the two series. The tests did not show brittle flexural failure, bond failure or failure of the anchorage.

The beams tested for creep were taken to failure test in order to determine the influence of a permanent load on the long-term strength capacity. The premature load showed no influence on the long-term flexural strength, but it did show an influence on the shear strength. The pre-cracking level and above all the creep produced by the permanent pre-load, contribute to increasing the instantaneous deformability.

The experimental results have been compared with analytical predictions based on current desing codes. It has been found that the desing formulae developed for mature concrete can be used with reasonable accuracy to predict the flexural and shear strength at early ages when using the concrete strength at the age of loading. This has allowed us to establish criteria for unshoring to ensure the satisfaction of serviceability and ultimate limit states at any moment of the structural life. The importance of the time dependent deflections with regard to premature ushoring was also detected.

COMPOSICION DEL TRIBUNAL

Presidente: Roberto Guerra Fontana

Secretario: Javier López- Rey Laurens

Vocales: Jaime Fernandez Gómez
Miguel Angel Fernandez Prada
Pere Roca Fabregat

Agradecimientos

En primer lugar, deseo hacer constar mi gratitud a la Sección de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción por el apoyo desinteresado que me ha ofrecido, sin el cual no habría sido posible la realización de esta tesis.

La tesis que presento forma parte de los trabajos efectuados en el Proyecto de Investigación PB-89/0506, financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación y Ciencia.

La investigación llevada a cabo ha sido posible, además, gracias al apoyo económico y tecnológico brindado por diversas empresas, a quienes deseo expresar mi agradecimiento y el del equipo de investigadores del proyecto.

La empresa constructora Dragados S.A. cedió personal y ofreció material y tecnología para la construcción de las vigas. Mi gratitud se dirige especialmente a los Ingenieros de Caminos Ricardo Álvarez y Rafael Boté quienes, desde sus respectivos cargos, no dudaron en aprobar y ofrecer su apoyo y colaboración desde el inicio de este proyecto, y también al Sr. Arias, el cual aportó su experiencia a pie de obra y estuvo siempre dispuesto a prestarnos todo el apoyo necesario.

La empresa de Control de Calidad INTECASA colaboró llevando a cabo los ensayos normalizados de probetas y desplazando personal hasta el laboratorio para la confección de las mismas. En especial quiero agradecer a Tomás Andreu el interés que mostró en todo momento por este proyecto.

Mi gratitud más sincera a mis directores de tesis, y amigos, Toni y Paco. Con ellos he iniciado un camino en el campo de la investigación que es mi deseo continuar. Con su actitud me han permitido aprender y aprovechar lo mejor de cada uno, que no es poco.

Agradezco también el apoyo incondicional que me han prestado tanto el personal laboral del Laboratorio de Tecnología de Estucturas, Miguel, Carlos y Camilo, como los directores del mismo, Lluís y Ravindra. Sin duda a ellos debo una buena parte del éxito de la experimentación realizada.

A mis amigos y compañeros de la Escuela Universitaria Politécnica de Barcelona (Arquitectura Técnica), que no voy a nombrar por ser muchos, les agradezco el haberme alentado en todo momento y su ofrecimiento a colaborar en lo que hiciera falta. En especial agradezco al equipo de profesores de las asignaturas Estructuras I y Estructuras II, Ermenegild, Roberto, Rafael, Gemma, Carlos, Jaime y José Mª el haberme ayudado a compaginar la elaboración de esta tesis con mi actividad docente, sustituyéndome cuando los ensayos lo han requerido y descargándome de las tareas relacionadas con la docencia durante estos últimos meses.

También deseo expresar mi gratitud a las personas que integran la sección de Tecnología de Estructuras del Departamento de Ingeniería de la Construcción, con quienes he compartido tantas horas y cuya acogida me ha permitido sentirme como en casa desde el primer día: Pere, Juan, Quique y Antonio han estado siempre dispuestos a echarme una mano cuando lo he necesitado; Climent, Paulo, Loli y demás doctorandos han sido unos excelentes compañeros con quienes he podido compartir tanto los buenos como los malos momentos; en Mª Carmen he tenido un apoyo que espero haber sabido corresponder. Se que puedo contar con la amistad de todos ellos y la del resto de profesores que no he citado.

Fernando se merece un apartado especial en esta larga lista de agradecimientos. Él ha puesto en mis manos su experiencia en el campo de la experimentación, transmitiéndome su ilusión y su buen humor. Tanto él como su esposa Marián han sido la mejor compañía que qualquiera hubiera deseado para los largos fines de semana de trabajo y puesto que está muy cercano su traslado a La Coruña quiero expresarles desde aquí mis más sinceros deseos de felicidad y prosperidad.

A mis padres, hermanas, cuñados y sobrinos les agradezco la paciencia y comprensión con que han sabido soportar mis repetidas ausencias. Aunque sólo he necesitado la ayuda de Margarida para componer el documento final, agradezco a todos ellos su ofrecimiento incondicional a ayudarme en lo que hiciera falta.

A todos muchas gracias,

Isabel Serrà Martín

ÍNDICE

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN 1.1

1.1.- Generalidades 1.1

1.2.- Planteamiento y objetivos generales 1.5

1.3.- Contenido de este documento 1.7

Capítulo 2.- ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO 2.1

2.1.- Evolución de las propiedades del hormigón 2.1
2.1.1.- Resistencia a compresión 2.1
2.1.2.- Resistencia a tracción 2.6
2.1.3.- Módulo de deformación 2.7
2.1.4.- Fluencia y Retracción 2.8
2.1.5.- Adherencia acero-hormigón 2.10

2.2.- Métodos analíticos para predecir el comportamiento estructural 2.12
2.2.1.- Capacidad resistente a flexo-compresión 2.13
2.2.2.- Capacidad resistente a cortante 2.16
2.2.3.- Adherencia y anclaje 2.17
2.2.4.- Deformabilidad instantánea 2.17
2.2.5.- Deformabilidad diferida 2.23
2.2.6.- Fisuración por tracción 2.29

2.3.- Estudios experimentales sobre vigas 2.30
2.3.1.- Ensayos a rotura 2.30
2.3.2.- Ensayos a fluencia 2.32

2.4.- Conclusiones. Objetivos del presente trabajo 2.32

Capítulo 3.- PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS 3.1

3.1.- Descripción de las vigas ensayadas 3.1

3.2.- Definición de los tipos de ensayos 3.5

3.3.- Descripción de la instrumentación adoptada 3.9
3.3.1.- Deformaciones del hormigón 3.10
3.3.2.- Deformaciones de la armadura longitudinal 3.12
3.3.3.- Deformaciones de la armadura transversal 3.14
3.3.4.- Carga aplicada durante los ensayos 3.15
3.3.5.- Flechas alcanzadas durante los ensayos 3.16
3.3.6.- Fisuración aparecida durante los ensayos 3.17
3.3.7.- Duración de cada ensayo 3.17
3.3.8.- Deslizamiento de la armadura traccionada 3.18

3.4.- Organización de los ensayos 3.19
3.4.1.- Construcción de las vigas 3.19
3.4.2.- Organización de la instrumentación adoptada 3.20
3.4.3.- Organización de un día de ensayo 3.22
3.4.4.- Calendario global de la experimentación realizada 3.23

Capítulo 4.- DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS 4.1

4.1.- Ensayos de caracterización del hormigón 4.1
4.1.1.- Ensayo de rotura por compresión 4.2
4.1.2.- Ensayo de rotura por tracción indirecta (brasileño) 4.2
4.1.3.- Ensayo de módulo de deformación 4.2
4.1.4.- Ensayo de fluencia 4.4
4.1.5.- Ensayo de retracción 4.6
4.1.6.- Control de la temperatura y humedad ambiente en el laboratorio 4.7

4.2.- Ensayo de vigas a rotura 4.8
4.2.1.- Descripción del sistema de carga 4.8
4.2.2.- Descripción de las operaciones previas al ensayo 4.10
4.2.3.- Descripción del proceso de ensayo 4.11
4.2.4.- Sistema de control del ensayo 4.12

4.3.- Ensayo de vigas a fluencia 4.13
4.3.1.- Descripción del sistema de carga 4.13
4.3.2.- Descripción del proceso de carga 4.15
4.3.3.- Sistema de control del ensayo 4.16

Capítulo 5.- RESULTADOS EXPERIMENTALES 5.1

5.1.- Ensayos de caracterización del hormigón 5.1
5.1.1.- Resistencia a compresión 5.2
5.1.2.- Resistencia a tracción 5.4
5.1.3.- Módulo de deformación 5.5
5.1.4.- Retracción 5.11
5.1.5.- Fluencia 5.11
5.1.6.- Temperatura y humedad ambiente 5.15

5.2.- Ensayos sobre vigas. Tratamiento de los datos adquiridos 5.15
5.2.1.- Deformaciones en compresión y en tracción 5.19
5.2.2.- Deformación de la armadura transversal 5.21
5.2.3.- Flechas 5.23
5.2.4.- Curvaturas 5.23
5.2.5.- Rigidez seccional y rigidez media de la viga 5.24
5.2.6.- Otros parámetros estudiados 5.25

5.3.- Ensayos sobre vigas. Rotura 5.26
5.3.1.- Rotura por flexión 5.26
5.3.2.- Rotura por cortante 5.27
5.3.3.- Adherencia y anclaje 5.30
5.3.4.- Fisuración 5.31
5.3.5.- Deformabilidad 5.33

5.4.- Ensayos sobre vigas. Fluencia 5.42
5.4.1.- Carga aplicada 5.42
5.4.2.- Deformación seccional 5.44
5.4.3.- Flecha diferida 5.47
5.4.4.- Curvatura en la sección central 5.51
5.4.5.- Fisuración 5.53

Capítulo 6.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LAS PREDICCIONES ANALÍTICAS 6.1

6.1.- Evolución de las propiedades del hormigón 6.1
6.1.1.- Resistencia a compresión 6.1
6.1.2.- Resistencia a tracción 6.4
6.1.3.- Módulo de deformación 6.4
6.1.4.- Retracción 6.6
6.1.5.- Fluencia 6.6

6.2.- Comportamiento de las vigas..... 6.7
6.2.1.- Capacidad resistente a flexión..... 6.7
6.2.2.- Capacidad resistente a cortante..... 6.9
6.2.3.- Adherencia y anclaje..... 6.11
6.2.4.- Fisuración..... 6.14
6.2.5.- Deformabilidad instantánea..... 6.16
6.2.6.- Deformabilidad diferida..... 6.18

Capítulo 7.- PROPUESTA DE CRITERIOS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE PLAZOS DE DESCIMBRADO..... 7.1

7.1.- Estado límite último de agotamiento por flexión..... 7.3

7.2.- Estado límite último de agotamiento por esfuerzo cortante..... 7.5

7.3.- Estado límite último de anclaje..... 7.6

7.4.- Estados límites de utilización..... 7.8
7.4.1.- Estado límite de deformabilidad..... 7.8
7.4.2.- Estado límite de fisuración..... 7.10

7.5.- Resumen de los criterios propuestos..... 7.12

7.6.- Ejemplo de aplicación. Conclusiones..... 7.12

Capítulo 8.- CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS..... 8.1

8.1.- Conclusiones relativas al comportamiento frente a los estados límites últimos..... 8.1

8.2.- Conclusiones relativas al comportamiento frente a los estados límites de servicio..... 8.2

8.3.- Conclusiones relativas a plazos de descimbrado..... 8.4

8.4.- Líneas de investigación futuras..... 8.5

REFERENCIAS..... R.1

ANEJOS

Anejo I	Planos	A1.1
Anejo II	Documentación fotográfica	A2.1
Anejo III	Resultados de los ensayos sobre probetas	A3.1
Anejo IV	Resultados de los ensayos de vigas a rotura	A4.1
Anejo V	Resultados de los ensayos de vigas a fluencia	A5.1
Anejo VI	Estado de fisuración de las vigas	A6.1

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1.- GENERALIDADES

El hormigón es un material obtenido a partir de la mezcla de áridos, cemento y agua. La pasta de cemento y agua, al fraguar primero y endurecer después, consolida el árido para constituir un verdadero conglomerado artificial análogo a ciertos tipos de rocas naturales. Sin embargo, el hormigón se diferencia de aquéllas por ser un material moldeable, lo cual facilita su adaptación a formas variadas [Torroja E., 1991].

Si bien los romanos ya utilizaron hormigón para construir tuberías e instalaciones portuarias, su desarrollo, en su concepción moderna, se inició en 1824 cuando J. Aspdin fabricó un cemento hidráulico artificial (Portland). Sin embargo, su aplicación a la construcción de estructuras no sería posible hasta la aparición del hormigón armado.

El precursor del hormigón armado puede decirse que fue el jardinero francés Monier cuando, en 1867, empezó a construir sus macetas con hormigón armado con alambres, si bien su trabajo carecía de fundamentos teóricos. Las primeras aplicaciones a gran escala, en el campo de la construcción, se realizarían en 1890 (E.L. Ransome en América y F. Hennebique en Francia) cuando ya se conocían las reglas básicas del comportamiento resistente de este nuevo material de construcción [Giedion S., 1982].

Ya a principios de nuestro siglo se sucedieron los estudios y realizaciones con hormigón armado. Así, por ejemplo, E. Mörsch publicó en 1902 "La construcción con hormigón armado, su aplicación y su teoría" donde expuso una teoría general para el cálculo y el dimensionado de piezas de hormigón armado, la cual amplió y consolidó posteriormente [Mattheis J., 1980]. Entre 1901 y 1904 A. Garnier proyectó su "Ciudad industrial" utilizando el hormigón armado para todo tipo de edificios. Maillart, en 1905 construyó un puente en Tavanasa, sobre el Rhin, utilizando la placa de hormigón armado como elemento fundamental de la estructura del puente. En 1915 Le Corbusier dibujó un prototipo de estructura en hormigón armado para una casa de viviendas, ilustrando con ello la concepción de la estructura como "esqueleto" del edificio y convirtiendo el armazón de hormigón armado, estudiado por un ingeniero, en lenguaje arquitectónico. [Giedion S., 1982].

Ciertamente, la posibilidad de conseguir un material al que se le pudiera dar forma, reforzar internamente para adaptarlo a cada caso particular y que finalmente tuviera el aspecto de una piedra monolítica, sin juntas, abrió las expectativas de una mayor libertad en el diseño, interesando tanto a ingenieros como a arquitectos. No en vano, el hormigón armado se convertiría, entre 1910 y 1920, casi en la marca de fábrica de la nueva arquitectura.

Pero no era ésta la única razón que motivó el interés por el hormigón armado. En 1894 A. de Baudet inició la construcción de la primera iglesia con estructura de hormigón armado cerrada con sutiles muros, informando posteriormente que se le concedió el contrato porque, empleando un nuevo material, podía hacer las obras en mejores condiciones económicas que sus competidores [Giedion S., 1982].

Casi un siglo después de las primeras aplicaciones del hormigón armado, las razones que motivaron su desarrollo siguen siendo válidas, siendo el material mayoritariamente utilizado en construcción, tanto en obras civiles como de edificación. Los estudios y ensayos realizados han permitido mejorar sus prestaciones y avanzar tanto en el conocimiento de sus mecanismos resistentes como en sus posibilidades de utilización.

Si bien puede decirse que el hormigón es un material de construcción barato, para que el hormigón armado resulte un material competitivo, económicamente hablando, conviene ajustar las formas, dimensiones y armado de los elementos con él construidos para conseguir un buen rendimiento resistente de los mismos. Pero esto no es suficiente ya que el coste de la ejecución puede encarecer notablemente la obra.

Desde el punto de vista constructivo, el hecho de que el hormigón sea un material moldeable impone la necesidad de un encofrado, capaz de soportar el peso y los empujes laterales del hormigón fresco y una cimbra capaz de sustentar dicho encofrado. Una vez fraguado el hormigón, desaparecen los empujes laterales y por tanto deja de ser necesario el encofrado, pero el hormigón aún no ha alcanzado suficiente resistencia, por lo que la cimbra debe mantenerse durante algo más de tiempo [Torroja E., 1991]. El coste de los encofrados y cimbras limitará, en cierto modo, la libertad de diseño en cuanto a formas.

Repetir una forma varias veces en una misma obra permite reutilizar el encofrado y la cimbra, reduciendo su repercusión en el coste de ejecución de la misma. Sin embargo, esta práctica significa tener que esperar al desencofrado o descimbrado para poder continuar con la construcción, lo cual puede suponer un retraso en la finalización de la misma, siendo el plazo de ejecución de la obra otro factor que puede encarecer o abaratar su coste.

La mayoría de los edificios en altura que se construyen en nuestro país se resuelven con estructura de hormigón armado, utilizándose básicamente los dos

tipos siguientes:

- Estructura formada por pilares y jácenas sobre las que apoyan los forjados de viguetas (pórticos planos y forjados unidireccionales).
- Estructura formada por pilares y losas aligeradas (forjados reticulares).

En ambos casos, la rapidez de construcción y la utilización del mínimo número posible de juegos de puntales conducen a que éstos sean retirados de las plantas inferiores a medida que se van construyendo las plantas sucesivas, manteniendo cimbradas un mínimo de dos plantas inmediatamente inferiores a la de nueva construcción. Ello conduce a que, en general, las cimbras sean retiradas a los 14 días del hormigonado, siendo la resistencia a compresión del hormigón (obtenida en el ensayo de probetas normalizadas) el único factor que se tiene en cuenta para determinar los plazos de descimbrado.

Ciertamente, las técnicas y materiales de construcción actuales, en especial la utilización de ciertos cementos y aditivos, permiten alcanzar resistencias elevadas a tempranas edades del hormigón, lo que sugiere la posibilidad de realizar descimbrados rápidos. Sin embargo hay que recordar que la Instrucción EH-91 establece que el descimbrado no se realizará hasta que el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para soportar, con suficiente seguridad y sin deformaciones excesivas, los esfuerzos a los que va a estar sometido durante y después de aquél. En consecuencia, la resistencia a compresión del hormigón no debe ser la única variable a considerar en el estudio de los plazos de descimbrado, existiendo otras características del propio hormigón, de la estructura o de las cargas actuantes que deben tenerse en cuenta a la hora de establecer dichos plazos, puesto que un descimbrado rápido puede afectar tanto a la capacidad resistente como al comportamiento en servicio de la estructura, especialmente en lo que se refiere a deformabilidad diferida [Serrà et al., 1994].

En resumen, el problema básico es determinar cómo influye la edad del descimbrado en el comportamiento en servicio y en la seguridad, tanto a corto como a largo plazo, de la estructura.

A diferencia del acero, las propiedades mecánicas del hormigón evolucionan con su edad, rápidamente en los primeros días y más lentamente después. El dimensionado de las estructuras de hormigón armado se realiza tomando como resistencia a compresión del hormigón un valor denominado resistencia característica de proyecto, el cual debe ser igualado o superado por el hormigón vertido en la obra, a la edad de 28 días.

Generalmente, cuando se descimbra antes de los 28 días, el hormigón aún no ha alcanzado la resistencia de proyecto y su módulo de deformación y demás propiedades mecánicas tienen valores tanto más desfavorables, respecto a los adoptados para el dimensionado, cuanto menor es la edad del descimbrado.

Para el estudio de los plazos de descimbrado será necesario conocer, además de la evolución de las propiedades del hormigón, las cargas que actúan sobre la estructura durante su construcción y los esfuerzos que éstas producen en los elementos que la forman, a partir de los cuales deberán comprobarse todos los estados límites. Un análisis de los factores que determinan dichos estados proporcionará una idea de las posibles repercusiones de un descimbrado rápido.

En el *estado límite de rotura bajo solicitaciones normales* se establece que el agotamiento se produce cuando alguna fibra de la sección alcanza la máxima deformación. Una sección sometida a flexión se dimensiona para que la rotura se produzca habiendo plastificado el acero antes de que se agote el hormigón o por agotamiento del acero en tracción (rotura dúctil). Normalmente, con las calidades de acero y hormigón exigidas en proyecto, se produce este tipo de rotura (caso de alcanzarse). Sin embargo una importante reducción de la resistencia del hormigón podría conducir a una rotura frágil en flexión, si bien es poco probable. En cambio, en elementos sometidos a flexo-compresión, una reducción importante de la resistencia del hormigón puede conducir a mermas considerables en la capacidad portante del elemento.

En el *estado límite de rotura bajo esfuerzo cortante* se define el cortante último que agota a la sección por tracción (V_{u2}) como la suma de las contribuciones del hormigón y de la armadura transversal. Una disminución de la resistencia del hormigón producirá una merma en la contribución del hormigón pero la de la armadura transversal será la misma. Esto conduce a que la pérdida de capacidad resistente a cortante de la sección será mayor cuanto más peso tenga la contribución del hormigón en el cortante último de diseño. La resistencia del hormigón, en el instante del descimbrado, debe ser suficiente como para evitar el agotamiento de las bielas de compresión. Ello puede ser crítico en elementos sometidos a flexo-torsión y cortante.

En cuanto al *estado límite de adherencia*, el esfuerzo cortante que produce el fallo se define directamente proporcional a la resistencia de cálculo para adherencia, siendo ésta directamente proporcional a la raíz cúbica del cuadrado de la resistencia a compresión del hormigón. Así, una disminución de ésta repercutirá en un descenso del cortante que condiciona este estado límite.

En el *estado límite de anclaje*, la longitud de anclaje necesaria se define inversamente proporcional a la resistencia de cálculo para adherencia, lo cual conduce a que, ante una disminución de ésta, la longitud de anclaje necesaria sea mayor. Afortunadamente los anclajes se diseñan para que, con las propiedades de proyecto de los materiales, se agote antes el acero que el anclaje, lo cual conduce a que, en el momento del descimbrado, las tensiones de adherencia generadas suelen ser insuficientes para agotar el anclaje, a pesar de que el hormigón no posea sus características resistentes definitivas.

Los valores de la resistencia del hormigón a compresión y, en especial, a

tracción influyen en el nivel de carga para el que se produce la *fisuración*, lo que ocurre cuando la tensión principal de tracción supera la resistencia a tracción del hormigón (f_{ctj}). En flexión ello conduce a un ancho mayor de fisura pues la tensión de la armadura de tracción es mayor. En cuanto a la microfisuración por compresión, niveles de tensión superiores al 50% de la resistencia a compresión del hormigón (f_{cj}) pueden provocar niveles de microfisuración y daños irreversibles que pueden afectar a la capacidad de carga.

La *deformabilidad* instantánea y, sobre todo, la diferida se ven fuertemente afectadas, de forma negativa, por descimbrados tempranos. El hormigón joven suele tener bajos valores de módulo de deformación (E_{cj}), de resistencia a compresión (f_{cj}) y de resistencia a tracción (f_{ctj}). Ello conduce a que la rigidez elástica ($E_{cj}I$), el momento de fisuración (M_{cr}) y la rigidez fisurada sean menores que a los 28 días. Consecuentemente la pieza fisura para cargas menores y la flecha instantánea es mayor. La fluencia del hormigón es muy sensible a la edad de éste en el momento de ser cargado. En hormigones jóvenes, la fluencia puede ser varias veces superior a la de un hormigón cargado a los 28 días. Por otra parte, niveles altos de tensión en relación a f_{cj} pueden dar lugar a fluencia no lineal produciéndose, por tanto, flechas diferidas mayores. En consecuencia, ésta es una cuestión que puede claramente afectar a la velocidad de construcción y cuyas consecuencias, constatadas en un sinfín de casos patológicos en nuestro país, no se manifiestan hasta pasado un cierto tiempo.

Si bien cada uno de los estados límites se analizan con más detalle en los capítulos siguientes, de todo lo expuesto hasta aquí se detecta que existe una influencia de la edad del hormigón en el momento del descimbrado en la satisfacción de dichos estados límites.

El estudio de los plazos de descimbrado es un tema que interesa tanto desde un punto de vista técnico, ya que conviene conocer el riesgo que se asume en el momento del descimbrado, como desde un punto de vista económico, puesto que la reducción de los plazos repercute en una mayor agilización del proceso constructivo, como desde un punto de vista social, ya que el conocimiento de las repercusiones del descimbrado temprano en el comportamiento de la estructura acabada puede contribuir a mejorar la calidad de las construcciones, reduciendo los casos de patología estructural debidos a deformabilidad excesiva.

1.2.- PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS GENERALES

El objetivo global del presente trabajo es establecer criterios generales y simples de descimbrado. Evidentemente, el cumplimiento de este objetivo global requiere una amplia campaña de ensayos que cubra todos y cada uno de los parámetros que influyen en el comportamiento de las estructuras, variando la composición del hormigón, las condiciones de curado, el tipo de estructura o elemento estructural, las cuantías de armado, etc. Ello, por razones de tipo

económico, de disponibilidad de espacio, tiempo y personal, escapa de las posibilidades de una tesis doctoral. Sin embargo, sí es posible plantear una campaña de ensayos, restringida pero suficientemente amplia, que permita avanzar en el estudio de los plazos de descimbrado y, a partir de los propios conocimientos y experiencia y de las aportaciones de las investigaciones previas, proponer criterios de validez más general.

Para ello, a partir de la revisión de las investigaciones realizadas hasta la fecha y con la voluntad de llegar a resultados útiles, de aplicación práctica en este país, se ha acotado el campo de esta investigación pero sin perder de vista el objetivo global de la misma, lo cual ha conducido al planteamiento de unos objetivos más concretos y que a continuación se exponen.

En primer lugar y como objetivo fundamental de esta investigación se pretende estudiar la influencia de la edad del hormigón en el momento del descimbrado sobre la deformabilidad instantánea y diferida de vigas de hormigón armado y sobre la capacidad resistente a flexión y cortante de las mismas.

Asimismo, se pretende estudiar los mecanismos de deformación seccional en el tiempo y tratar de proponer una formulación sencilla y racional para el cálculo de las flechas diferidas.

Por otro lado, debido a que un elemento estructural entra en carga en el momento de su descimbrado y que, según el proceso de construcción, dicha carga puede alcanzar valores importantes, es conveniente estudiar la influencia de una carga prematura sobre la seguridad y la deformabilidad instantánea a largo plazo.

Otro aspecto que es necesario estudiar es la influencia de una carga prematura en la fisuración, tanto a corto como a largo plazo, puesto que de ella depende, en gran medida, la durabilidad de la estructura.

Además se pretende aprovechar la experimentación realizada para estudiar otros temas colaterales que constituyen objetivos menos prioritarios. Entre ellos cabe destacar la evolución de las propiedades del hormigón en el tiempo, la rigidez seccional instantánea en la fase fisurada y la validez de los criterios de rotura, establecidos para hormigón de 28 días, para el caso de hormigón joven.

Con el fin de alcanzar los objetivos aquí expuestos y tratando de aprovechar al máximo los recursos disponibles, se ha planteado una investigación experimental, acompañada de predicciones teóricas, consistente en el proyecto, construcción, instrumentación y ensayo de 2 series de 8 vigas de hormigón armado, simplemente apoyadas y de sección rectangular.

De las 8 vigas que componen cada serie, 4 han sido llevadas a rotura inmediatamente después del descimbrado, con el fin de estudiar la influencia de la edad del hormigón sobre la capacidad resistente y deformabilidad instantánea

de las mismas. Las 4 vigas restantes han sido cargadas inmediatamente después del descimbrado, manteniendo el valor de la carga aplicada durante un cierto período de tiempo, con el fin de estudiar la influencia de la edad del hormigón sobre la deformabilidad diferida de las mismas, así como profundizar en los mecanismos de deformación seccional en el tiempo. Estas mismas vigas, una vez descargadas, han sido llevadas a rotura con la finalidad de estudiar la influencia de una carga prematura sobre la capacidad resistente y la deformabilidad instantánea, a largo plazo, de las mismas.

Con el ánimo de extraer la máxima información posible de cada uno de los ensayos realizados así como determinar todas las variables significativas y acotar los posibles errores de medición, se ha instrumentado con redundancia tanto el hormigón como las armaduras de cada una de las vigas. Los resultados experimentales así obtenidos han sido contrastados con predicciones teóricas, sacándose conclusiones al respecto.

1.3.- CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO

En el *capítulo 2* se presenta una revisión del estado actual del conocimiento. En él se exponen los aspectos fundamentales sobre el comportamiento de las estructuras de hormigón armado y se describen los trabajos más relevantes, teóricos y experimentales, realizados hasta la fecha para el caso de hormigones jóvenes. Éstos se desglosan en 2 grupos. En el primero se incluyen las investigaciones encaminadas al estudio de la evolución de las propiedades del hormigón. En el segundo grupo se incluyen las investigaciones centradas en el estudio del comportamiento de una estructura o elemento estructural. También se repasan en este capítulo las diferentes normas en su tratamiento de los estados límites y criterios de descimbrado. Finalmente se extraen conclusiones acerca de los aspectos sobre los que se debe profundizar y que permiten formular los objetivos concretos de este trabajo.

En el *capítulo 3* se agrupa la descripción de todos los aspectos que inciden en la planificación de la experimentación y son comunes a todos los ensayos. En primer lugar se detallan los criterios establecidos para definir las vigas objeto de ensayo, incluyendo la descripción de las mismas. Seguidamente se definen los distintos tipos de ensayo y las edades en que éstos se realizaron. A continuación se efectua una descripción detallada de la instrumentación adoptada para la adquisición de datos y, por último, se describe la organización del conjunto de la experimentación, incluyendo la construcción de las vigas, la organización de la instrumentación y de un día de ensayo y el calendario de toda la experimentación. En el Anejo I se incluyen los planos de armado de las vigas.

En el *capítulo 4* se realiza una descripción detallada de cada uno de los ensayos efectuados, incluyendo el sistema de carga empleado, el proceso de ejecución y el sistema de control de los mismos. El Anejo II aporta la

documentación fotográfica que complementa las explicaciones de este capítulo.

En el *capítulo 5* se presentan los resultados obtenidos en los ensayos. En él se describe la metodología empleada para la interpretación de los mismos y se establecen conclusiones a partir de la comparación de los resultados de un mismo ensayo realizado a distintas edades. Los Anejos III, IV y V complementan este capítulo aportando listados de las mediciones realizadas durante los ensayos de caracterización del hormigón, de vigas a rotura y de vigas a fluencia, respectivamente. En el Anejo VI se incluyen croquis y fotografías relativos al estado final de fisuración de algunas de las vigas ensayadas, representativas del conjunto de la experimentación efectuada.

En el *capítulo 6* se comparan los resultados experimentales con predicciones analíticas realizadas según distintos modelos, valorando la aplicabilidad de los criterios de dimensionado propuestos en las normativas vigentes, para un hormigón maduro, al caso de homigones jóvenes.

En el *capítulo 7* se proponen unos criterios para el establecimiento de plazos de desencofrado, basados en la satifacción de los estados límites tanto en el momento del desencofrado como a lo largo de la vida útil de la estructura.

Por último, en el *capítulo 8* se sintetizan las conclusiones de la investigación realizada y las perspectivas abiertas de cara a futuras investigaciones.

Capítulo 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

En el presente capítulo se exponen los aspectos fundamentales que influyen en el comportamiento de las estructuras de hormigón armado así como los trabajos más relevantes realizados hasta la fecha, para el caso de hormigones jóvenes.

En primer lugar se describen los factores que determinan la evolución de las propiedades del hormigón y los trabajos encaminados a predecir cada una de ellas en función de la edad del hormigón. En este apartado se trata, únicamente, el caso de hormigones jóvenes, dado que sería imposible describir la enorme cantidad de trabajos existentes para hormigones maduros en este campo.

Seguidamente se exponen los métodos de cálculo usuales que permiten predecir el comportamiento de una estructura en el caso de hormigón maduro (más de 28 días), en base a los cuales se analizan las posibles repercusiones de un descimbrado temprano sobre la seguridad, durabilidad y funcionalidad de la misma.

A continuación se describen los trabajos experimentales más relevantes, realizados hasta la fecha, sobre el comportamiento de vigas de hormigón armado a edades tempranas.

Por último, se extraen conclusiones acerca de los aspectos que se deben investigar, fijando así los objetivos del presente trabajo.

2.1.- EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

2.1.1.- Resistencia a compresión

Puede aceptarse que los métodos tradicionales utilizados en la determinación de la resistencia a compresión son también válidos cuando se trata de un hormigón joven. Deben tenerse en cuenta ciertos extremos en los métodos de ensayo [RILEM, 1981], tales como la dimensión de las probetas y su peso propio, cuya influencia en los resultados es proporcional a la juventud del material ensayado.

A edades tempranas, la resistencia a compresión del hormigón aumenta exponencialmente [RILEM, 1981]. Este período exponencial cesa a los pocos días, pasando la curva a ser mucho más suave aunque, como es bien sabido, nunca deja de ascender. Numerosos factores influyen en el tipo de crecimiento que experimenta la resistencia. Entre ellos, los más importantes son el tipo de cemento, la relación agua/cemento, los aditivos y áridos y las condiciones de curado.

La influencia de la relación agua/cemento se estudia con profundidad desde hace años, pudiendo destacarse los trabajos de Nennig [1957], Kasai [1962], Haugland [1976], Byfors [1980] y Fernández Gómez [1986]. De estas investigaciones se concluye que la resistencia a compresión no aumenta del mismo modo en hormigones con diferentes valores de a/c. Estas desviaciones son mayores cuanto menor sea tal razón y después de 24-48 horas. Resulta de suma importancia el hecho de que el grado de hidratación varía con la relación a/c a largas y no a muy tempranas edades. Existe, en definitiva, una función entre la resistencia a compresión y la relación a/c a cortas edades, que resulta ser lineal, en escala logarítmica, para todas las edades [Kasai, 1962].

La influencia del tipo de cemento en la evolución de la resistencia es estudiada, entre otros, por Kasai [1963], Haugland [1976], Byfors [1980] y Fernández Gómez [1986]. Respecto a la finura del cemento cabe decir que el aumento de resistencia a edades tempranas resulta más veloz cuanto mayor es la superficie específica de aquél [Bennet, 1969]. Kasai [1962] y Byfors [1980] experimentan sobre la repercusión del tiempo de puesta en obra del hormigón fresco. Ambos no descubren influencia alguna de éste parámetro sobre la resistencia.

Las condiciones de curado son uno de los más importantes factores en la velocidad de aumento de resistencia a compresión, destacando entre aquéllas la temperatura. Los autores antes citados, unidos a Sadgrove [1970] y Pedersen [1977], han desarrollado numerosos estudios destinados a investigar este aspecto, íntimamente relacionado con el concepto de madurez del hormigón. Desde hace ya tiempo, está probado que una temperatura inicial alta se traduce en una disminución de la resistencia a compresión en el hormigón endurecido. A 24 horas de colocado el hormigón, su resistencia aumenta si lo hace la temperatura, mientras que a 28 días, la resistencia decrece si crece la temperatura. De igual forma, una falta de humedad durante las primeras horas del hormigón ocasiona un defecto en el grado de hidratación del cemento y, por tanto, conduce a pérdidas sustanciales de resistencia a largo plazo.

La aportación de agua resulta un factor decisivo en la hidratación del cemento y, por tanto, en la curva de adquisición de resistencia. Asimismo, es bien conocido que una insuficiente o inexistente humedad de curado, particularmente durante las primeras 24 horas, conduce a significativas pérdidas de resistencia en edades posteriores.

Los últimos años han visto grandes desarrollos en la investigación de funciones de madurez, que pretenden expresar de forma simple las características que ha alcanzado un hormigón, traducibles a términos de resistencia. Las primeras funciones expresaban la madurez como producto del tiempo y la temperatura [Saul, 1951], de una forma similar a la expresión que aparece en la instrucción EH-91. De acuerdo al papel de la madurez sugerido por Saul, probetas de un hormigón dado adquieren aproximadamente la misma resistencia cuando alcanzan un mismo grado de madurez. Esta idea puede espresarse como:

$$M_s = \Sigma_0^t \, (T - T_0) \, \Delta t \qquad \textbf{(2.1)}$$

$$R = \phi_s \, (M_s) \qquad \textbf{(2.2)}$$

donde M_s es la madurez del hormigón en la edad t (intervalo de tiempo en días u horas), T es la temperatura media del hormigón durante el intervalo t, T_0 es la temperatura de congelación del agua, R es la resistencia a compresión, y ϕ_s es la función resistencia-madurez.

Bergström [1953] sugiere que la temperatura del hormigón debe ser evaluada a partir del valor -10^{0}C, por debajo de la cual el hormigón no endurece. Así:

$$M_s = \Sigma_0^t \, (T + 10) \, \Delta t \qquad \textbf{(2.3)}$$

Rastrup [1954] propone el concepto de "edad equivalente", una aproximación alternativa para representar los efectos combinados de tiempo y temperatura. Se define como el tiempo que el hormigón debería ser curado a temperatura T_r para alcanzar la misma madurez que el hormigón con la historia actual de curado:

$$(t_{es})_r = \frac{\Sigma_0^t \, (T - T_0) \, \Delta t}{T_r - T_0} \qquad \textbf{(2.4)}$$

en donde T_r se tomo habitualmente como 20^{0}C. La experiencia demuestra que la función de Saul resulta adecuada para rangos de temperatura entre 5 y 30^{0}C.

Otro tipo de funciones de madurez se expresan en función de la velocidad de reacción del cemento. Basándose en la ecuación de Arrhenius:

$$k = A^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \qquad \textbf{(2.5)}$$

donde k es la velocidad constante, A es una constante conocida, E es la energía de activación, T es la temperatura absoluta y R es la constante de los gases. La hidratación del cemento, en definitiva, consiste en una serie de reacciones químicas que se aceleran de forma no lineal con la temperatura. Hansen y Pedersen [1977] obtuvieron una nueva función:

$$M_a = \Sigma_0^t \, k \Delta t = A \, \Sigma_0^t \, e^{\left(-\frac{E}{RT}\right)} \Delta t \qquad \textbf{(2.6)}$$

donde M_a es la madurez. La determinación de E depende de cada tipo de cemento, pero en general esta función tiene un campo de aplicación mucho más amplio que la se Saul.

Un último tipo de funciones de madurez pretenden soslayar el escaso campo de aplicación de la primera y la complicación que surge cuando E depende de T en la segunda. Weaver y Sadgrove [1971] sugieren una expresión que se basa en el producto del tiempo por la temperatura elevada a un exponente. Así, para calcular la edad equivalente a 20^{0}C y la madurez, se propone:

$$t_{ep} = \frac{1}{1200} \, \Sigma_0^t \, (T + 10)(T + 20) \Delta t \qquad \textbf{(2.7)}$$

$$M_p = \Sigma_0^t \, (T + 10)(T + 20) \Delta t \qquad \textbf{(2.8)}$$

cuyos resultados se acercan mucho más a las observaciones experimentales.

La relación entre la madurez y la resistencia a compresión la determina Plowman [1956] como una simple ecuación logarítmica:

$$R = a + b \, \log M_s \qquad \textbf{(2.9)}$$

donde R es la resitencia a compresión, M_s es la madurez según la ecuación de Saul y a y b son dos constantes que dependen del tipo de cemento y de la relación agua/cemento. Esta ecuación no consigue, sin embargo, ser sancionada por la práctica ya que, al crecer continuamente la madurez, predice aumentos ilimitados en la resistencia. Kee [1971] propone una ecuación parabólica del tipo.

$$R = \frac{M_s}{a M_s + b} \qquad \textbf{(2.10)}$$

donde a y b surgen de la experimentación. Más razonable que la anterior, esta ecuación prevé un límite en la resistencia del orden de $1/a$, sin embargo, no tiene en cuenta que la resistencia a largo plazo se ve muy influida por las variaciones de temperatura a tempranas edades.

Recientemente, Carino [1982] desarrolla teóricamente una relación entre madurez y resistencia. Partiendo de la base de un hormigón curado en condiciones isotermas, la velocidad de incremento de la resistencia (razón entre la resistencia y la resistencia última) es proporcional a una fracción de la resistencia remanente. Así:

$$\frac{d\left(\frac{R}{R_u}\right)}{dt} = k\left(1 - \frac{R}{R_u}\right)^n \qquad \textbf{(2.11)}$$

donde R es la resistencia del hormigón, R_u su resistencia última a madurez infinita, k es la velocidad constante de ganancia de resistencia y n es un entero positivo.

Más modernamente, Oluokun [1990] ha demostrado la bondad de las ecuaciones de Plowman excepto para predecir resistencias anteriores a un día. Por ello, propone una nueva función para este intervalo de tiempo:

$$f_{cx} = f_c' \, (1 - e^{-\gamma m}) \qquad \textbf{(2.12)}$$

donde f_{cx} es la resistencia para la madurez dada M, m es la diezmilésima parte de M, f_c' es la resistencia a 28 días y γ es una constante. Para largas edades, Kjellsen [1993] desarrolla un modelo de madurez modificado. Tal modificación incorpora la resistencia como una nueva variable en la función de temperatura. El nuevo modelo se ajusta con aproximación al caso del cemento portland bajo condiciones de curado isotermas.

Un último aspecto estudiado, en cuanto a la resistencia a compresión del hormigón, es aquél que relaciona los efectos de sobrecargas tempranas sobre la resistencia a largo plazo. Las investigaciones de Shah [1970] y Byfors [1980] se han visto complementadas últimamente por Yahia [1992], que desarrolló una campaña experimental fruto de la cual obtuvo la siguiente conclusión principal: la carga del hormigón hasta el 90% de su resistencia, a partir de una edad de 8 horas, no afecta a su posterior desarrollo de resistencia. Sin embargo, cargando dicho hormigón hasta rotura se observa una pérdida de resistencia de entre un 10 y un 50%, dependiendo de la edad en los instantes de carga y de recarga y de las condiciones de curado.