

Estudio del comportamiento en flexocompresión de los hormigones de alta resistencia

Behaviour of high strength concrete under bending and compression

◆
Juan J. Arenas de Pablo
Universidad de Cantabria

◆
Germán Gutiérrez Martín
Universidad de Cantabria

◆
Miguel A. Vicente Cabrera
Universidad de Burgos

◆
Dorys C. González Cabrera
Universidad de Burgos

RESUMEN

Este artículo describe la máquina de ensayo desarrollada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria para obtener experimentalmente la distribución de tensiones en hormigones de diferentes resistencias, desde hormigones convencionales hasta hormigones de alta resistencia. Utilizando la máquina de ensayo anteriormente mencionada han sido ensayadas 240 probetas bajo carga creciente y excéntrica hasta rotura. Las variables de ensayo han sido la forma de la probeta, edad de rotura y resistencia del hormigón.

Uno de los resultados más interesantes ha sido la conclusión de que no es posible definir un único diagrama tensión – deformación que satisfaga simultáneamente las dos condiciones de equilibrio para cualquier nivel de carga. La consecuencia de este hecho es que la distribución tensional en el hormigón y la deformación máxima en rotura depende de la forma de la sección.

SUMMARY

This paper describes computerized closed-loop testing facility that was developed to experimentally obtain the stress distribution in concretes of different strength, including high strength concretes. Using the closed loop computerized testing facility 240 test specimens were tested to failure under increasing eccentrically load. The test variables were geometry or shape of specimens, age at testing and the concrete strength.

On the basis of results, it is concluded that it is not possible to define a unique stress-strain diagram satisfying simultaneously the two equilibrium conditions at any given stage of loading. It is further concluded that the shape of the concrete compression zone and the maximum useable strain depend upon the cross-section shape of the specimen.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento de vigas frente a esfuerzos de flexión ha suscitado, desde los orígenes mismos del nacimiento del hormigón estructural, un gran interés a la comunidad científica. Además, muy pronto se tiene constancia de que el fallo de dichos elementos está fuertemente condicionado por la capacidad resistente de la cabeza flexocomprimida del hormigón. Sin embargo, el modo de abordar este análisis no ha estado claro y, en función del momento histórico y de la capacidad tecnológica, el estudio se ha planteado de una u otra forma.

En cualquier caso, la mayoría de los trabajos presentados hasta el momento han propuesto modelos predictivos de la carga de rotura de elementos de hormigón estructural. Dichos modelos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- *Modelos basados en criterios tensionales:* Están asociados a trabajos de investigación de tipo experimental, sin base teórica. Dan como resultados modelos de tipo empírico [1-5].

- *Modelos basados en criterios energéticos*: Están asociados a trabajos de corte teórico, acompañados de una escasa base experimental. Los modelos obtenidos suelen estar basados en los postulados de la Mecánica de Fractura [6-8].
- *Modelos mixtos*: Están asociados a trabajos de corte experimental, en los que los resultados son analizados basándose en los postulados de la Mecánica de Fractura. Dan como resultado modelos de tipo pseudo empírico [9-15].

La necesidad de investigación sobre el comportamiento del hormigón en flexocompresión es un tema plenamente vigente. No solo porque, hasta el momento, ningún trabajo de investigación ha resultado plenamente satisfactorio, sino también porque el material que se estudia, el hormigón, ha experimentado un importante desarrollo en los últimos años, con la consecuente evolución de sus características mecánicas.

Para la realización del presente trabajo de investigación se ha contado con financiación procedente de fondos FEDER, así como con la colaboración de la empresa PRECON. El resultado científico del mismo ha sido dos Tesis Doctorales [16 y 17], un artículo internacional [18] y dos patentes, a saber, *Sistema universal de compresión excéntrica en probeta móvil* "P200200583", y *Procedimiento de ensayo de compresión excéntrica en probetas de hormigón* "P200200582".

Este artículo describe una máquina de ensayo totalmente computerizada que ha sido desarrollada en el Laboratorio de Estructuras de la Universidad de Cantabria con objeto de obtener la distribución de tensiones en hormigones con diferentes calidades, incluidos hormigones de alta resistencia. El procedimiento de ensayo utilizado supone una evolución con respecto a los llevados a cabo por otros investigadores (incluidos Rüsck y Hognestad). Se han ensayado un total de 240 probetas, con diferentes secciones tipo, diferente edad de rotura y diferente resistencia del hormigón.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Para estudiar el comportamiento de elementos de hormigón de alta resistencia bajo esfuerzos combinados de flexión y compresión se ha desarrollado una máquina de ensayo, dotada de una serie de singularidades que se describen a continuación.

La máquina de ensayo aplica una carga vertical creciente en magnitud y, simultáneamente, ajusta la posición horizontal de la probeta dentro de la misma, con objeto de mantener con deformación nula una de las fibras de la probeta (denominada fibra de control) (figuras 1 y 2).

La máquina de ensayo puede ser dividida en tres partes principales:

- Sistema de carga
- Sistema de desplazamiento
- Sistema de adquisición de datos

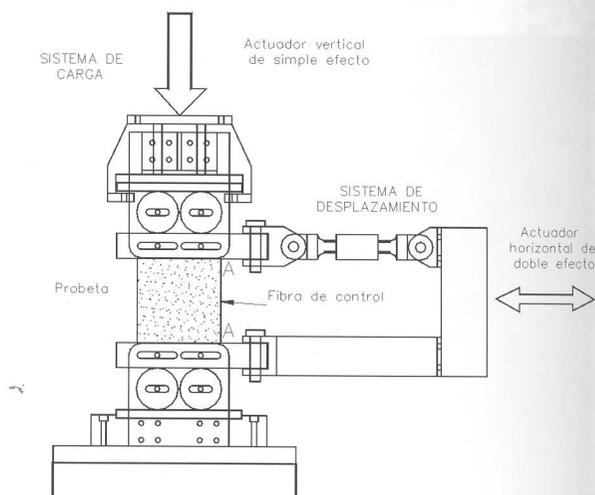


Figura 1: Esquema de la máquina de ensayo.

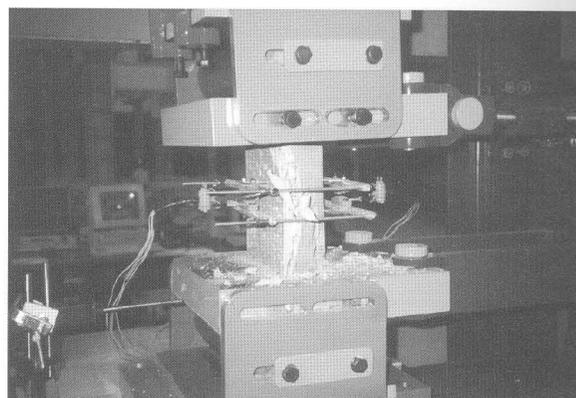


Figura 2: Máquina de ensayo.

El "sistema de carga" aplica una carga vertical creciente con el tiempo. Para este propósito se ha utilizado un actuador vertical de simple efecto con una capacidad de 2,50 MN. Entre este actuador y la máquina de ensayo, se dispone una rótula y un sistema de rodillos que permite el movimiento horizontal de la probeta dentro de la máquina de ensayo, sin dejar de aplicar carga vertical.

El "sistema de desplazamiento" está compuesto por un actuador horizontal de doble efecto y todo un complejo sistema de bielas y rodillos. Esto permite que las probetas puedan moverse horizontalmente durante la aplicación de la carga vertical.

El "sistema electrónico de control" garantiza que la deformación en la fibra de control se mantenga con valor nulo durante todo el ensayo. También la aplicación de la carga vertical está controlada computacionalmente. La velocidad de aplicación de la carga fue fijada en 0,50 kN/seg. El esquema de funcionamiento de la máquina de ensayo es el que se recoge en la figura 3.

Para cada ensayo se registraron continuamente los siguientes cuatro parámetros (figura 4):

- Magnitud de la carga vertical (P).

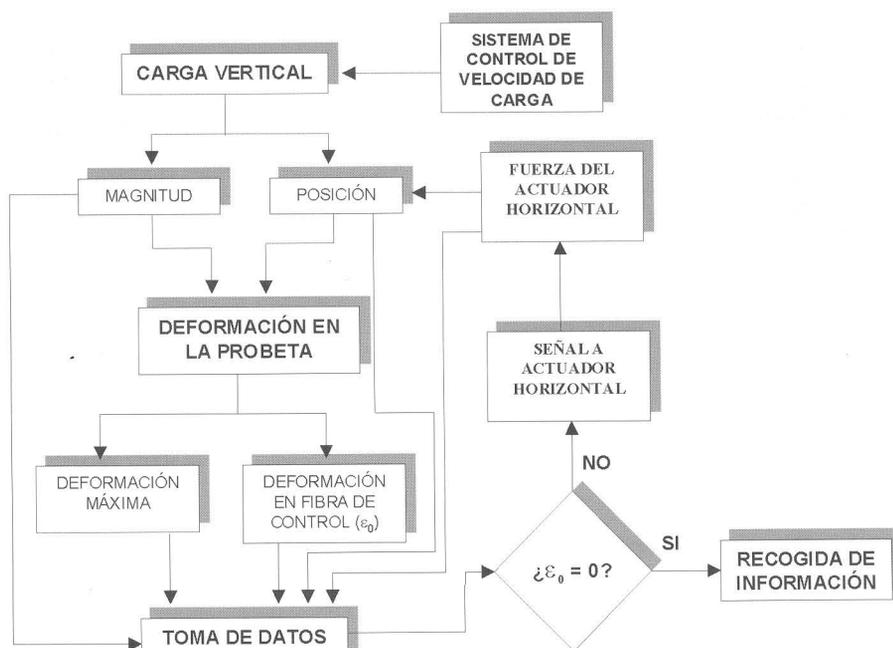


Figura 3. Esquema de funcionamiento de la máquina de ensayo.

- Excentricidad de la carga vertical, definida como la distancia entre el punto de aplicación de la carga y la fibra más comprimida (e).
- Deformación de la fibra más comprimida (ϵ).
- Deformación en la fibra de control (ϵ_0), que actúa a modo de parámetro de control de la calidad del ensayo.

El sistema de adquisición de datos recoge información con una frecuencia de 0,50 Hz, excepto para la deformación

de la fibra de control, que es medido con una frecuencia de 6,00 Hz.

Con objeto de poder medir simultáneamente la deformación de la fibra de control y de la fibra más comprimida, se ha diseñado un extensómetro doble de cuchillas (figura 5).

Tal y como se puede apreciar en la figura 5, el extensómetro se sujeta firmemente a la probeta, incluso en el momento de la rotura, mediante un sistema compuesto por cuatro barras roscadas y sendos muelles.

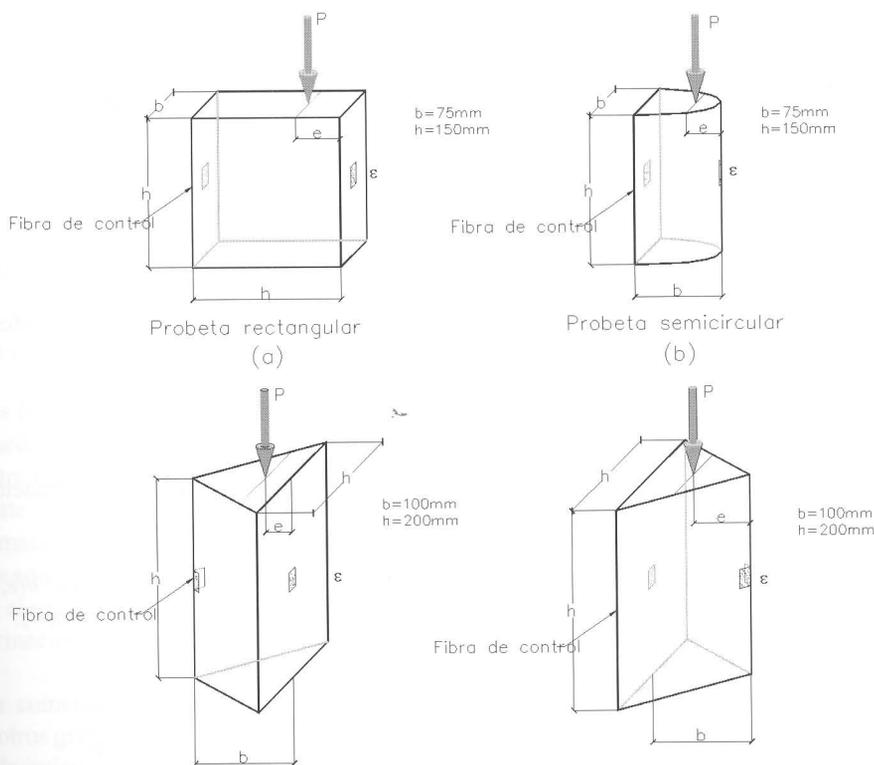


Figura 4: Diferentes tipos de probetas.

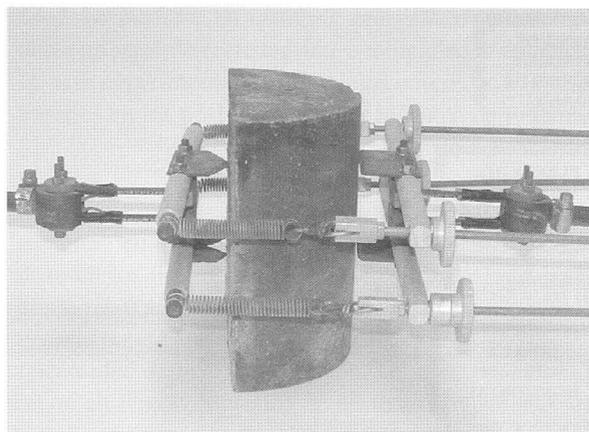


Figura 5: Extensómetro.

3. PROGRAMA DE ENSAYOS

Un total de 240 probetas han sido ensayadas utilizando la máquina de ensayo anteriormente descrita. Adicionalmente, 60 probetas cilíndricas (100x200 mm) han sido ensayadas bajo carga centrada, con objeto de determinar las propiedades mecánicas del hormigón [16]. Las variables analizadas en el programa de ensayo han sido las siguientes:

- Resistencia del hormigón. Cinco calidades diferentes de hormigón han sido estudiadas, variando entre 55 y 105 MPa.
- Forma de la sección transversal: Cuatro diferentes secciones transversales han sido ensayadas: rectangular, semi-circular, triangular con deformación nula en cara y triangular con deformación nula en arista (figura 4).
- Edad de rotura: Los ensayos se han realizado a cuatro edades distintas: 3, 7, 28 y 90 días.

4. ESTUDIO ANALÍTICO

Planteamiento matemático

Una vez que los ensayos han finalizado y se han medido los valores de P , e y ϵ , el diagrama tensión – deformación debe ser determinado. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurre con los ensayos bajo carga centrada, la determinación del diagrama tensión – deformación no es inmediata. A continuación se presenta una metodología para obtenerlo.

Las dos condiciones de equilibrio de fuerzas verticales y de momento pueden ser redactadas según se expone a continuación (ecuación 1) (figura 6):

$$P(t) = \int_0^h \sigma(x,t) \cdot b(x) \cdot dx \quad (1a)$$

$$P(t) \cdot e(t) = \int_0^h \sigma(x,t) \cdot b(x) \cdot (h-x) \cdot dx \quad (1b)$$

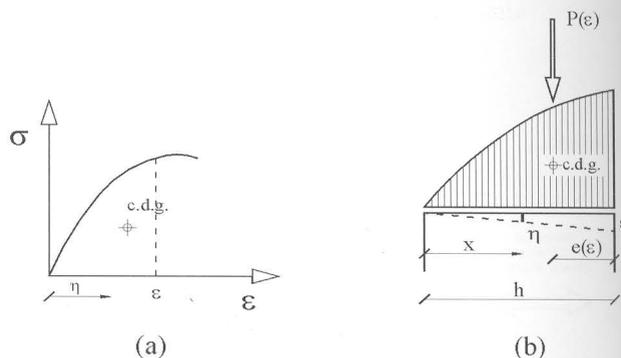


Figura 6: Diagrama tensión deformación satisfaciendo las ecuaciones de equilibrio de fuerzas verticales y momento para un determinado nivel de carga.

Aplicamos al sistema de ecuaciones (1) el siguiente cambio de variable (ecuación 2),

$$\eta(t) = \frac{\epsilon(t)}{h} \cdot x \quad (2a)$$

$$d\eta(t) = \frac{\epsilon(t)}{h} \cdot dx \quad (2b)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en (1), obtenemos (ecuación 3):

$$P(\epsilon) \cdot \frac{\epsilon}{h} = \int_0^\epsilon \sigma(\eta) \cdot b(\eta, \epsilon) \cdot d\eta \quad (3a)$$

$$P(\epsilon) \cdot e(\epsilon) \cdot \left(\frac{\epsilon}{h}\right)^2 = \int_0^\epsilon \sigma(\eta) \cdot b(\eta, \epsilon) \cdot (\epsilon - \eta) \cdot d\eta \quad (3a)$$

siendo:

$P(\epsilon)$, la carga vertical.

$e(\epsilon)$, la excentricidad.

ϵ , la deformación en la fibra más comprimida.

η , la deformación en una fibra interior genérica.

h , el canto de la probeta.

$b(\epsilon, \eta)$, el ancho de la probeta.

$\sigma(\eta)$, el diagrama tensión – deformación, cuya expresión matemática estamos buscando.

En nuestra campaña de ensayos, $b(\epsilon, \eta)$ presenta las siguientes expresiones (ecuaciones 4 a 7):

- Probeta rectangular:

$$b(\epsilon, \eta) = \frac{h}{2} \quad (4)$$

- Probeta semicircular

$$b(\varepsilon, \eta) = 2 \cdot \frac{h}{\varepsilon} \cdot \sqrt{\varepsilon^2 - \eta^2} \quad (5)$$

- Probeta triangular con deformación nula en arista

$$b(\varepsilon, \eta) = 2 \cdot \frac{h}{\varepsilon} \cdot \eta \quad (6)$$

- Probeta triangular con deformación nula en cara

$$b(\varepsilon, \eta) = 2 \cdot \frac{h}{\varepsilon} \cdot (\varepsilon - \eta) \quad (7)$$

La ecuación (3) representa un sistema de dos ecuaciones integrales con una única incógnita funcional $\sigma(\eta)$. Por analogía con los sistemas de ecuaciones convencionales, se puede comprender fácilmente que el sistema puede tener, o bien una única solución, o bien no tener solución.

Si asumimos como válida la existencia de $\sigma(\eta)$, entonces deberían verificarse las siguientes relaciones entre $P(\varepsilon)$ y $e(\varepsilon)$ (ecuaciones 8 a 10):

- Probeta rectangular:

$$\frac{d}{d\varepsilon} \left(P(\varepsilon) \cdot e(\varepsilon) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{h} \right)^2 \right) = P(\varepsilon) \cdot \frac{\varepsilon}{h} \quad (8)$$

- Probeta triangular con deformación nula en arista

$$\frac{d}{d\varepsilon} \left(P(\varepsilon) \cdot e(\varepsilon) \cdot \frac{\varepsilon^3}{h^3} \right) = P(\varepsilon) \cdot \frac{\varepsilon^2}{h^2} \quad (9)$$

- Probeta triangular con deformación nula en cara

$$\frac{d}{d\varepsilon} \left(P(\varepsilon) \cdot e(\varepsilon) \cdot \frac{\varepsilon^3}{h^3} \right) = 2 \cdot P(\varepsilon) \cdot \frac{\varepsilon^2}{h^2} \quad (10)$$

Para la probeta semicircular no es posible obtener una expresión explícita entre $P(\varepsilon)$ y $e(\varepsilon)$.

Introduciendo las funciones experimentalmente medidas de $P(\varepsilon)$ y $e(\varepsilon)$, se puede observar como las relaciones anteriormente descritas entre $P(\varepsilon)$ y $e(\varepsilon)$ no son satisfechas. Esto significa que no existe una función $\sigma(\eta)$, dependiente únicamente de la deformación, que satisfaga simultáneamente las dos condiciones de equilibrio para todo nivel de deformación. Esto significa que el valor de la tensión en una fibra depende no solo de la deformación en dicha fibra, sino de su posición.

Esta conclusión coincide con los resultados de trabajos desarrollados por otros grupos de investigación, que proponen la posibilidad de la existencia de una distribución tensional tridimensional en elementos de hormigón sometidos a esfuer-

zos uniaxiales (similares a los desarrollados en este trabajo) [13-18].

Análisis numérico

Tal y como ha sido demostrado anteriormente, no existe ninguna función $\sigma(\eta)$, que dependa únicamente de la deformación, que cumpla simultáneamente las dos condiciones de equilibrio del sistema de ecuaciones (3). El presente artículo propone una metodología para obtener un diagrama tensión – deformación complejo $\sigma(\eta, \varepsilon)$, en el que la tensión en un punto dependa del valor de deformación en ese punto y del nivel de deformación general del elemento.

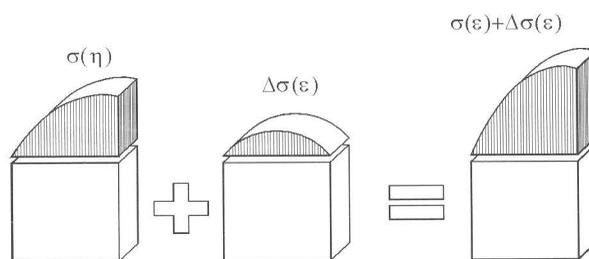


Figura 7: Primer y Segundo diagramas tensión-deformación, y diagrama completo.

Este diagrama tensión – deformación complejo se define como suma de dos diagramas: el primero de ellos $\sigma(\eta)$, que depende únicamente del valor de deformación en el punto, y el segundo $\Delta\sigma(\varepsilon)$, que depende del nivel de deformación general (figura 7).

El primer diagrama tensional es obtenido experimentalmente a partir de los ensayos siguiendo un procedimiento numérico que será explicado más adelante. Para el segundo diagrama tensión – deformación, se propone la siguiente expresión (ecuación 11):

$$\Delta\sigma(\varepsilon) = \frac{k(\varepsilon)}{h^2} \cdot x \cdot (h - x) \quad (11)$$

siendo:

$k(\varepsilon)$, el “coeficiente de tridimensionalidad”, que depende únicamente del nivel de deformación general. Este coeficiente también es obtenido siguiendo el mismo procedimiento numérico que el utilizado para obtener el primero de los diagramas.

Este diagrama tensional complejo presenta una propiedad muy interesante: satisface simultáneamente las dos condiciones de equilibrio para todo nivel de deformación. Esto hace que el diagrama pueda ser utilizado para el diseño de elementos de hormigón, no solo en el momento de rotura, sino también en régimen elasto-plástico.

A continuación se expone el procedimiento numérico para obtener tanto el primer diagrama tensión – deformación, como el coeficiente de tridimensionalidad.

Procedimiento numérico

Sean P_i , e_i and ϵ_i los parámetros anteriormente definidos en el instante "i". Se considera conocido el valor del primero de los diagramas hasta el instante "i-1". Se asume la hipótesis de distribución lineal de tensiones entre dos valores de deformación consecutivos ϵ_{j-1} y ϵ_j . En el instante i, la distribución de tensiones en la probeta es la que se recoge en la figura 8.

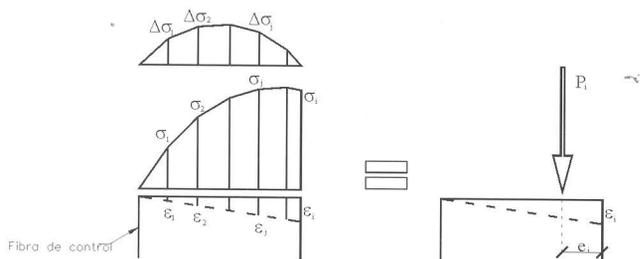


Figura 8: Distribución tensional para un determinado nivel de deformación.

La deformación en una fibra cualquiera se obtiene según la siguiente expresión (ecuación 12):

$$x_j = \frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \cdot h \tag{12}$$

Las ecuaciones de equilibrio quedan como siguen (ecuaciones 13 y 14):

$$\sum F = P_i$$

$$P_i = \sum_{j=0}^i \frac{\sigma_j + \sigma_{j+1}}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b + \sum_{j=0}^i \frac{\Delta\sigma_{j,i} + \Delta\sigma_{j+1,i}}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b \tag{13}$$

$$\sum M = P_i \cdot e_i$$

$$P_i \cdot (h - e_i) = \sum_{j=0}^i \frac{\sigma_j + \sigma_{j+1}}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b \cdot \left(x_j + \frac{2 \cdot \sigma_{j+1} + \sigma_j}{3 \cdot (\sigma_j + \sigma_{j+1})} \cdot (x_{j+1} - x_j) \right) + \sum_{j=0}^i \frac{\Delta\sigma_{j,i} + \Delta\sigma_{j+1,i}}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b \cdot \left(x_j + \frac{2 \cdot \Delta\sigma_{j+1,i} + \Delta\sigma_{j,i}}{3 \cdot (\Delta\sigma_{j,i} + \Delta\sigma_{j+1,i})} \cdot (x_{j+1} - x_j) \right) \tag{14}$$

Para el valor de tensión $\Delta\sigma_{j,i}$, se propone la siguiente expresión (ecuación 15).

$$\Delta\sigma_{j,i} = \frac{k_j}{h^2} \cdot x_j \cdot (h - x_j) \tag{15}$$

Considerando esta hipótesis, las ecuaciones 13 y 14 quedan de la siguiente manera (ecuaciones 16 y 17):

$$P_i = \sum_{j=0}^i \frac{\sigma_j + \sigma_{j+1}}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b + \frac{k_j}{h^2} \cdot \sum_{j=0}^i \frac{x_j \cdot (h - x_j) + x_{j+1} \cdot (h - x_{j+1})}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b \tag{16}$$

$$P_i \cdot (h - e_i) = \sum_{j=0}^i \frac{\sigma_j + \sigma_{j+1}}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b \cdot \left(x_j + \frac{2 \cdot \sigma_{j+1} + \sigma_j}{3 \cdot (\sigma_j + \sigma_{j+1})} \cdot (x_{j+1} - x_j) \right) + \frac{k_j}{h^2} \cdot \sum_{j=0}^i \frac{x_j \cdot (h - x_j) + x_{j+1} \cdot (h - x_{j+1})}{2} \cdot (x_{j+1} - x_j) \cdot b \cdot \left(x_j + \frac{x_{j+1} \cdot (h - x_{j+1}) + x_j \cdot (h - x_j)}{3 \cdot (x_j \cdot (h - x_j) + x_{j+1} \cdot (h - x_{j+1}))} \cdot (x_{j+1} - x_j) \right) \tag{17}$$

De las ecuaciones 16 y 17 es posible determinar, para cada nivel de deformación, los dos parámetros desconocidos: σ_j y k_j .

El resultado final del procedimiento numérico anteriormente descrito es la determinación de los dos siguientes diagramas [16]:

- $\sigma(\eta)$ Es el primero de los diagramas tensión-deformación anteriormente definidos, que depende únicamente de la deformación en el punto.
- $k(\epsilon)$ Este es el principal componente de $\Delta\sigma(\epsilon)$, Segundo de los diagramas tensión - deformación anteriormente definidos, que depende del nivel de deformación general del elemento.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

El parámetro más interesante observado es la evolución de la relación carga vertical-excentricidad de la carga. En este punto cabe decir que las probetas, en función de su forma, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Grupo 1: Este grupo incluye la sección rectangular y la triangular con deformación nula en arista.
- Grupo 2: Este grupo incluye la sección semicircular y la triangular con deformación nula en cara.

Fenómenos observados en las probetas pertenecientes al grupo 1

En las figuras 9 a 11 se recogen los resultados típicos de unos ensayos pertenecientes a este grupo 1. Como puede

observarse, al inicio del ensayo, la carga vertical se mantiene estática en torno al borde teórico del núcleo central. Este comportamiento se mantiene hasta que la deformación máxima alcanza un valor de aproximadamente 0,001.

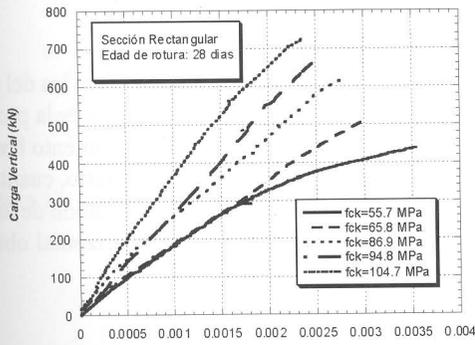


Figura 9: Relación carga vertical-deformación máxima.

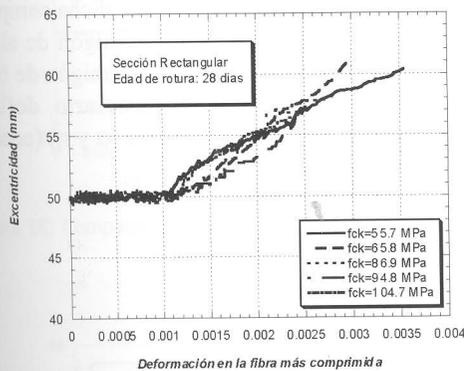


Figura 10: Relación excentricidad-deformación máxima.

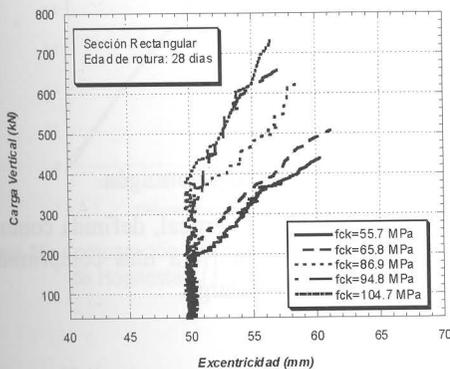


Figura 11: Relación carga vertical - excentricidad.

En ese momento, la carga vertical comienza a moverse hacia el centro de gravedad de la probeta. El valor del movimiento horizontal global depende de los siguientes factores:

- Resistencia a compresión del hormigón. Cuando mayor es la resistencia a compresión, menor es el movimiento horizontal medido.
- Edad de rotura: Cuanto mayor es la edad de rotura, menor es el movimiento horizontal medido.

- Forma de la probeta: La sección rectangular exhibe un movimiento horizontal mayor que la sección triangular con deformación nula en arista.

Este fenómeno observado coincide, en términos generales, con el descrito por Rüsck y Hognestad en la década de los 60 [1-5]. A raíz de estos resultados se propone el siguiente mecanismo de colapso para las probetas pertenecientes al grupo 1.

Cuando la carga vertical es pequeña, el comportamiento del hormigón puede considerarse como elástico. En la probeta de hormigón se desarrolla todo un complejo campo tridimensional de tensiones. Este comportamiento elástico ocurre hasta que la carga vertical alcanza un determinado valor. En ese momento, aparece en la probeta, una región de daño. En este caso, se considera que aparecen dos regiones de daño situadas en los puntos superior e inferior de la fibra más comprimida (figura 12).

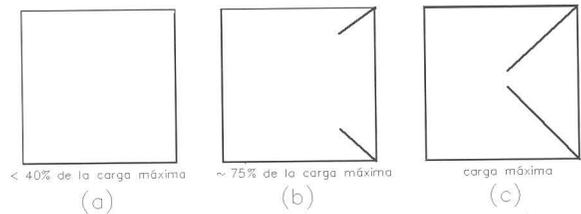


Figura 12: Propagación del daño en probetas pertenecientes al grupo 1.

Conforme continúa aumentando la carga vertical, así también lo hacen las regiones de daño. Éstas se mueven hacia el interior de la probeta siguiendo sendos planos inclinados. Esto provoca que la zona más comprimida de la probeta se debilite, y la carga vertical deba moverse hacia el interior con objeto de mantener la condición de ensayo (deformación vertical nula en fibra de control). La rotura ocurre cuando los dos planos de daño se encuentran. Esta explicación está de acuerdo con las investigaciones de Bazant [8].

Fenómenos observados en las probetas pertenecientes al grupo 2

En las figuras 13 a 15 se representan los resultados típicos de unos ensayos pertenecientes a este grupo 2. Al igual que ocurre con los ensayos del grupo 1, al principio del mismo, la

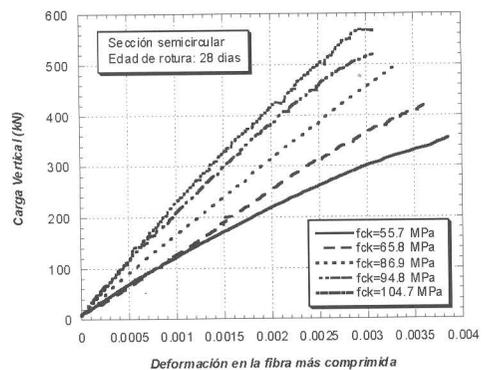


Figura 13: Relación carga vertical-deformación máxima.

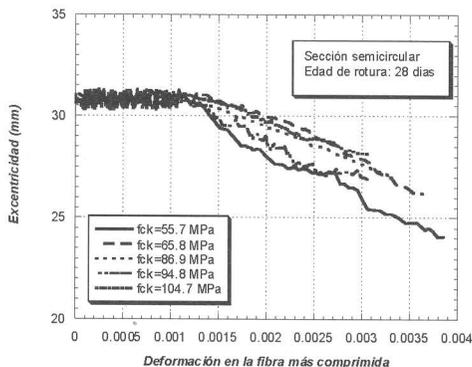


Figura 14: Relación excentricidad-deformación máxima.

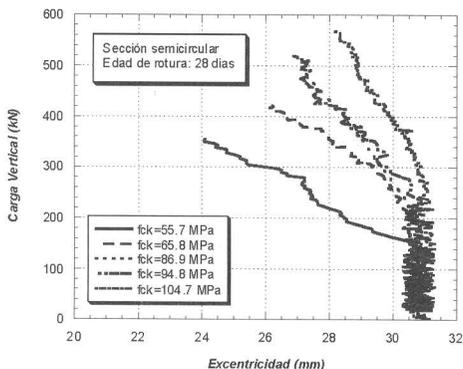


Figura 15: Relación carga vertical-excentricidad.

carga vertical se mantiene estática alrededor del borde teórico del núcleo central. Esto ocurre hasta que la deformación máxima alcanza un valor de aproximadamente 0,001.

En ese momento, la carga vertical comienza a moverse, pero a diferencia del caso anterior, el movimiento se produce hacia la fibra más comprimida. El valor del movimiento horizontal global depende de los mismos parámetros que en el caso anterior. Este fenómeno observado es nuevo y no ha sido descrito por ningún otro grupo de investigación.

El mecanismo de colapso propuesto para este caso es el que se recoge a continuación:

Para valores bajos de carga, el comportamiento del hormigón puede considerarse como elástico. Esto es cierto hasta que la deformación máxima del hormigón alcanza un determinado valor. A partir de este momento, aparece en la probeta una región de daño. A diferencia del caso anterior, se considera que el daño nace en el interior (figura 16).

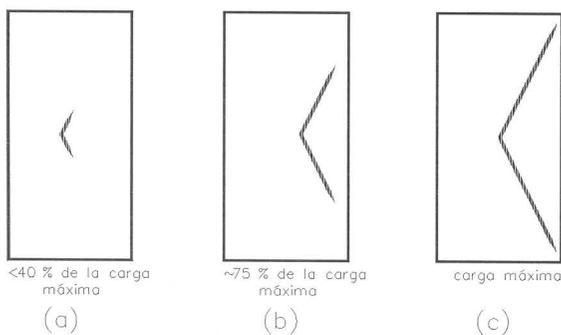


Figura 16: Propagación del daño en probetas pertenecientes al grupo 2.

Conforme la carga continúa aumentando, la región de daño va progresando. En este caso, el desarrollo es según dos planos oblicuos dirigidos hacia la fibra más comprimida. Esto provoca un debilitamiento del núcleo de la probeta. Es como si la probeta se ahuecase. En este caso, para poder mantener la condición de ensayo de deformación vertical nula en fibra de control, se hace necesario que la carga vertical se mueva hacia el exterior de la probeta.

Tanto para las probetas del grupo 1 como para las del grupo 2, cuanto más dúctil es el hormigón, más lenta es la propagación de la región de daño, y mayor es el movimiento horizontal observado de la carga vertical. Por el contrario, cuanto más frágil es el hormigón, más rápida es la propagación de los planos de rotura, y menor es el movimiento horizontal observado de la carga vertical.

6. COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR RÜSCH Y HOGNESTAD

Existen únicamente dos casos en los que dicha comparación es posible: probetas rectangulares de hormigón de alrededor de 45 MPa y probetas rectangulares de hormigón de 60 MPa. Previamente a la comparación es necesario definir los siguientes dos parámetros adimensionales (α y η) (ecuaciones 18 y 19):

$$\alpha = \frac{P}{b \cdot d \cdot f_c} \tag{18}$$

$$\eta = \frac{e}{d} \tag{19}$$

siendo:

- P: carga vertical
- b: anchura de las probetas
- d: canto de las probetas
- f_c : resistencia a compresión del hormigón
- e: excentricidad de la carga vertical, definida como la distancia horizontal entre la fibra más comprimida y el punto de aplicación de la carga.

Hormigón de 45 MPa

En este caso, es únicamente posible comparar nuestros resultados con los obtenidos por Rüsçh. Con los parámetros previamente definidos, se ha dibujado los diagramas de las figuras 17 y 18. Como se puede apreciar, los resultados de ambos trabajos de investigación son muy similares.

Hormigón de 60 MPa

En este caso es posible comparar nuestros ensayos con los desarrollados por Rüsçh y también por Hognestad (figuras 19 y 20). Se puede ver que los resultados también son bastante similares.

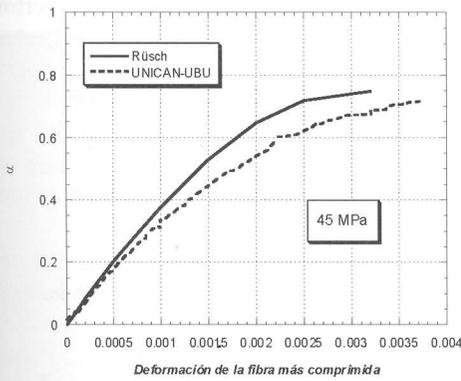


Figura 17: Comparación del parámetro α con los resultados de Rüsçh [3, 4].

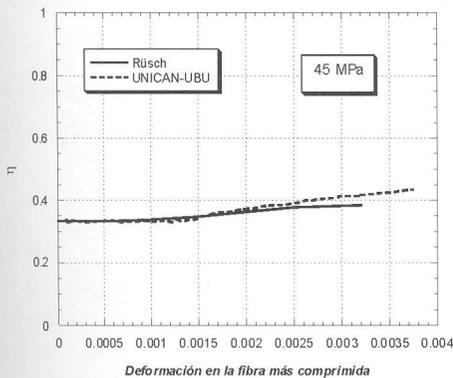


Figura 18: Comparación del parámetro h con los resultados de Rüsçh [3, 4].

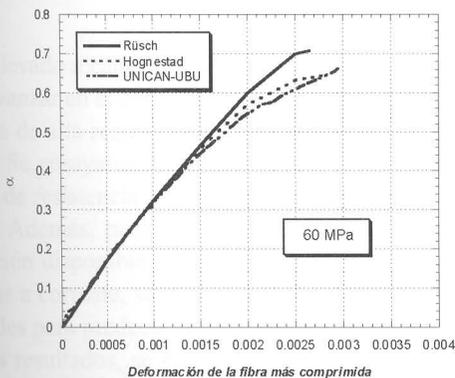


Figura 19: Comparación del parámetro α con los resultados de Hognestad [1, 2] y Rüsçh [3, 4].

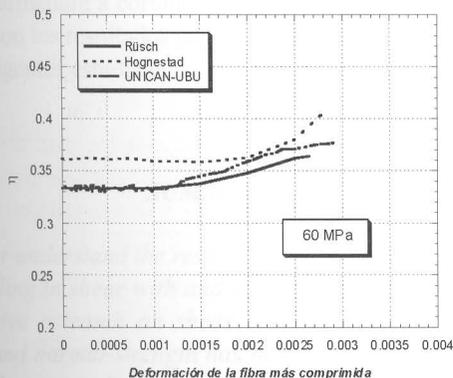


Figura 20: Comparación del parámetro η con los resultados de Hognestad [1, 2] y Rüsçh [3, 4].

7. CONCLUSIONES

De los resultados de este estudio se derivan las siguientes conclusiones:

- Una nueva máquina de ensayo ha sido desarrollada para obtener experimentalmente la distribución tensional en probetas de hormigón de diferente resistencia, incluyendo hormigones de alta resistencia. El procedimiento de ensayo supone una mejora sustancial con respecto al utilizado anteriormente por otros investigadores.
- Se ha llevado a cabo una amplia campaña de ensayos, en la que 240 probetas han sido ensayadas hasta rotura. Las variables de ensayo han sido la forma de la probeta, la edad de rotura y la resistencia del hormigón.
- No es posible establecer un relación biunívoca entre la tensión en un punto y su deformación únicamente, sino que la tensión vertical aplicada en un punto de la sección de la probeta depende de la deformación vertical de dicho punto y del nivel de deformación general de la pieza. Esto se traduce en que no es posible definir un diagrama tensión – deformación que cumpla de forma simultánea con las dos condiciones de equilibrio sobre la sección para todo nivel de carga.
- Existen dos modos de comportamiento diferente de los elementos de hormigón excéntricamente cargados, en función de la forma de la sección transversal. En las probetas pertenecientes al grupo 1, la carga vertical se mueve hacia el centro de gravedad. Por el contrario, en las probetas pertenecientes al grupo 2, la carga vertical se mueve hacia la fibra más comprimida.
- Este comportamiento puede tener influencia en el diseño de elementos de hormigón estructural, especialmente para el caso de las secciones pertenecientes al grupo 2. En este caso es posible obtener un mayor brazo mecánico en la sección, lo que implica menores esfuerzos de tracción en la armadura para resistir un determinado esfuerzo de flexión, así como una menor cantidad de armadura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen sinceramente la ayuda ofrecida por las universidades de Cantabria y Burgos. Asimismo se agradece la colaboración de las empresas PRECON S.A., BETTOR-MBT y SIKA. Se agradece de igual forma a la Unión Europea por los fondos concedidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. McHenry, D.; Hanson, N.W.; Hognestad, E. "Concrete stress distribution in ultimate strength design". Journal of the American Concrete Institute. Diciembre 1955.
2. Mattock, A.H.; Kriz, L.B. Hognestad, E. "Rectangular concrete stress distribution in ultimate strength design". Journal of the ACI. Febrero 1961.

3. Rüsç, H. "Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone. Festigkeit und Verformung des exzentrisch gedrückten Rechteckquerschnittes aus unbewehrtem Beton bei kurzzeitiger Lasteinwirkung". Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. 1955.
4. Rüsç, H.; Kordina, K.; Stöckl, S. "Festigkeit der Biegedruckzone. Vergleich von Prismen- und Balkenversuchen". Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. 1967.
5. Rasch, C. "Spannungs - Dehnungs - Linien des Beton und Spannungsverteilung in der Biegedruckzone bei konstanter Dehngeschwindigkeit". Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. 1962.
6. Griffith, A.A. "The theory of rupture". Proceedings of the First International Conference of Applied Mechanics. 1924.
7. Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.E. "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements". Cement Concrete Res. 1976.
8. Bazant, J.P.; Planas, J. "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials". Ed. CRC Press. 1998.
9. Markeset, G. "Failure of concrete under compressive strain gradients". NTH Universitetet i Trondheim. 1993.
10. Markeset, G. "Eccentrically loaded prisms of high strength concrete". 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. Paris 1996.
11. Meyer, J. "Improving the ductility of high performance concrete". Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Leipzig. LACER N° 3, 1998.
12. Meyer, J.; Sint, A. "Calculation of the load - deformation behaviour of over-reinforced concrete beams with the BDZ Model". , Universität Leipzig. LACER N° 4, 1999.
13. Foster, S.J.; Attard, M.M. "Experimental tests on eccentrically loaded high -strength concrete columns". ACI Structural Journal. Marzo 1997.
14. Ahmad, S.H.; Shah, S.P. "High Performance Concretes and Applications". Edward Arnold Publications. 1994.
15. Shah, S.P.; Swartz, S.E.; Ouyang C. "Fracture Mechanics of Concrete". Wiley Interscience. 1995.
16. Vicente, M.A. "Estudio del comportamiento en flexocompresión de los hormigones de alta resistencia.". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica. Universidad de Cantabria. Febrero 2001.
17. González, D.C. "Desarrollo de nuevos diagramas tensión-deformación para el dimensionamiento en E.L.U. de elementos de hormigón estructural de alta resistencia". Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Burgos. Noviembre 2002.
18. Arenas, J.J.; Gutiérrez, G.; Vicente, M.A.; González D.C. "Behaviour of high strength concrete under combined bending and compression". ACI Journal of Materials. Aceptado para publicar.