

CARACTERIZACIÓN DE LA DUCTILIDAD Y DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN VARIABLE DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

G. Ruiz, J. R. Del Viso y J. R. Carmona

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Castilla-La Mancha, Avenida Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, España.

E-mail: Javier.RdelViso@uclm.es

Tfno: 926 29 53 00 Ext. 6311. Fax: 926 29 53 91

Resumen. Este trabajo trata sobre el comportamiento mecánico del hormigón de alta resistencia cuando se ensaya a compresión y en control de deformación. Los ensayos se realizan a cuatro velocidades de deformación diferentes, en el rango de 1.5×10^{-3} a $5.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$. Los resultados obtenidos permiten cuantificar la ductilidad del material. Por ejemplo, la deformabilidad del hormigón de alta resistencia en carga máxima es superior a la de un hormigón convencional de comparación. Además, la densidad de energía necesaria para romper el hormigón de alta resistencia es un 70% mayor que la necesaria en el caso del convencional. En este sentido se puede decir que el hormigón de alta resistencia es más dúctil que el convencional. Sin embargo, la longitud característica del hormigón de alta resistencia es la mitad que la del convencional que hemos usado para comparar resultados, lo cual significa que es más frágil en los procesos en los que la fractura del hormigón es dominante.

Abstract. We investigate the mechanical behavior of high strength concrete in compression and tested in strain control. The tests are performed at four strain rates that go from 1.5×10^{-3} to $5.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$. Our results allow us to quantify the ductility of this particular concrete. For instance, the strain at maximum load is bigger than in the case of normal concrete specimens used as a reference. Besides, the energy density required to fully exhaust the carrying capacity of the high strength material is 70% bigger than that of the reference. In this sense we can affirm that our high strength concrete is more ductile than conventional concrete. Nonetheless, its characteristic length is half of that of the reference, which means that our high strength concrete would behave in a brittle fashion in damage processes where fracture is dominant.

Areas temáticas propuestas: Aplicaciones Prácticas en Ingeniería.

Palabras clave: Hormigón de Alta Resistencia, Ductilidad, Velocidad de Deformación Variable.

1. INTRODUCCIÓN

Las diferencias principales entre un hormigón de alta resistencia y un hormigón convencional vienen determinadas por la mayor densidad, mayor uniformidad y menor porosidad de la pasta de cemento del hormigón de alta resistencia con respecto al convencional. En el caso del hormigón de alta resistencia es normal que queden en la pasta partículas de cemento sin hidratar. Dichas partículas son más resistentes que los productos que las rodean, resultantes de los procesos de hidratación del cemento, y son en gran parte las responsables de la ganancia de resistencia del hormigón. Además, reducen sensiblemente la permeabilidad de la matriz —pasta de cemento endurecida—, con lo cual se consigue mayor durabilidad. Por otra parte, el aumento de resistencia está acompañado normalmente por un aumento del módulo de elasticidad, ya que la rigidez de la matriz se aproxima a la de los áridos. Si, como ocurre en la presente investigación, se utiliza humo de sílice, la estructura de la intercara entre la matriz y los áridos se densifica, lo cual contribuye todavía más tanto al aumento de resistencia como a la disminución de la permeabilidad.

Si nos centramos en los aspectos puramente mecánicos se sabe, como ya hemos indicado, que el aumento de la resistencia a compresión del hormigón conlleva un aumento de la pendiente de ascenso de la curva tensión-deformación (σ - ϵ). En el entorno de la carga máxima comienzan a generarse los procesos de microfisuración que conducen a la pérdida de resistencia. Para el mismo nivel de deformación el hormigón de alta resistencia se microfisura menos que el hormigón convencional. Además, la microfisuración apenas afecta a los granos de cemento no hidratados ni a la intercara entre la matriz y los áridos. Al aumentar la deformación, las microfisuras coalescen hasta formar grietas cuya evolución puede ser muy rápida debido a la alta cantidad de energía elástica almacenada en el material [1,2]. El proceso de rotura llega a ser estable en algunas condiciones, especialmente cuando se reduce el tamaño de la probeta —y consiguientemente la cantidad de energía elástica almacenada— y si el ensayo se realiza en control de deformación. Se puede entonces registrar la curva de ablandamiento en compresión, es decir, la rama descendente de la curva σ - ϵ . La pendiente de dicha rama es mayor, en valor absoluto, que la de un hormigón convencional.

Normalmente el ensayo de compresión se realiza en control de carga y con probetas cilíndricas de 150×300 mm (diámetro \times altura), lo cual conduce, en el caso del hormigón de alta resistencia, a una rotura muy inestable, casi explosiva.

El parámetro que mejor describe la fragilidad intrínseca del hormigón es la "longitud característica", l_{ch} . Como su nombre indica, es un parámetro con dimensiones de longitud y que está relacionado, junto a las condiciones de contorno y de carga, con la longitud de la zona de fractura. Valores pequeños de l_{ch} indican fragilidad intrínseca del material. Cuanto mayor sea l_{ch} el hormigón se comportará de manera más dúctil. En hormigones convencionales la longitud característica toma valores en la horquilla de 250 a 350 mm; en hormigones de alta resistencia esperamos valores de l_{ch} menores.

Sin embargo, el comportamiento frágil o dúctil en un determinado elemento estructural no depende únicamente de l_{ch} . La geometría, las condiciones de contorno y, muy especialmente, el tamaño de la pieza condicionan el tipo de comportamiento. Por ejemplo, si comparamos vigas en masa o con poca armadura, fabricadas con el mismo hormigón y estrictamente homotéticas entre sí, comprobaremos que las vigas pequeñas son más dúctiles y, proporcionalmente a su tamaño, resisten más. Las vigas grandes resisten, en proporción, menos que las pequeñas y, además, tienen un comportamiento más frágil. Este fenómeno es normalmente conocido como "efecto de escala" y tiene su origen en la diferente manera en que se desarrollan los procesos de fractura dentro del elemento estructural [2, 3, 4].

Otro factor a tener en cuenta en la realización de este tipo de ensayos es la velocidad de deformación. En realidad, no hay ningún aspecto de la respuesta tensodeformacional del hormigón que sea independiente de la velocidad de deformación [5]. Esta dependencia se atribuye en primer lugar al comportamiento viscoelástico de la pasta de cemento originado por el flujo viscoso del agua a través de su red de poros. A mayor contenido de agua, mayor sensibilidad del hormigón a la velocidad de deformación [6].

Los factores mencionados en los párrafos anteriores inducen a pensar que el hormigón de alta resistencia es menos sensible que el convencional a la velocidad de deformación ($d\varepsilon/dt$). Sin embargo, no hemos encontrado suficiente evidencia a este respecto en la bibliografía científica. Por otro lado, ni siquiera en el caso de hormigones convencionales se encuentran datos para velocidades de deformación inferiores a $3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Por todo ello nos ha parecido necesario realizar este estudio con el objeto de caracterizar la ductilidad y el comportamiento mecánico a velocidad de deformación variable de hormigones de alta resistencia.

A continuación, en la sección 2, explicamos el planteamiento del programa experimental. La sección 3 está dedicada al material y probetas utilizadas durante la campaña de ensayos, mientras que la metodología empleada se resume en la sección 4. En la 5 presentamos

una selección de los resultados y en la sección 6 pasamos a comentar sus tendencias más significativas. El artículo termina sacando una serie de conclusiones (sección 7).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental a realizar se basa en los antecedentes científicos descritos en la sección anterior y en algunos condicionantes particulares de este proyecto. Se trata de obtener la curva σ - ε a diferentes velocidades de deformación de un hormigón de alta resistencia. Debido a que el material debe ser muy resistente, y previsiblemente muy frágil, son necesarios los siguientes puntos:

1. En primer lugar, es necesario caracterizar cuantitativamente la fragilidad o ductilidad del material a través de la longitud característica, l_{ch} , según la siguiente ecuación:

$$l_{ch} = \frac{E_c G_F}{f_t^2} \quad (1)$$

Donde:

- E_c es el módulo de elasticidad (medido sobre cilindro estándar de 15×30 cm, probeta C1).
- f_t es la resistencia a tracción indirecta (Compresión diametral medida sobre cilindro C1).
- G_F es la energía de fractura (ensayo a flexión en tres puntos medido sobre prismas entallados de $10 \times 10 \times 42$ cm, probeta G_F).

Con este parámetro podemos seleccionar el tamaño de probeta óptimo para realizar el ensayo de compresión.

2. Una vez conocida la longitud característica podríamos seleccionar el tamaño de probeta óptimo para realizar ensayos de compresión en control de deformación para obtener la curva σ - ε completa a varias velocidades de deformación. Vamos a elegir entre la probeta cilíndrica de 10×20 cm (C2) —la cual se suele usar en el caso de hormigones de alta resistencia— y el cilindro de 7.5×15 cm (C3). Esta probeta puede resultar aceptable para hormigones de alta resistencia, ya que esperamos una longitud característica corta.

Es prudente confirmar que el tamaño de la probeta elegida es realmente representativo. Esto lo podemos conseguir por medio de un análisis de las propiedades mecánicas estándar obtenidas ensayando probetas de los tres tamaños.

3. Finalmente, las velocidades de deformación vienen dadas por la capacidad para controlar su movimiento de la máquina de ensayo disponible. Además, queremos barrer un rango de velocidades muy amplio. La variable de control va a ser la distancia entre los platos de compresión, δ , y las velocidades de movimiento seleccionadas son las indicadas en la Tabla 1, donde las velocida-

des de deformación media se calculan como δ/L , siendo L la altura de la probeta. La velocidad más lenta se multiplica por $10^{1.5}$ para conseguir la siguiente velocidad, y así sucesivamente se obtienen las cuatro velocidades. Las velocidades propuestas se mueven en un rango de 4.5 órdenes de magnitud.

Tabla 1. Velocidades de deformación media

Velocidad de deformación media	Tiempo aproximado de ensayo
$5.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$	30 horas
$1.7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	60 min
$5.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$	1.5 min
$1.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$	3 s

3. MATERIALES Y PROBETAS

El material que ensayamos es un hormigón de alta resistencia que emplea como árido grueso una andesita con partículas de un tamaño máximo de 12 mm. El cemento que se emplea es un CEM I 52.5 R; además, se usa humo de sílice y fluidificante (B-255 Bettor). La relación agua/cemento es de 0.28. Los diferentes tipos de probetas ensayadas se clasifican en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de probetas

Tipo	Nombre	Dimensiones (mm)
cilíndrica	C1	150 × 300
cilíndrica	C2	100 × 200
cilíndrica	C3	75 × 150
prismática	GF	100 × 100 × 420

En la Tabla 3 exponemos los resultados obtenidos en la caracterización del hormigón de alta resistencia.

Tabla 3. Características del HAR

	f_c MPa	f_{is} MPa	E_c GPa	G_F N/m	l_{ch} mm
media	106.5	6.3	38.3	140.2	135
desv. est.	2.1	0.6	0.6	17.3	—

Selección del tamaño óptimo

Hemos resumido las propiedades mecánicas estándar del hormigón de alta resistencia en la Tabla 3. La longitud característica, l_{ch} , que resulta de aplicar la fórmula (1) es, como indica la tabla 3, de 135 mm.

En la sección 2 ya hemos explicado que si relacionamos una dimensión representativa de la probeta cilíndrica — por ejemplo el diámetro D — con l_{ch} tendremos un número de fragilidad adimensional, $\beta = D/l_{ch}$, que caracteriza la fragilidad del comportamiento de la probeta.

Cuanto mayor sea β , más frágil será la probeta. Inversamente, la probeta será más dúctil cuando β adopte valores pequeños. Dos cilindros con la misma relación D/l_{ch} se comportarán de forma análoga en un ensayo de compresión con las mismas condiciones de contorno y velocidad de deformación.

La selección del tamaño óptimo entre las probetas C2 y C3 lo podemos hacer comparando sus respectivos valores de β , 0.74 y 0.56, con los de un hormigón convencional en probeta C1. El valor de la longitud característica l_{ch} de un hormigón convencional varía entre 250-300 mm —tomaremos 275 mm—, por lo que $\beta = 150/275 = 0.55$. Si buscamos el tamaño que mejor se ajusta a este número de fragilidad para el hormigón de alta resistencia ($\beta_{HC} = \beta_{HAR}$) es inmediato ver que es la probeta C3 la que va a tener un comportamiento parecido a la C1 con un hormigón convencional.

4. METODOLOGÍA EMPLEADA

Ensayos σ - ϵ en control de deformación

Hemos realizado ensayos σ - ϵ en control de deformación sobre probetas C3 y a varias velocidades. Como hemos indicado anteriormente, hemos tomado como variable de control la distancia entre platos de compresión, δ . Es una variable que mide el acortamiento total de la probeta sin tener en cuenta la deformación del marco de la máquina ni del utillaje que se utilice. Podemos verdaderamente hablar de control de la deformación, ya que si dividimos δ por la altura de la probeta tendremos una medida de la deformación media, incluyendo las condiciones de contorno cerca de los apoyos. Además, δ es una medida muy estable en la que se difuminan los posibles desplazamientos debidos a la aparición de grietas en la rama de descarga. Como podemos observar en la foto de la Fig. 1, la medida de δ la hemos hecho promediando las lecturas de dos LVDTs Solartron de ± 2.5 mm colocados en los extremos opuestos de un diámetro de los platos de compresión de la máquina de ensayos; por supuesto la rótula se ha bloqueado al inicio de cada ensayo, de manera que la rotación de cualquier sección sólo podría deberse a la excentricidad de la carga por una incorrecta colocación de la probeta, lo cual se ha intentado reducir al mínimo.

Además, hemos realizado la medida del acortamiento de la zona de deformación constante de las probetas (aproximadamente, el tercio intermedio) con dos extensómetros tipo clip Instron 2630, que están especialmente diseñados para aguantar la rotura de una probeta de acero a tracción y, en consecuencia, han resistido sin dañarse la rotura del hormigón de alta resistencia. Hemos adaptado los clips a las probetas de hormigón cambiando las cuchillas de filo por unas cuchillas de punta. También hemos comprobado que las medidas del módulo de elasticidad obtenidas con los clips 2630 son idénticas a las obtenidas con otros extensómetros disponibles (Instron 2620, más precisos pero que no se pue-

den llevar a rotura). La foto de la Fig. 1 muestra los dos clips montados sobre una probeta. También se puede observar que la probeta está zunchada con cinta aislante. Ésto nos ha servido para (1) mantener todos los fragmentos de la probeta rota en su sitio y poder así estudiar mejor así el patrón de fisuración; y (2) para evitar en lo posible el intercambio de humedad con el ambiente del Laboratorio, lo cual es especialmente importante en los ensayos largos —algunos, de más de 30 horas—. Las fuerzas transversales que produce un zunchado de cinta aislante sobre una probeta de hormigón de alta resistencia son perfectamente despreciables.



Fig. 1. Probeta C3 con los dos extensómetros tipo clip 2630 montados para medir la deformación hasta rotura y los dos LVDTs utilizados para controlar el ensayo y medir la deformación media.

5. RESULTADOS

La Fig. 2 muestra una de las curvas σ - ϵ obtenidas en los ensayos a velocidad muy lenta. Para cada velocidad se realizaron cuatro ensayos. De cada uno de ellos se han obtenido la velocidad de deformación real, $d\epsilon/dt$, los módulos de elasticidad secante y tangente, E_o y E_{sec} , la resistencia máxima y la deformación en carga máxima, σ_c y ϵ_c , así como la tensión y la deformación últimas.

Tabla 4. Resultados experimentales

Velocidad de deformación media (s ⁻¹)		$d\epsilon/dt$ (s ⁻¹)	E_o (GPa)	E_{sec} (GPa)	σ_c (MPa)	ϵ_c (%)
1.7×10^{-3}	media	1.5×10^{-3}	44.0	37.5	112.1	0.34
	desv. est.	8.5×10^{-5}	1.6	4.5	9.0	0.03
5.5×10^{-5}	media	4.5×10^{-5}	42.9	37.5	102.3	0.34
	desv. est.	3.7×10^{-6}	6.0	1.1	4.6	0.03
1.7×10^{-6}	media	1.4×10^{-6}	37.7	36.1	97.7	0.36
	desv. est.	1.1×10^{-7}	1.1	0.6	1.8	0.03
5.5×10^{-8}	media	4.7×10^{-8}	32.8	31.7	88.1	0.39
	desv. est.	5.9×10^{-9}	2.7	1.3	5.3	0.03

En la Tabla 4 se indican los valores medios de los resultados obtenidos para cada tipo de ensayo y la desviación estandar.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección analizamos los resultados experimentales que se han presentado. Nos interesan especialmente la deformabilidad y el comportamiento en fractura del hormigón de alta resistencia, ya que ambos van a caracterizar su ductilidad.

6.1. Ductilidad

Longitud característica

La longitud característica es un parámetro adecuado para caracterizar la fragilidad o ductilidad intrínseca del material en lo que respecta a su comportamiento en fractura. Al elegir el tamaño adecuado para la probeta cilíndrica con la que realizar los ensayos ya hemos hecho un pequeño estudio comparativo basándonos en la longitud característica del material l_{ch} . El hormigón de alta resistencia que hemos estudiado tiene una l_{ch} de 135 mm. Por otro lado, podemos estimar que el valor de la l_{ch} de un hormigón convencional usado en construcción varía entorno a los 250-300 mm, es decir, aproximadamente el doble. Desde este punto de vista, podemos decir que el hormigón de alta resistencia sería la mitad de dúctil que el convencional, lo cual nos ha permitido elegir como probeta idónea para nuestros ensayos el cilindro de tamaño C3.

Es importante recordar que tanto la longitud de un proceso de fractura en el hormigón como la capacidad de dicho proceso para disipar energía son proporcionales a l_{ch} . Por tanto, y como ya hemos explicado anteriormente, dos estructuras semejantes y que tengan la misma proporción de sus dimensiones con l_{ch} van a generar, en fractura —o si se prefiere, estado límite último— procesos de fisuración semejantes y con dimensiones proporcionales entre sí. Es en este sentido en el que l_{ch} caracteriza la ductilidad o fragilidad intrínseca del hormigón, es decir, l_{ch} habla fundamentalmente de la ductilidad asociada a procesos de fractura, pero no da información sobre otras propiedades para determinar la ductilidad del material. La más relevante es, a nuestro juicio, la deformación en carga máxima, cuyo análisis exponemos a continuación.

Deformación en carga máxima

Con la experimentación realizada hemos observado que la deformación en carga máxima del hormigón de alta resistencia es sensiblemente mayor que la de un hormigón convencional de referencia —que hemos tomado en el laboratorio— en todo el rango de velocidades estudiadas. Pero hasta incluso para el caso de las velocidades más rápidas se sigue cumpliendo lo mismo. Por

tanto, podemos decir que la deformabilidad del hormigón de alta resistencia en el tramo ascendente de la curva σ - ϵ es excelente y, en este sentido, podemos decir que se trata de un hormigón más dúctil que uno convencional, aunque no obstante debemos estudiar el material teniendo en cuenta la rama de ablandamiento o rama descendente de la curva σ - ϵ .

Rama de ablandamiento de la curva σ - ϵ

La Fig. 2 compara la curva σ - ϵ completa de uno de los ensayos, el C3_19_V1, y la curva de otra probeta de un hormigón convencional de referencia que hemos tomado en el laboratorio. Ambos ensayos están hechos a velocidad muy lenta. En el caso de la probeta de hormigón convencional se consiguió medir parte de la curva de ablandamiento a pesar de que el control del ensayo se hacía con la variable de posición del actuador.

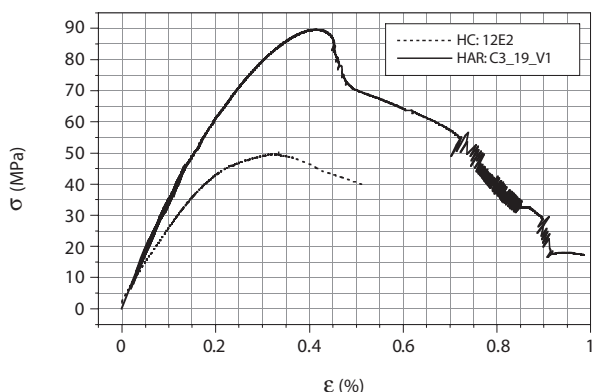


Fig. 2. Curvas σ - ϵ correspondientes a las probetas C3_19_V1 de HAR y otra de hormigón convencional tomada de referencia en laboratorio.

En la Fig. 2 se observa que la curva del hormigón de alta resistencia se mantiene en todo momento por encima de la del hormigón convencional y, por lo tanto, la densidad de energía necesaria para romper completamente la probeta es mayor. En concreto, el área bajo la curva σ - ϵ en el caso de la probeta de hormigón convencional —prolongando la rama descendente hasta que corte con el eje de abscisas— vale 0.32 MJ/m^3 , mientras que el valor análogo en el caso de la probeta C3_19_V1 es de 0.54 MJ/m^3 . En este caso particular hay que emplear casi un 70% más de energía por unidad de volumen para romper el material por completo en compresión. Si utilizásemos este dato para caracterizar la ductilidad del material podríamos decir que el hormigón de alta resistencia es más dúctil que el hormigón convencional con el que lo estamos comparando.

Sin embargo, esta densidad de energía no se consume de manera uniforme dentro del material. Los patrones de fisuración muestran claramente que, al pasar la carga máxima, se producen fracturas inclinadas que nacen en los bordes de las bases del cilindro. Estas fracturas terminan nucleándose en una fractura principal que atra-

viesa al cilindro diagonalmente. Lógicamente, el proceso de fisuración consume energía fundamentalmente en la superficie en la superficie de la fractura, no en el volumen. Además, a partir de un determinado momento empieza a actuar también la fricción entre los planos que intenten moverse. Por ello la cola de la curva de ablandamiento no tiende a cero, sino a un valor positivo constante que tiene que ver con el rozamiento entre las dos partes de la superficie rota. En el caso de que el hormigón estuviera confinado este valor de resistencia residual podría ser muy alto.

6.2. Comportamiento mecánico en función de la velocidad de deformación

Variación de la resistencia a compresión con la velocidad de deformación

La Fig. 3 muestra la variación de la resistencia a compresión del hormigón de alta resistencia que estamos estudiando con la velocidad de deformación, $d\epsilon/dt$. Para representar la Fig. 3 hemos utilizado el siguiente ajuste:

$$\sigma_c = 126 + 5.1 \log(d\epsilon/dt) \quad (2)$$

El coeficiente de regresión del ajuste de la resistencia a compresión en (2) es 0.991, y su curva está representada a trazos en la Fig. 3. La ecuación (2) indica que σ_c tiene una variación exponencial con $d\epsilon/dt$. Sin embargo, los parámetros que tienen que ver con la deformación (ϵ_c y E) experimentan una inflexión en torno a la velocidad estándar, lo cual puede indicar que hay un cambio físico en el mecanismo de la deformación. Probablemente, y teniendo en cuenta los antecedentes ya expuestos en la introducción, a velocidades lentas y muy lentas el agua puede fluir a través de la red de poros; sin embargo, a velocidades rápidas y muy rápidas el agua se queda bloqueada.

La longitud característica, l_{ch} , mantiene un valor casi constante durante un rango de velocidades de deformación muy extenso. Únicamente disminuye para velocidades de deformación muy lentas.

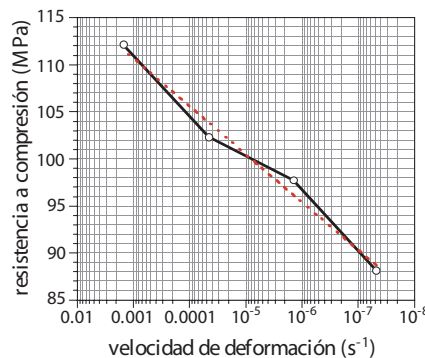


Fig. 3. Variación de la resistencia a compresión con la velocidad de deformación.

7. CONCLUSIONES

Hemos realizado un programa experimental para determinar la ductilidad y el comportamiento mecánico a velocidad de deformación variable de un hormigón de alta resistencia. Ha consistido en ensayos de caracterización estándar y de energía de fractura para poder determinar la longitud característica del material, l_{ch} , que ha resultado ser de 135 mm, aproximadamente la mitad que la de un hormigón convencional. Por ello, hemos seleccionado un cilindro de 75 × 150 mm como probeta óptima para realizar ensayos σ - ϵ , ya que la relación entre sus dimensiones con la longitud característica es similar a la que existe entre el cilindro estándar y la l_{ch} de un hormigón convencional.

El análisis del conjunto de los resultados experimentales ha permitido determinar la deformabilidad de este hormigón. Lo hemos comparado con un hormigón convencional de referencia con los siguientes puntos relevantes:

- La longitud característica del hormigón de alta resistencia es la mitad que la del convencional. Eso significa que es la mitad de dúctil en los procesos en los que la fractura del hormigón es dominante. También indica que este hormigón se comportaría, en fractura, igual que el convencional si el tamaño de la estructura fuera la mitad.
- La deformabilidad del hormigón de alta resistencia en carga máxima es superior a la del hormigón convencional. Por ejemplo, en el caso del ensayo a velocidad muy lenta hemos obtenido una deformación crítica del 0.39% (media de cuatro ensayos), superior en un 34% a la deformación crítica equivalente en el caso del hormigón convencional.
- La densidad de energía necesaria para romper completamente el hormigón de alta resistencia en compresión —en nuestras condiciones de ensayo— es, aproximadamente, un 70% superior a la correspondiente al hormigón convencional.
- La rama de ablandamiento de las curvas σ - ϵ contiene una componente debida al desplazamiento de las superficies de fractura que se forman al romperse la probeta. Esto genera una inflexión en la curva de ablandamiento que puede ser más o menos acusada en función de la posición relativa con respecto al plano principal de fisuración de los extensómetros que se usan para medir la deformación. Este desplazamiento —o su deformación asociada— deben tenerse en cuenta al hacer cálculos estructurales siempre que haya suficiente confinamiento.

AGADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la empresa OHL por la financiación concedida. Javier Rodríguez del Viso y Jacinto Ruiz Carmona agradecen a la JCCM y al Fondo Social Europeo la beca pre-doctoral concedida.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Gettu, Z. P. Bazant, and M. E. Karr. Fracture properties and brittleness of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 87(6):608–618, 1990.
- [2] Z. P. Bazant and J. Planas. *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1998.
- [3] G. Ruiz, M. Elices, and J. Planas. Experimental study of fracture of lightly reinforced concrete beams. *Materials and Structures*, 31:683–691, 1998.
- [4] G. Ruiz, M. Elices, and J. Planas. Size effect and bond-slip dependence of lightly reinforced concrete beams. In A. Carpinteri, editor, *Minimum Reinforcement in Concrete Members*, pages 67–97. Elsevier, London, 1999.
- [5] S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin. *Concrete*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, second edition, 2003.
- [6] S. A. Kaplin. Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 32(111):79–88, 1980.
- [7] ACI Committee 363. *State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete—ACI 363R-92*. Technical report, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2001.
- [8] D. Darwin, S. Barham, R. Kozul, and S. Luan. Fracture energy of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 98(5):410–417, 2001.
- [9] CEB-FIP. *Model Code 1990, Final Draft*. Technical Report 203–205, EFP Lausanne, 1991.
- [10] A. J. Zielenski and R. W. Reinhardt. Stress-strain behavior of concrete and mortar at high rates of tensile loading. *Cement and Concrete Research*, 12(3):309–319, 1982.
- [11] G. Ruiz, M. Ortiz, and A. Pandolfi. Three-dimensional finite-element simulation of the dynamic Brazilian tests on concrete cylinders. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48:963–994, 2000.
- [12] I. Jawed, G. Childs, A. Ritter, and S. Winzer. High-strain-rate behavior of hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 17(3):433–440, 1987.
- [13] C. Rocco, G. V. Guinea, J. Planas, and M. Elices. Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: experimental verification. *Materials and Structures*, 32:210–217, 1999.
- [14] RILEM TC 50-FMC. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of the three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18:285–290, 1985. (RILEM Draft Recommendation, TC 50-FMC Fracture Mechanics of Concrete).
- [15] G. V. Guinea, J. Planas, and M. Elices. Measurement of the fracture energy using three point bend tests. 1. Influence of experimental procedures. *Materials and Structures*, 25:121–218, 1992.
- [16] J. Planas, M. Elices, and G. V. Guinea. Measurement of the fracture energy using three point bend tests. 2. Influence of bulk energy dissipation. *Materials and Structures*, 25:305–312, 1992.
- [17] M. Elices, G. V. Guinea, and J. Planas. Measurement of the fracture energy using three point bend tests. 3. Influence of cutting the P- δ tail. *Materials and Structures*, 25:327–334, 1992.