

HORMIGONES DE ALTA PERFORMANCE CON FIBRAS DE ACERO: Evaluación de su comportamiento mecánico

GIACCIO, G.* , ZERBINO, R.** y GETTU, R.***

RESUMEN

En este trabajo se presentan algunos resultados obtenidos en LEMIT correspondientes al proyecto de cooperación entre UNLP-LEMIT y UPC (Cataluña, España) sobre el empleo de fibras de acero en hormigones con elevados niveles de resistencia. Se evalúa el comportamiento de hormigones simples y reforzados bajo solicitaciones de compresión y flexión, incluyendo en este último caso diferentes tipos de probetas, configuraciones de ensayo, y distintos tipos y contenidos de fibras. Se discuten los cálculos de tenacidad y resistencia residual conforme los lineamientos de ASTM C 1018. Los resultados muestran cómo es posible caracterizar a los hormigones reforzados empleando probetas con distinta geometría y diferenciar el tipo o contenido de fibras utilizados en cada caso. Asimismo se observa el efecto del tipo de acero de las fibras y del contenido de refuerzo en hormigones con resistencias del orden de 70 MPa.

INTRODUCCIÓN

La idea de incorporar fibras a materiales cuasifrágiles del tipo del hormigón data de la década del '70. Entonces el principal objetivo de la introducción del refuerzo se centraba en la mejora de la resistencia a tracción del material y de su capacidad para el control de fisuras y absorción de energía durante la rotura. Estos hormigones con fibras (HRF) tuvieron su mayor éxito en campos de aplicación específicos como el revestimiento de túneles y la reparación de pavimentos o tableros de puentes (1).

Durante la década del '80 se desarrollan los hormigones de altas resistencias que basados en la disponibilidad de aditivos superfluidificantes, de adiciones minerales de alta efectividad como la microsílíce y en un mejor diseño de mezclas dan lugar a un hormigón donde no sólo se incrementa la resistencia sino también se mejora la trabajabilidad y se reducen la porosidad y permeabilidad.

* Investigador CIC. LEMIT, UNLP. Profesor Fac. Ing. (UNLP)
** Investigador CONICET. LEMIT, UNLP. Profesor Fac. Ing. (UNLP)
*** Investigador y Director del laboratorio ETSECCPB-UPC (Barcelona)

A diferencia de otros hormigones especiales el campo de aplicación de estos hormigones resulta sumamente amplio. Una de las causas fundamentales que ha fomentado el interés y empleo de los mismos ha sido su excelente capacidad para sobrellevar condiciones ambientales o de aplicación particulares, dando lugar a estructuras con una vida en servicio más extendida (2).

Pero el incremento de resistencia trae el inconveniente de aumentar la fragilidad relativa del material. Una forma, probablemente la mejor, de atenuar este efecto en alto grado es incorporar fibras dentro del hormigón; para este propósito no será imprescindible incorporar cantidades elevadas de refuerzo sino que es posible que también bajos contenidos de fibras resulten altamente efectivos. Desde esta perspectiva pueden surgir inclusive nuevas alternativas de aplicación estructural en edificios de altura, puentes, pavimentos o elementos prefabricados.

En este trabajo se presentan algunos resultados obtenidos en el marco del proyecto de investigación conjunta entre UNLP-LEMIT y la Universidad Politécnica de Cataluña sobre la aplicación de hormigones de altas prestaciones con fibras de acero. Otros resultados han sido previamente publicados (3,4). En esta oportunidad se realiza la caracterización del comportamiento de hormigones simples y reforzados en compresión y en flexión incluyendo diferentes tipos de probetas, configuraciones de ensayo, y tipos y contenidos de fibras. Se discuten los criterios utilizados para el cálculo de la tenacidad y resistencia residual conforme los lineamientos de ASTM C 1018 (5).

EXPERIENCIAS

Materiales y mezclas

Para la obtención de los hormigones con fibras se realizó la incorporación de la cantidad y tipo de refuerzo deseado a un hormigón base (sin fibras). En todos los casos se emplearon fibras aglutinadas conformadas en sus extremos tipo DRAMIX (BEKAERT); para los hormigones de resistencia convencional se utilizaron fibras de bajo carbono de esbeltez (longitud/ diámetro) igual a 80 en una única proporción (40 kg/m^3 , 0.5 % en volumen de hormigón) mientras que para los hormigones de alta resistencia se utilizaron dos fibras de similar esbeltez y diferente tipo de acero (55L: de bajo carbono y 60H: de alto carbono); la primera fue empleada en dos contenidos diferentes (40 y 80 kg/m^3 , 0.5 y 1 %) con el propósito de analizar el efecto de la cantidad de refuerzo. En la Tabla 1 se indican las características de las fibras y la identificación adoptada para el presente trabajo.

En la Tabla 2 se muestran las proporciones de los hormigones elaborados; para identificarlos se indica en primer lugar el nivel de resistencia a compresión y luego, en los hormigones reforzados, el tipo y contenido de fibras (kg/m^3). Dado que los volúmenes de fibras son pequeños no se han recalculado las proporciones de materiales para el caso del HRF utilizando la misma columna que para el hormigón base (simple, HS).

Se utilizó una hormigonera basculante convencional y se elaboraron dos series de hormigones; en la primera se emplearon como materiales dos tipos de cemento: portland normal (para el hormigón C30) y de alta resistencia (para C50), arena silícea natural y piedra partida granítica de 20 mm de tamaño máximo. Se utilizó un superfluidificante de base naftalénica. En la segunda serie (hormigones C70) se utilizaron el mismo cemento de alta resistencia, humo de sílice condensado densificado, arena silícea natural, la misma piedra partida granítica pero con un tamaño máximo igual a 16 mm y otro superfluidificante de base naftalénica.

En la parte inferior de la Tabla 2 también se indican las propiedades en estado fresco; se midieron el asentamiento y el tiempo de pasaje a través de un cono invertido (6) para los hormigones simples (HS, a izquierda de la columna) y reforzados (HRF, a la derecha). Los hormigones C30 y C50 fueron de consistencia plástica, mientras que los de alta resistencia (C70) alcanzaron consistencia fluida.

Tabla 1. Características de las fibras utilizadas.

Identificación		80L	55L	60H
Contenido de carbono		Bajo	Bajo	Alto
Resistencia a tracción	MPa	>1100	>1150	>2500
Máximo alargamiento	%	>0.8	>0.8	>1
Esbeltéz		80	55	60
Longitud	mm	60	30	30
Diámetro	mm	0.75	0.55	0.50

Tabla 2. Proporciones (kg/m^3) de los hormigones y propiedades en estado fresco.

Identificación	Serie 1				Serie 2			
	C30 y C30-80L-40		C50 y C50-80L-40		C70-55L-80	C70 y C70-55L-40		C70-60H-40
Agua	157		150		150			
Cemento	375		380		460			
Microsílice	-		-		46			
a/c	0.42		0.39		0.32			
Agr. Fino (0-5 mm)	910		925		800			
Agr. Grueso	935		950		900			
Superplastificante	6		9		12			
Fibras (tipo de fibra)	0	40	0	40	80	0	40	40
		80L		80L	55L		55L	60H
Asentamiento (mm)								
HS	90	-	60	-	250 - 200	250 - 230	250 - 230	
HRF	-	-	-	-	-	-	-	
Cono Invertido (seg)								
HS	-	-	-	-	- 20.0	3.9 - 7.5	3.2 - 5.6	
HRF	-	-	-	-	-	-	-	

Detalles experimentales

Se moldearon probetas cilíndricas de 150 x 300 mm para ensayos de compresión y prismas de 150 x 150 x 600 mm y de 75 x 100 x 400 mm para evaluar la resistencia a flexión y la tenacidad. Todas las probetas fueron compactadas en una mesa vibrante y curadas en cámara húmeda (20 C y 95 % humedad relativa) hasta su ensayo realizado a las edades de 10 meses (primera serie) y 8 meses (segunda serie). Antes de incorporar las fibras a los hormigones C30-80L-40 y C50-80L-40 se moldearon las probetas de los hormigones C30 y C50 hormigón del mismo pastón. En el caso de C70 se siguió la misma metodología extrayendo un tercio de las probetas necesarias de cada uno de los pastones de la segunda serie (C70-55L-80, C70-55L-40 y C70-60H-40).

Los ensayos de compresión se realizaron en una prensa hidráulica de 2 MN de capacidad; las cargas fueron registradas mediante una celda de carga en forma simultánea con las deformaciones longitudinales y transversales de cada probeta, para esto último se fijaron transductores tipo LVDT en los marcos utilizados tradicionalmente para la determinación del módulo de elasticidad y módulo de Poisson en hormigón (ASTM C 462). Se aplicaron tres ciclos de carga hasta el 40 % de la carga máxima continuando luego hasta la rotura.

Los ensayos de flexión se realizaron en una prensa INSTRON de accionamiento electromecánico y 150 kN de capacidad; las cargas fueron registradas mediante una celda de carga en forma simultánea con las medidas de variación de las flechas. Para esto último se dispuso de sendos marcos independientes, fijados a la altura del eje neutro de las muestras, a una distancia igual a la luz de ensayo en coincidencia con los apoyos, con capacidad de girar libremente en uno de los extremos y desplazarse longitudinalmente en el otro; al centro de cada uno de ellos se fijó un LVDT que medía el desplazamiento con respecto a la cara inferior de la viga. Los puntos de referencia fueron rígidamente adheridos a las vigas mediante un pegamento epoxídico. En la Figura 1 se muestra un esquema de los dispositivos empleados para la medida de las flechas.

Se realizaron evaluaciones bajo tres condiciones de ensayo: vigas de 150 mm de altura cargadas a los tercios (4 puntos), vigas de 100 mm con igual tipo de carga y vigas de 100 mm con carga central (3 puntos). En todos los casos se siguieron los lineamientos generales de la norma ASTM C 1018 y la relación luz/altura se mantuvo constante e igual a 3. Para el ensayo todas las vigas se giraron 90 grados sobre su eje longitudinal para aprovechar las caras planas de las probetas. Se utilizó una velocidad de desplazamiento del cabezal igual a 0.1 mm/min hasta superar la carga pico y velocidades de hasta 0.4 mm/min durante el postpico.

En la Tabla 3 se indican para cada hormigón las evaluaciones realizadas, el tipo de probeta y los parámetros determinados.

La evaluación de la tenacidad se realizó conforme ASTM C 1018; la norma calcula índices (In) de tenacidad adimensionales que tienen como propósito evaluar en qué medida se aproxima la respuesta del hormigón con fibras a un material elasto-

plástico ideal. Para ello se divide un área bajo la curva carga – flecha por el área hasta la flecha (δ) de “primera fisura”. Esta última representa de algún modo el comportamiento del hormigón sin fibras. La norma calcula los índices I_5 , I_{10} e I_{20} como las relaciones entre las áreas hasta flechas especificadas (iguales a 3δ , 5.5δ y 10.5δ) con el área hasta “primera fisura”. Por ejemplo, un valor $I_{10} = 10$ indica un comportamiento elasto-plástico hasta una flecha igual a 5.5δ .

Sin embargo es discutible la objetividad en la definición de la “primera fisura” ya que ésta se identifica en forma visual a partir de un desvío en la linealidad de la curva carga - flecha. Como los índices se encuentran basados en ella cualquier error o simplemente diferencia de criterio para su definición conducirá a variaciones importantes en los mismos (7-10).

Tabla 3. Evaluaciones.

Tipo de sollicitación	Probetas	Propiedades determinadas	Hormigones
Flexión - Carga a los tercios	Vigas 150 mm	Módulo de rotura	C30-80L-40, C50-80L-40, C70-55L-40, C70-55L-80, C70-60H-40 y C70.
Flexión - Carga a los tercios	Vigas 100 mm	Indíces de tenacidad	C70-55L-40, C70-55L-80, C70-60H-40.
Flexión - Carga central	Vigas 100 mm	Resistencia residual	C70-55L-40, C70-55L-80, C70-60H-40.
Compresión	Cilindros 150 mm	f'_c , E , μ , σ_{crit}	C30, C30-80L-40, C50, C50-80L-40, C70 C70-55L-40, C70-55L-80, C70-60H-40

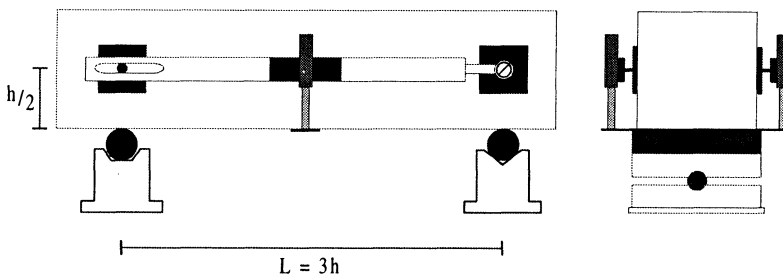


Figura 1. Esquema de los dispositivos utilizados en los ensayos de flexión.

En hormigones con contenidos de refuerzo medios o bajos este punto es fácilmente identificable pues muchas veces se produce casi de inmediato un descenso en la carga. Buscando una mayor objetividad se ha propuesto la determinación de los índices a partir de la carga del "primer pico" (11) (los índices obviamente serán menores en este segundo caso pues las fibras hacen que en el pico se alcance una deformación mayor a la que hubiera tenido el hormigón simple). Pero puede resultar más difícil definir un "primer pico" cuando la curva es siempre creciente hecho que se produce para contenidos altos de refuerzo (por ejemplo en este trabajo el hormigón C70-55L-80). Además es probable que la deformación al "primer pico" sea muy sensible al contenido y tipo de fibras. En estas experiencias los valores de flecha a "primera fisura" fueron similares para las probetas de los distintos hormigones ensayados bajo el mismo tipo de carga y tamaño de probeta.

La Figura 2 muestra una curva típica carga – flecha obtenida en ensayos de flexión identificando el punto que responde al criterio adoptado en este trabajo para la "primera fisura" basado en representar el comportamiento que hubiera tenido el hormigón simple. Debe notarse que en realidad la curva carga–flecha va modificando su linealidad en forma progresiva y esto puede conducir a errores de interpretación en la definición. Se adopta como "primera fisura" primer punto donde la pendiente se hace menor al 50 % de la pendiente inicial. Vale notar que luego de este punto suele aparecer el primer pico o un tramo que tiende a la horizontal.

De todos modos la definición de índices aplicando criterios similares a éstos es un tema abierto a la discusión; es notable observar como la determinación de la "primera fisura" puede verse afectada por la escala adoptada por quien realiza el cálculo (8).

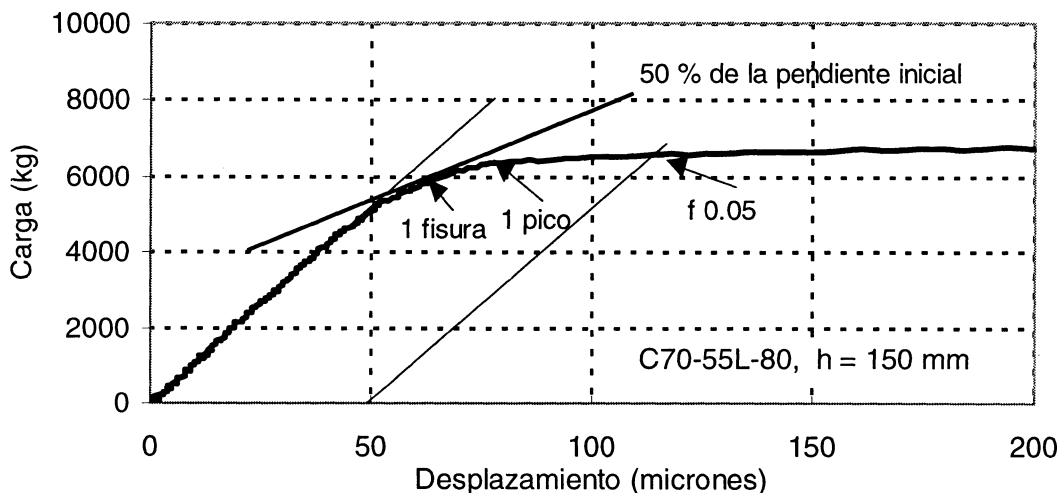


Figura 2. Definición del punto de "primera fisura".

Cabe observar que AENOR UNE 83-510 (12) sigue un criterio básicamente similar a ASTM C 1018. Otras normas prefieren evaluar la tenacidad a partir de valores absolutos del área carga – flecha hasta determinados valores de flecha, tal es el caso de JCI-SF4 (13) o NBN B 15-238 (14). Si bien una discusión comparando diferentes normas escapa al propósito de este trabajo, al analizar los resultados se incluirán algunos cálculos con esta última. Mayores detalles respecto del tema pueden encontrarse en (4, 10). En particular NBN B 15-238 emplea los valores de área hasta flechas iguales a la luz/300 y la luz/150 para calcular las resistencias residuales f_{300} y f_{150} que representan el valor promedio de la capacidad de carga de las vigas (expresada como tensión) hasta dicha flecha; además la norma define objetivamente la tensión de primera fisura, $f_{0,05}$ como aquella que corresponde al valor máximo de la carga previo al cruce de una línea paralela a la parte inicial de la curva carga – flecha desplazada del origen 0.05 mm.

En este trabajo también se han calculado los índices I_{30} e I_{50} a partir de flechas iguales a 15.5 y 25.5 δ respectivamente. ASTM C 1018 calcula además factores de resistencia residual $R_{n,m}$, $R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5)$, $R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10})$, $R_{20,30} = 10(I_{30} - I_{20})$, $R_{50,30} = 5(I_{50} - I_{30})$ que representan también la capacidad del material en el postpico.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Comportamiento bajo cargas de compresión

En la Tabla 4 se presentan para cada hormigón los resultados bajo cargas de compresión. Los incrementos en resistencia a compresión o módulo de elasticidad son coherentes con los obtenidos en otras experiencias de los autores y con la bibliografía. Es posible observar que la incorporación de fibras incrementa la resistencia a compresión entre el 9 y el 35 % con respecto del hormigón simple (C30-80L-40: 35%, C50-80L-40: 9%, C70-55L-80: 18%, C70-55L-40: 16%, C70-60H-40: 16%), el porcentaje depende del tipo de fibra, tiende a crecer a medida que se incorporan más fibras y a disminuir con el aumento de la resistencia. En la Tabla 4 se verifica que el módulo de elasticidad crece ligeramente con la introducción de fibras, en hormigones de alta resistencia este incremento fue menos notable (C30-80L-40: 5%, C50-80L-40: 2%, C70-55L-80: 1%, C70-55L-40: 1%, C70-60H-40: 0%). Finalmente también se observa que el módulo de deformabilidad trasversal tiende levemente a disminuir por la incorporación de fibras, lo cual puede ser explicado considerando la capacidad de control al inicio de fisuras de matriz que confiere la presencia del refuerzo.

Las Figuras 3 y 4 muestran curvas típicas obtenidas en ensayos de compresión. Las curvas de deformaciones volumétricas (Fig. 3) permiten establecer la tensión crítica, σ_{crit} , (mínimo en la curva) que se asocia con el inicio de la propagación inestable de fisuras a lo largo de la matriz. A partir de los valores de σ_{crit} es posible indicar como tendencia general que esta tensión crece ligeramente con el incremento de la resistencia y que la presencia de las fibras la hace disminuir indicando la capacidad de control durante el período asociado a la propagación inestable de fisuras en el hormigón sin reforzar, este efecto es más notorio para altos porcentajes de refuerzo (C70-55L-80).

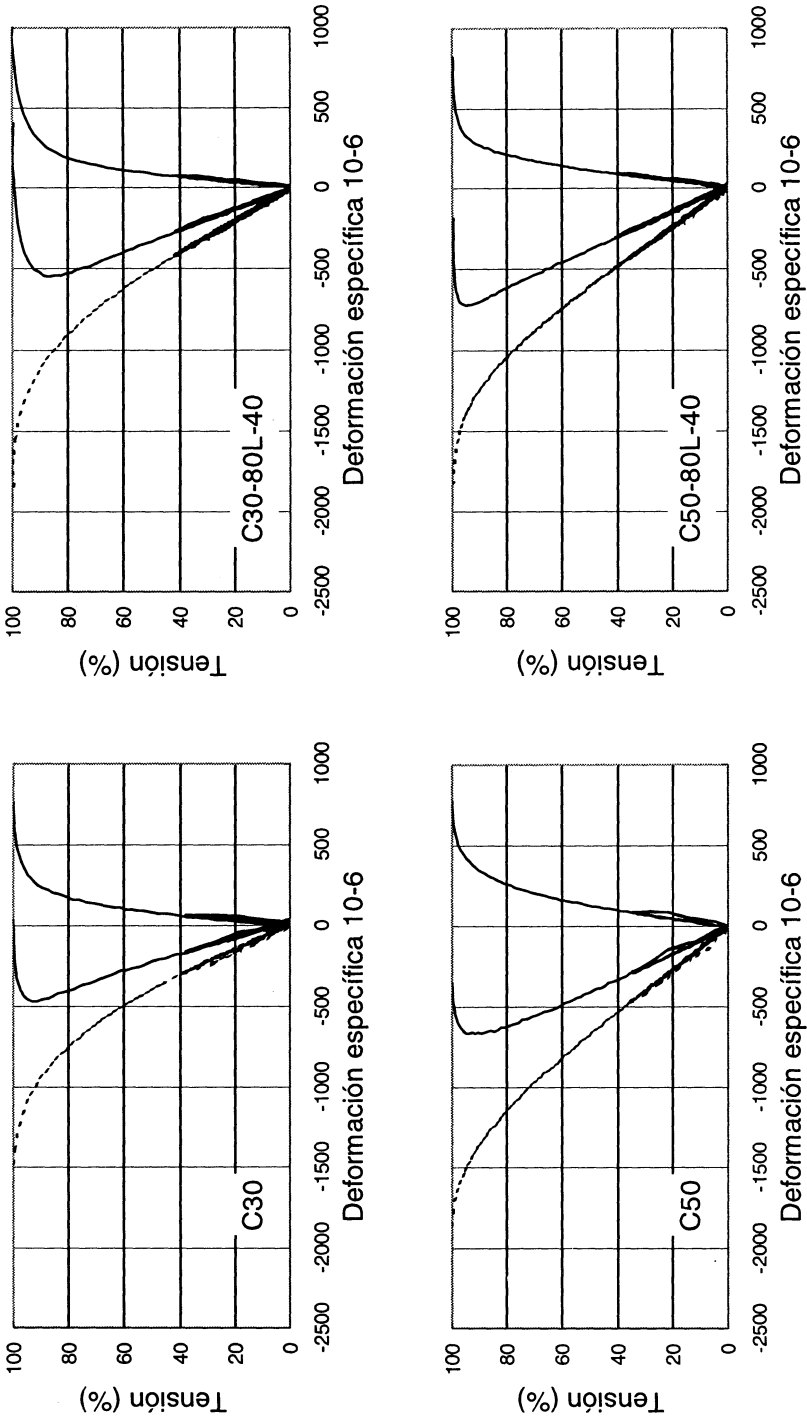


Figura 3a. Deformaciones axiales, laterales y volumétricas bajo cargas de compresión.

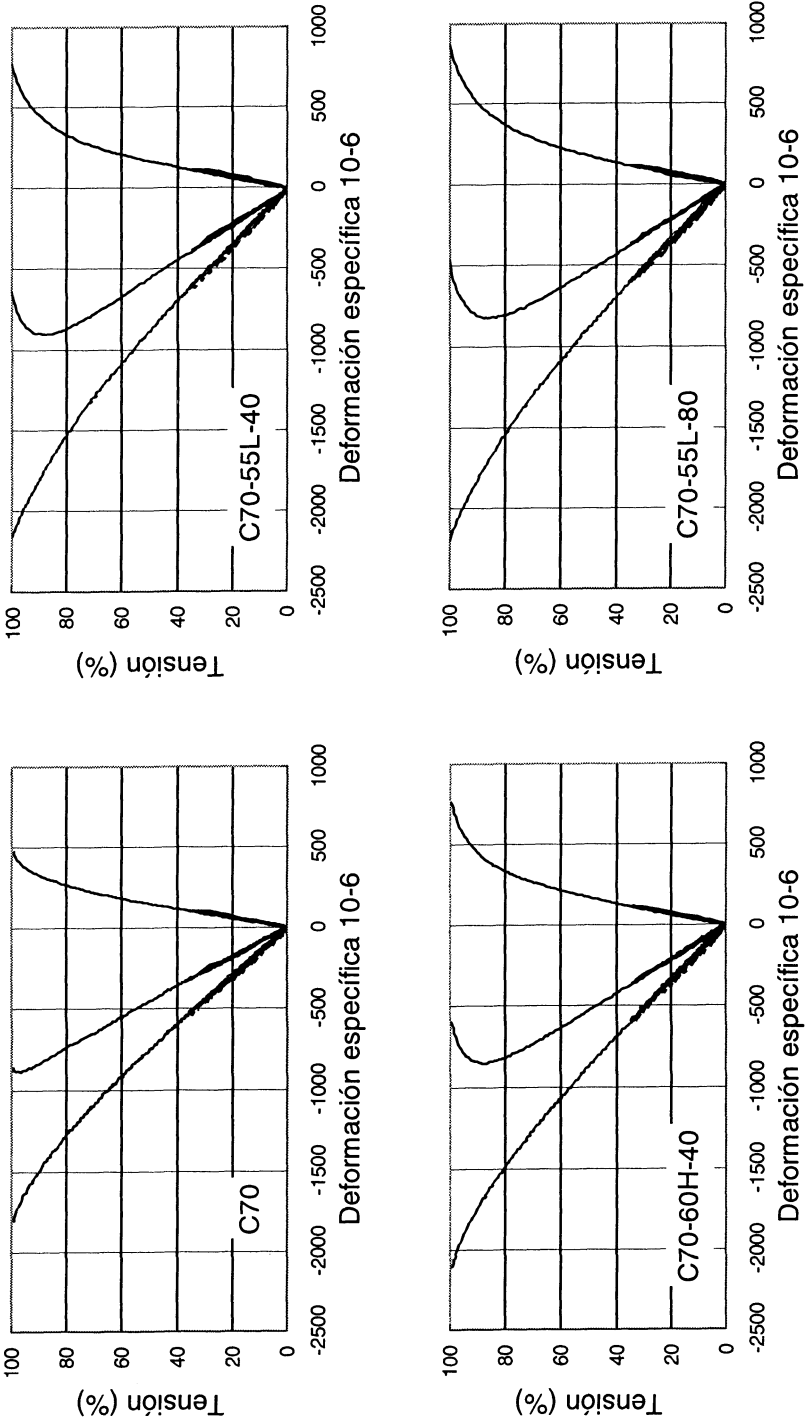


Figura 3b. Deformaciones axiales, laterales y volumétricas bajo cargas de compresión.

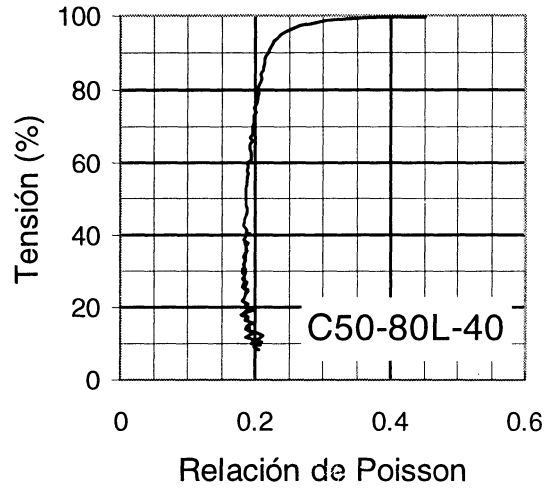
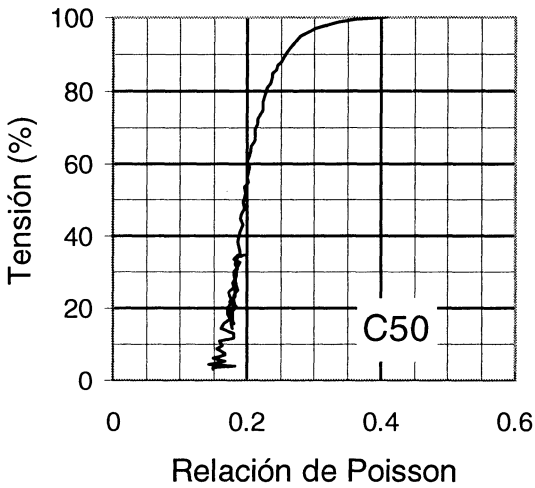
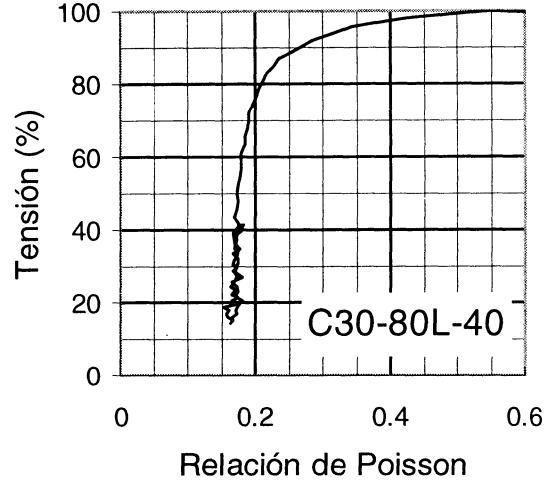
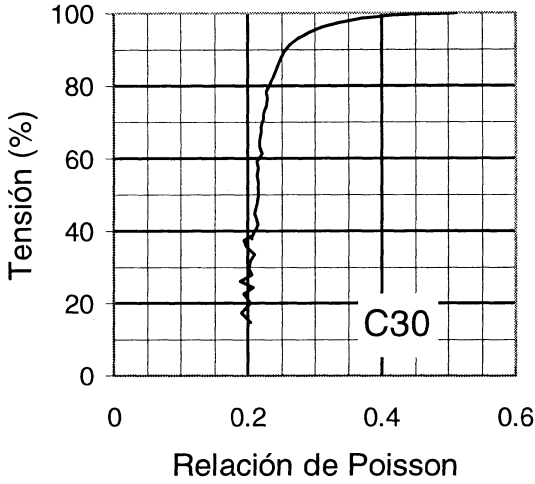


Figura 4a. Variación de la relación entre deformaciones laterales y longitudinales con el incremento de la carga.

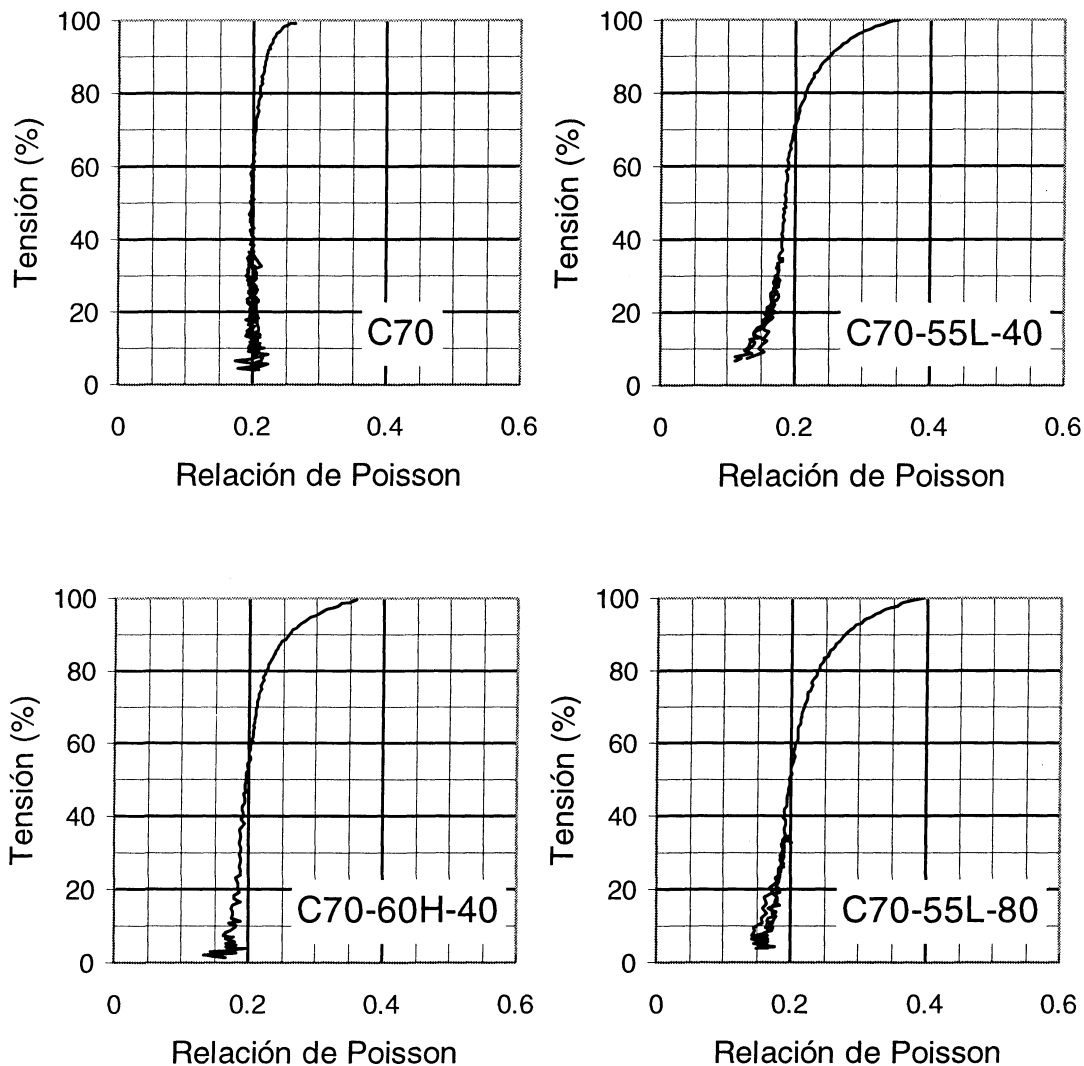


Figura 4b. Variación de la relación entre deformaciones laterales y longitudinales con el incremento de la carga.

Tabla 4. Resistencia y deformabilidad bajo cargas de compresión.

HORMIGÓN	Resistencia a compresión (MPa)	Módulo de elasticidad* (GPa)	Módulo de Poisson*	Tensión crítica (% f'c)
C30	28.0 (5)	36.7 (5)	0.19 (6)	91 (4)
C30-80L-40	37.8 (3)	38.6 (4)	0.18 (6)	89 (2)
C50	51.9 (8)	42.8 (1)	0.18 (9)	95 (4)
C50-80L-40	56.5 (6)	43.5 (1)	0.16 (12)	94 (4)
C70	65.0 (8)	44.0 (3)	0.21 (12)	95 (2)
C70-55L-80	77.0 (2)	44.3 (2)	0.19 (10)	83 (5)
C70-55L-40	75.1 (2)	44.3 (2)	0.19 (7)	92 (4)
C70-60H-40	75.6 (8)	43.5 (2)	0.20 (18)	92 (3)

*: determinados al 40 % de la resistencia a compresión.
(): coeficiente de variación, en %.

En la Figura 4 se presenta la variación de la relación entre deformaciones transversales y longitudinales con la tensión aplicada, el nivel para el cual se produce un claro crecimiento de dicha relación se define como tensión de iniciación, σ_{inic} , y se asocia con el inicio de la propagación de fisuras dentro de la matriz. Los valores de σ_{inic} estuvieron comprendidos entre el 60 y el 70 % en la mayoría de los casos, crecen levemente con el nivel de resistencia y se reducen también ligeramente con la introducción de las fibras; esto último también fue más evidente en el hormigón con mayor contenido de fibras.

Comportamiento en flexión:

Las Figuras 5 a 7 muestran para cada hormigón las curvas que más se aproximan al comportamiento medio obtenidas en los ensayos de flexión de vigas de 150 y de 100 mm de altura cargadas a los tercios y de vigas 100 mm de altura con carga central. Es posible observar que en todos los casos se obtuvieron respuestas estables. En el caso del hormigón sin fibras C70 la rotura se produjo en forma súbita al alcanzar la carga máxima.

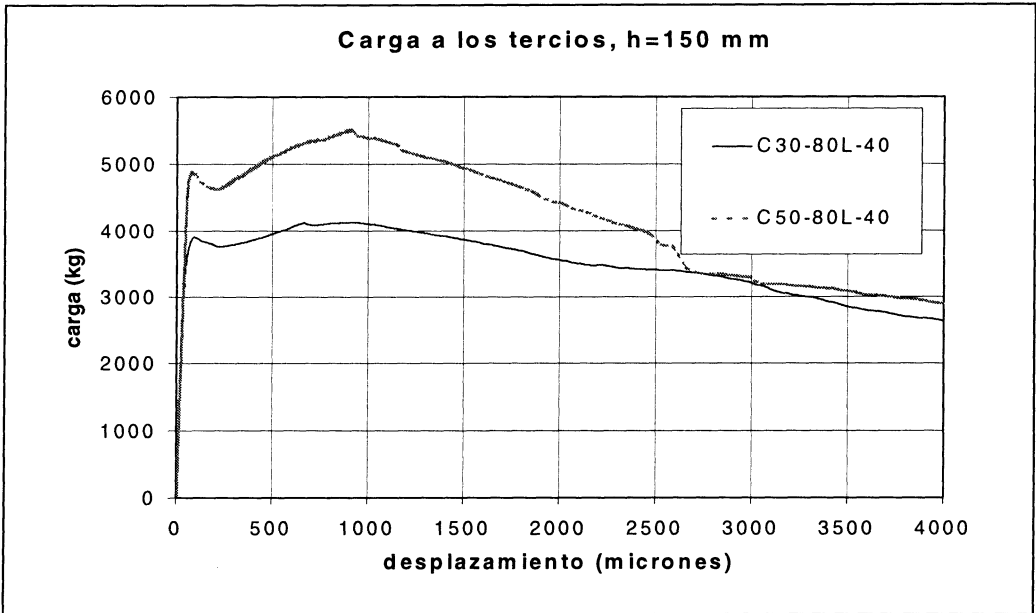


Fig. 5a. Curvas carga – desplazamiento en hormigones con diferentes niveles de resistencia. Vigas de 150 mm de altura con cargas a los tercios.

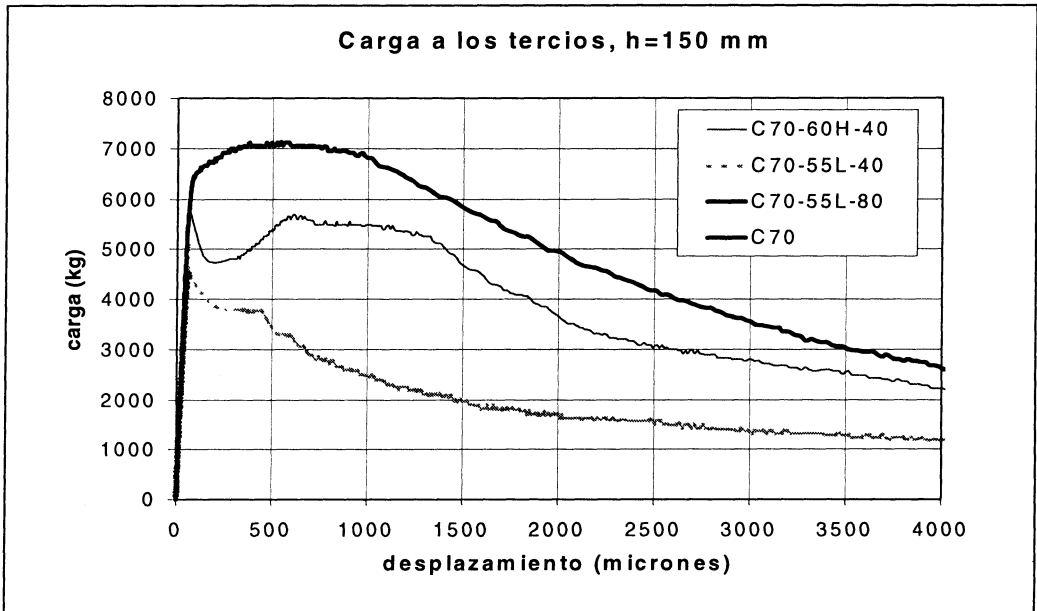


Fig. 5b. Curvas carga – desplazamiento en hormigones de alta resistencia. Vigas de 150 mm de altura con cargas a los tercios.

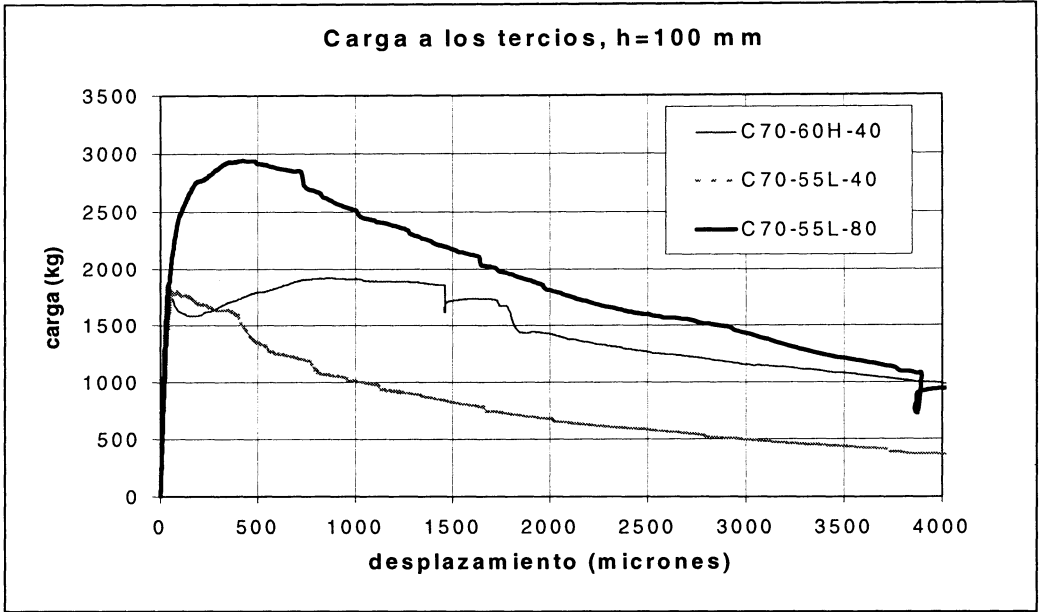


Fig. 6. Curvas carga – desplazamiento de hormigones de alta resistencia. Vigas de 100 mm de altura con cargas a los tercios.

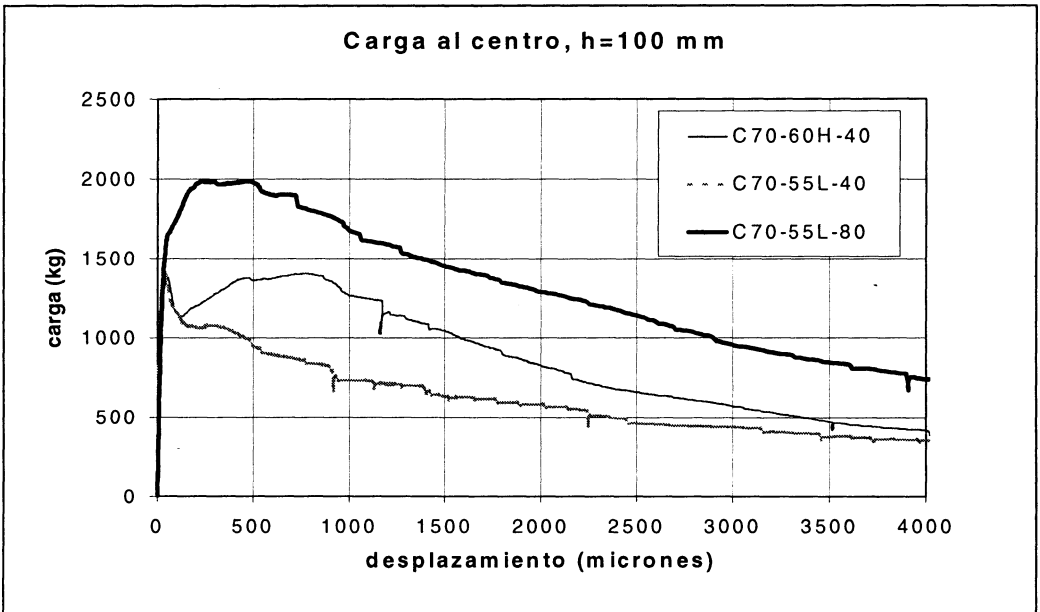


Fig. 7. Curvas carga – desplazamiento de hormigones de alta resistencia. Vigas de 100 mm de altura con cargas al centro.

En los HRF aparece una disminución gradual de la capacidad portante. El hormigón C70-55L-40 para todos los tipos de probetas y tipo de carga ensayados muestra un descenso constante a partir del primer pico. En el caso de contenidos de refuerzo similares con fibras de alto carbono C70-60H-40 se han encontrado dos comportamientos algo diferentes dentro de un mismo grupo de probetas, tanto para las vigas de 150 mm de altura cargadas a los tercios como para las de 100 mm de altura y carga central, en algunos casos se produjo un ascenso de la capacidad portante (tipo endurecimiento) mientras que en otros un descenso gradual en el postpico como en C70-55L-40 (esto justifica los mayores coeficientes de variación). En el hormigón de alta resistencia con alto contenido de fibras, C70-55L-80, se encontró en todos los casos un comportamiento tipo endurecimiento con una buena capacidad elastoplástica.

En los hormigones elaborados con 40 kg/m^3 de fibras de esbeltez 80 se observa un comportamiento plástico tipo meseta para el de menor resistencia y algo de endurecimiento en el postpico para C50-80L-40.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de módulo de rotura (MR), índices de tenacidad y resistencia residual calculados de acuerdo a ASTM C 1018. El hormigón de alta resistencia sin fibras C70 tuvo un módulo de rotura igual a 5.5 MPa con un coeficiente de variación del 6 %. Esto implica que el incremento en la capacidad de carga máxima en el hormigón de alta resistencia C70-55L-80 fue del 58 %. Los hormigones C70-55L-40 y C70-60H-40 incrementaron la resistencia a flexión 25 y 42 % con respecto al hormigón sin fibras.

Los índices de tenacidad y valores de resistencia residual representan lo observado en las figuras, todos los HRF menos C70-55L-40 poseen un comportamiento plástico. Este hormigón da menores valores que el elaborado con fibras de alto carbono. Los valores más altos corresponden al hormigón con mayor contenido de fibras. Las tendencias generales se verifican para los distintos tipos de carga y altura de vigas. Los índices más elevados (I_{20} , I_{30} , I_{50}) son los que mejor diferencian el comportamiento de hormigones con distintos tipos o contenidos de fibras, los índices más bajos I_5 no son capaces de hacerlo. Desde este punto de vista la inclusión de índices más altos a los previstos en ASTM C 1018 será importante.

Por último los coeficientes de variación resultan menores cuando el HRF posee un comportamiento definido (como en C70-55L-80) y crecen en la medida que la forma del postpico de las probetas de un mismo grupo es cambiante C70-60H-40.

Además vale aportar algunos datos para la discusión acerca de la necesidad de mayor objetividad en la definición del área de referencia para la definición de la tenacidad (15). Para las mismas muestras en la Tabla 6 se presentan los valores de módulo de rotura, resistencia a "primera fisura", resistencia en el "primer pico", y los valores de $f_{0.05}$, f_{300} y f_{150} (NBN B 15-238) (en las vigas de 100 mm se utilizó un offset de 0.035 mm). Como información adicional se incluyen las flechas correspondientes a "primera fisura" (δ 1fis) y a "primer pico" (δ 1pic), la relación entre el área hasta "primer pico" / área hasta "primera fisura" y la distancia de la fisura principal respecto al centro de las probetas (dist).

Tabla 5. Resistencia, índices de tenacidad y resistencia residual bajo cargas de flexión.

HORMIGÓN	MR (MPa)	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_{50}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$	$R_{50,30}$
Carga a los tercios – vigas de 150 mm										
C30-80L-40	4.6 (12)	4.7 (8)	9.2 (4)	17.1 (13)	24.8 (16)	40.5 (19)	91 (6)	79 (23)	77 (24)	79 (23)
C50-80L-40	6.9 (6)	5.1 (11)	10.0 (11)	20.6 (12)	31.6 (12)	53.3 (12)	97 (12)	106 (13)	110 (11)	108 (12)
C70-55L-80	8.7 (12)	5.2 (1)	10.8 (1)	22.5 (5)	33.9 (5)	54.1 (7)	112 (2)	116 (8)	114 (7)	101 (10)
C70-55L-40	6.9 (10)	4.2 (16)	7.6 (6)	14.0 (8)	19.7 (11)	29.1 (13)	67 (6)	65 (10)	57 (18)	47 (20)
C70-60H-40	7.8 (15)	4.4 (10)	8.3 (13)	17.1 (19)	26.1 (21)	43.0 (24)	79 (18)	87 (24)	90 (24)	85 (31)
Carga a los tercios – vigas de 100 mm										
C70-55L-80	10.0 (1)	5.4 (5)	11.8 (5)	24.9 (6)	37.6 (7)	59.8 (6)	128 (4)	131 (6)	127 (10)	111 (5)
C70-55L-40	7.3 (3)	4.4 (7)	8.0 (16)	15.0 (20)	21.2 (24)	32.4 (27)	72 (27)	70 (25)	62 (35)	56 (35)
C70-60H-40	7.4 (5)	5.3 (7)	7.8 (2)	15.6 (1)	23.8 (3)	40.4 (1)	51 (8)	78 (5)	82 (7)	83 (5)
Carga central – vigas de 100 mm										
C70-55L-80	10.3 (1)	5.5 (5)	11.4 (6)	23.5 (5)	34.8 (5)	55.1 (5)	118 (7)	121 (4)	113 (6)	102 (5)
C70-55L-40	7.6 (8)	4.1 (5)	7.4 (2)	13.6 (3)	19.4 (2)	29.7 (2)	65 (5)	63 (5)	58 (1)	52 (5)
C70-60H-40	7.5 (4)	4.4 (17)	7.9 (19)	15.0 (28)	22.6 (31)	37.4 (35)	71 (32)	71 (38)	76 (37)	74 (40)
(): coeficiente de variación, en %.										

En la Tabla 6 se aprecia que la primera fisura se produce siempre a una tensión menor o igual que el primer pico; a su vez $f_{0,05}$ resulta sensiblemente similar a la tensión de primer pico por lo que evidentemente constituye una buena posibilidad para la definición de estos puntos. El coeficiente de variación es en general menor para $\delta 1_{fis}$ que para $\delta 1_{pic}$, salvo en C70-55L-40 y C70-60H-40 donde las diferencias entre una y otra son reducidas. La tabla también muestra la relación entre las áreas iniciales hasta el primer pico respecto a las de primera fisura, tal relación es creciente a medida que se utiliza un mayor contenido de fibras. En algunas de las curvas de C70-55L-80 no fue posible precisar un valor para el primer pico dado que la tendencia era siempre ascendente sin cambios bruscos; en este hormigón se observaron las mayores diferencias entre las flechas de primera fisura y primer pico.

La distancia respecto del centro de la probeta donde aparece la fisura principal es, por supuesto, menor cuando se utiliza carga central, en el caso del hormigón C70 sin fibras cargado a los tercios la fisura se produjo en promedio a 40 mm del centro (desviación standard = 26 mm).

La evaluación de la tenacidad a partir del primer pico no presenta en principio inconvenientes pero su definición en hormigones con altos contenidos de refuerzo puede ser aún más dificultosa que la de una primera fisura. De todos modos es evidente que la definición de "primera fisura" conforme ASTM C 1018 también merece ser revisada y ajustada pues puede conducir a interpretaciones bastante diversas para un operador no muy experimentado.

Tabla 6. Parámetros resultantes de los ensayos de flexión.

HORMIGON	MR (MPa)	f 1fis (MPa)	f 1pic (MPa)	f _{0.05} (MPa)	f ₃₀₀ (MPa)	f ₁₅₀ (MPa)	δ 1fis (μ)	δ 1pic (μ)	A1pic / A1fis	Dist. (mm)
Carga a los tercios – vigas de 150 mm										
C30-80L-40	4.6 (12)	4.1 (9)	4.5 (10)	4.5 (10)	3.7 (31)	3.5 (31)	41 (4)	65 (26)	2.18	44 <u>15</u>
C50-80L-40	6.9 (6)	5.7 (5)	6.1 (4)	6.1 (4)	6.3 (8)	5.7 (11)	47 (5)	72 (18)	1.95	33 <u>22</u>
C70-55L-80	8.7 (12)	7.0 (3)	8.0 (8)	8.0 (7)	7.9 (12)	6.7 (13)	61 (1)	109 (24)	2.70	53 <u>20</u>
C70-55L-40	6.9 (10)	6.9 (10)	6.9 (10)	6.9 (10)	3.9 (2)	3.1 (2)	54 (12)	55 (14)	1.05	55 <u>28</u>
C70-60H-40	7.8 (15)	7.0 (5)	7.3 (6)	7.3 (5)	6.7 (24)	5.6 (27)	54 (12)	62 (6)	1.36	30 <u>23</u>
Carga a los tercios – vigas de 100 mm										
C70-55L-80	10.0 (1)	6.9 (3)	-	7.8 (11)	9.3 (7)	8.2 (10)	46 (9)	135 (54)	5.02	42 <u>18</u>
C70-55L-40	7.3 (3)	6.9 (3)	7.3 (2)	7.2 (1)	5.5 (27)	4.7 (29)	43 (13)	58 (23)	1.60	30 <u>15</u>
C70-60H-40	7.4 (5)	7.1 (7)	7.2 (7)	7.3 (1)	6.7 (3)	6.2 (1)	34 (8)	38 (5)	1.22 (7)	22 <u>25</u>
Carga central – vigas de 100 mm										
C70-55L-80	10.3 (1)	8.0 (1)	8.6 (2)	9.2 (5)	7.1 (5)	6.2 (2)	42 (7)	55 (17)	1.52	18 <u>11</u>
C70-55L-40	7.6 (8)	7.4 (8)	7.6 (8)	7.6 (8)	4.2 (25)	3.4 (20)	42 (16)	49 (21)	1.27	18 <u>3</u>
C70-60H-40	7.5 (4)	7.2 (6)	7.4 (5)	7.4 (6)	3.9 (23)	3.5 (26)	35 (3)	44 (14)	1.36	17 <u>6</u>
(): coeficiente de variación, en %.										
_: desviación standard.										

DISCUSION

Para facilitar el análisis se comparan los resultados de los distintos hormigones y tipos de probetas. Se observa el efecto del nivel de resistencia para un mismo tipo y contenido de fibras (C50-80L-40 / C30-80L-40), el del contenido de fibras (C70-55L-80 / C70-55L-40), del tipo de acero (C70-60H-40 / C70-55L-40), y de la altura de la probeta o tipo de carga aplicada (vigas 100mm / vigas 150mm y carga central / carga a los tercios).

Tabla 7. Resultados, valores relativos (%). Carga a los tercios – vigas de 150 mm

	MR	$f_{0,05}$	f_{300}	f_{150}	I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_{50}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$	$R_{50,30}$
C50-80L-40/ C30-80L-40	151	136	171	165	110	108	121	128	132	107	135	143	138

Efecto del nivel de resistencia de la matriz:

Si se comparan los resultados obtenidos sobre los hormigones C30-80L-40 y C50-80L-40 es posible observar que, cuando se emplea un mismo tipo y contenido de fibras, el cambio del nivel de resistencia tiene más influencia sobre la carga máxima que sobre los parámetros de tenacidad relativos del material (Tabla 7). Sin embargo la eficiencia de las fibras parece crecer cuando lo hace la resistencia de la matriz lo que puede justificarse considerando que la mayor adherencia pasta - fibra conduce a un mejor aprovechamiento del refuerzo.

Además al analizar las curvas carga - flecha (Fig. 5.a) se observa que el comportamiento postpico es diferente y el hormigón C50-80L-40 alcanza incrementos en la resistencia respecto a la matriz sin fibras. Asimismo la resistencia residual también es mayor. Otro aspecto interesante es que mientras las diferencias entre C30-80L-40 y C50-80L-40 son pequeñas para los índices menores (o la resistencia residual) crecen a medida que se comparan flechas más importantes. Desde este punto de vista la eficiencia de una dada fibra será mayor en la medida que crezca la resistencia de la matriz.

Efecto del contenido de fibras en HAR:

Los hormigones de alta resistencia alcanzaron índices de tenacidad comparables con los del hormigón convencional con contenidos similares de refuerzo (C70-55L-40 o C70-60H-40 vs. C30-80L-40), ya que si bien los valores fueron algo menores en los HAR, en especial para los índices más altos (deformaciones mayores) esto puede justificarse considerando que tanto la esbeltez como la longitud de las fibras fueron menores.

Tabla 8. Resultados, valores relativos (%).

	MR	f _{0,05}	f ₃₀₀	f ₁₅₀	l ₅	l ₁₀	l ₂₀	l ₃₀	l ₅₀	R _{5,10}	R _{10,20}	R _{20,30}	R _{50,30}
Carga a los tercios – vigas de 150 mm													
C70-55L-80/ C70-55L-40	127	116	205	220	125	143	160	172	186	167	180	200	217
C70-60H-40/ C70-55L-40	114	107	174	185	104	110	122	132	148	118	135	158	181
Carga a los tercios – vigas de 100 mm													
C70-55L-80/ C70-55L-40	136	108	168	174	123	148	166	177	185	178	186	204	199
C70-60H-40/ C70-55L-40	101	100	121	131	119	98	103	112	125	71	110	132	149
Carga central – vigas de 100 mm													
C70-55L-80/ C70-55L-40	135	121	168	182	134	155	172	179	185	181	193	196	196
C70-60H-40/ C70-55L-40	98	97	92	103	107	107	110	116	126	108	113	131	144

Los incrementos en resistencia y tenacidad producidos en un hormigón de alta resistencia por el contenido de refuerzo para un mismo tipo de fibras (C70-55L-80 vs. C70-55L-40) verifican un comportamiento similar al observado en hormigones convencionales. Las curvas carga - flecha evidencian que C70-55L-80 debe asumirse como un HRF de alto contenido de refuerzo mientras que C70-55L-40 es un ejemplo típico de bajos contenidos¹; es importante notar que las diferencias entre los hormigones producidas por el tipo o contenido de fibras son más importantes para las mayores deformaciones (Tabla 8). C70-55L-80 muestra un comportamiento elastoplástico excelente para un hormigón con resistencia a compresión mayor de 70 MPa.

Efecto del tipo de fibras en HAR:

Respecto al efecto del tipo de acero (C70-60H-40 vs. C70-55L-40) cuando se utilizan contenidos y geometrías de fibras similares si bien la influencia es menor que la provocada por otras variables (como el contenido) bajo todas las configuraciones de carga las fibras de alto carbono condujeron a mejores resultados, fundamentalmente en lo que se vincula con el comportamiento postpico.

¹ La definición de alto o bajo contenido no depende sólo de la cantidad de fibras sino también del tipo (esbeltez) y del tamaño máximo de los áridos. Los hormigones C30-80L-40 y C50-80L-40 se encuentran cerca del límite entre unos y otros. Para la fibra 80L y agregados de 20 mm se pueden asumir altos contenidos a partir de unos 50 kg/m³ y bajo contenidos por debajo de 30 kg/m³.

Ambos hormigones pueden considerarse como HRF de bajo contenido de refuerzo, pero mientras en algunos casos C70-60H-40 tuvo incrementos respecto a la carga de primer pico, C70-55L-40 siempre muestra un claro y constante descenso en el postpico. Los valores de módulo de rotura, resistencia a la fisuración o resistencia al primer pico son similares, las diferencias en la resistencia de las vigas de 150 mm surgen de que una de las vigas C70-60H-40 tuvo un crecimiento postpico muy importante. Los índices de tenacidad son similares para bajos valores de flecha pero se diferencian para deformaciones mayores. Los valores de resistencia residual y de f_{300} o f_{150} también reflejan este hecho.

Estos resultados permiten afirmar que el uso de acero de alto carbono puede mejorar la capacidad de absorción de energía en los HAR en especial si se presuponen niveles de fisuración importantes. Los beneficios serán observados más en su comportamiento postpico que en la carga de fisuración; además es probable que en hormigones con altos contenidos de refuerzo las diferencias resulten mayores. En ningún caso se observaron evidencias claras de rotura de fibras por tracción.

Efecto de la configuración del ensayo:

En la Tabla 9 se comparan los resultados obtenidos sobre los hormigones de alta resistencia C70-55L-80, C70-55L-40 y C70-60H-40 utilizando vigas de diferentes alturas o distintas configuraciones de carga.

Tabla 9. Resultados, valores relativos (%).

	MR	$f_{0,05}$	f_{300}	f_{150}	l_5	l_{10}	l_{20}	l_{30}	l_{50}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$	$R_{50,30}$
C70-55L-80													
H100 / H150 c.tercios	115	98	117	122	103	109	111	111	110	114	113	111	110
c.cent/c.terc H100	106	118	76	76	102	97	94	93	92	92	92	89	91
C70-55L-40													
H100 / H150 c.tercios	107	106	143	154	105	106	107	108	112	107	109	109	119
c.cent/c.terc H100	104	105	76	72	93	92	91	91	92	91	89	93	93
C70-60H-40													
H100 / H150 c.tercios	95	99	99	109	120	94	91	91	94	64	89	91	98
c.cent/c.terc H100	100	102	58	57	83	101	96	95	93	139	92	92	89

Como era de esperar el módulo de rotura crece cuando se reduce la altura de las vigas y cuando se emplea carga central en lugar de la carga a los tercios; sin embargo los incrementos fueron menores a los usuales en hormigón simple, lo que se puede atribuir a una zona de fisuración más distribuida generada por la presencia de las fibras.

Respecto a la evaluación de la tenacidad aparece que los índices crecen al utilizar vigas más pequeñas con la misma disposición de cargas (salvo en C70-60H-40 donde son iguales en promedio). Por otro lado los índices se reducen cuando se aplica una carga concentrada en lugar de la carga a los tercios ya la localización de la zona de falla reduce las posibilidades de control por parte del refuerzo.

Es interesante considerar que la variación de los parámetros de tenacidad resulta relativamente pequeña lo que implica que las características cualitativas de las curvas son similares. Si bien algunas propiedades (como la resistencia) pueden variar en forma opuesta a la tenacidad cuando se utilizan probetas más pequeñas o carga central esto no invalida la posibilidad de empleo de tales disposiciones de ensayo dado que es evidente que para cualquiera de las disposiciones adoptadas se observa el efecto de las variables de mayor peso (por ejemplo el contenido de fibra). Estos resultados no permiten establecer si alguna de las configuraciones es mejor que otra para diferenciar el comportamiento de los hormigones con fibras.

CONCLUSIONES

En este trabajo se han analizado resultados correspondientes al Proyecto de Cooperación sobre el empleo de fibras de acero en hormigones con elevados niveles de resistencia que incluyen ensayos de compresión y de flexión con diferentes tipos de probetas, configuraciones de ensayo, y distintos tipos y contenidos de fibras.

En primer lugar debe destacarse que mediante la incorporación de fibras y utilizando métodos convencionales fue posible elaborar un hormigón de alta performance con una resistencia a compresión superior a 70 MPa y que posee un comportamiento elastoplástico ideal.

Además de estas experiencias surge que:

- el efecto de la incorporación de las fibras en compresión es similar al observado en hormigón convencional verificando la influencia de las fibras sobre la formación y propagación de fisuras (módulos de Poisson, tensiones críticas, etc.)
- los beneficios en la capacidad resistente y en el comportamiento postpico en flexión que provoca la incorporación de un mismo tipo y contenido de fibras resultan mayores a medida que se incrementan los niveles de resistencia de la matriz cementícea.

- aparece una mejora en el comportamiento postpico cuando se utilizan fibras de alto carbono pero las diferencias son menores que las que provocan otras variables (por ejemplo el contenido de fibras).
- es posible evaluar y calificar a diferentes hormigones con fibras utilizando probetas con distinta altura o configuración de carga manteniendo las relaciones geométricas luz / altura constantes. Los índices de tenacidad tienden a crecer de con la disminución de la altura de las vigas y a decrecer cuando se aplica carga central.

Finalmente este trabajo contribuye a la discusión acerca del criterio a adoptar para la evaluación de la tenacidad en hormigones con fibras. Se propone una forma de definición de la "primera fisura" aplicable a ASTM C 1018; también se observa que la tensión $f_{0.05}$ indicada en la norma belga es otra opción interesante a considerar. Los índices menores (como I_5) resultaron menos significativos para diferenciar entre diferentes HRF, por lo que es recomendable basarse en los índices mayores (I_{10} o I_{20}) o mejor aún definir índices para flechas más elevadas (I_{30} o I_{50}). Por otra parte se observó que f_{300} y f_{150} son parámetros útiles que en términos de tensión (lo que resulta de fácil comprensión para el usuario) representan el comportamiento postpico, no obstante debe reiterarse que dependen del tamaño de probeta y tipo de carga adoptados. La definición de estos temas merece sin duda una mayor discusión y aporte de datos.

AGRADECIMIENTOS

La colaboración entre UPC (Cataluña, España) y LEMIT-UNLP fue posible a través de un proyecto ICI "Programa de Cooperación con Iberoamérica" MEC, España, que se realiza bajo el título "Desarrollo de hormigones de altas prestaciones con fibras de acero para aplicaciones estructurales". Este trabajo contó con el apoyo de CONICET a través del PIA 6819, 1997 "Elaboración y control de calidad de hormigones de alta performance". Los materiales utilizados en este estudio fueron provistos por Cementos Avellaneda y Bekaert y los aditivos por SIKA y GRACE. Los ensayos fueron realizados en los laboratorios del LEMIT-CIC y los autores agradecen al Ing. H. Toloy por su colaboración en la realización de los mismos.

REFERENCIAS

- (1) Zerbino, R, "Hormigones reforzados con fibras de acero". Ciencia y Tecnología del Hormigón. N3, 1994. pp 69-92.
- (2) Giaccio, G. y Zerbino, R, "Hormigones de alta performance". Ciencia y Tecnología del Hormigón. N3, 1994. pp 37-67.
- (3) Saldivar, H. Gettu, R. Zerbino, R, Rossi, J. "Efectos de la incorporación de fibras metálicas en hormigones de altas resistencias". Proc. 1 Sym. Nac. de Hormigón de Altas Prestaciones, febrero 25-27 de 1998, Madrid, pp. 65-73.

- (4) Gettu, R. Saldivar, H. Zerbino, R. and Mateos, M. "On the characterization of the toughness of steel fiber reinforced concretes". Proc. "1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón", AATH, Bs. As., 1998, pp. 47-60.
- (5) ASTM C 1018, "Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)", Annual Book of ASTM Standards, V.04.02, USA, 1992.
- (6) De Lucía Hardy, F., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Evaluación de la trabajabilidad en HAP", Ciencia y Tecnología del Hormigón. N4, 1997, pp 13-22.
- (7) Gopalaratnam, V.S., Shah, S.P., Batson, G.B., Criswell, M.E., Ramakrishnan, V., and Wecharatana, M., "Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete", ACI Mat. J., V. 88, N4, 1991, pp. 339-353.
- (8) Mindess, S., Chen, L., and Morgan, D.R., "Determination of the First-Crack Strength and Flexural Toughness of Steel Fiber-Reinforced Concrete", Adv. Cem. Based Mat., V.1, 1994, pp. 201-208.
- (9) Chen, L., Mindess, S., Morgan, D.R., Shah, S.P., Johnston, C.D., and Pigeon, M., "Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete", Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-155, ed.D.J.Stevens et al., USA, 1995, pp. 41-75.
- (10) Gopalaratnam, V.S. and Gettu, R., "On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes", Cem. Con. Composites, V.17, 1995, pp. 239-254.
- (11) Banthia, N., and Trottier, J.F., "Test Methods for Flexural Toughness Characterization of Fiber Reinforced Concrete: Some concerns and a proposition", ACI Mater. J., V. 92, N1, 1995, pp. 48-57.
- (12) AENOR UNE 83-510, "Concretes with Steel and/or Polypropilene Fibers: Determinación del índice de tenacidad, la resistencia y la resistencia a la primera fisura" Norma Española, AENOR, Madrid, 1989.
- (13) JCI-SF4, "Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete", JCI Standards for Test Methods of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute, 1984.
- (14) NBN B 15-238, "Tests on Fibre Reinforced Concrete - Bending Test on Prismatic Samples", Norma Belga, Institut Belge de Normalisation (IBN), Bruselas, 1992.
- (15) Jamet, D., Gettu, R., Gopalaratnam, V.S., and Aguado, A., "Toughness of Fiber-Reinforced High-Strength Concrete From Notched Beam Tests", Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-155, ed. D.J.Stevens et al., USA, 1995, pp. 23-39.