EFECTOS DE LA INCORPORACIÓN DE FIBRAS METÁLICAS EN HORMIGONES DE ALTAS RESISTENCIAS

Héctor Saldívar Moguel[1], Ravindra Gettu[1], Raúl Zerbino[2], Julio Rossi[3]

[1]Departamento de Ingeniería de la Construcción.
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña.
[2]CONICET. LEMIT, Universidad Nacional de la Plata, Argentina.
[3]Bekaert Ibérica, S.A., Barcelona.

RESUMEN

El hormigón de alta resistencia es típicamente un material frágil que puede conducir a roturas bruscas de la estructura. La manera más racional de aumentar la ductilidad del material es la incorporación de fibras metálicas. En el presente estudio se analizan los efectos de la adición de pequeñas cantidades de fibras en hormigones con humo de sílice sobre el comportamiento a flexotracción y fractura, incluyendo las influencias de la configuración del ensayo, y la cantidad de fibras. El objetivo es la caracterización de la ductilidad como herramienta en el diseño de hormigones de altas prestaciones con menor fragilidad que un hormigón de alta resistencia, en aras a analizar su aplicación en elementos estructurales.

1. INTRODUCCIÒN

Con el incremento de la resistencia de los hormigones se obtienen prestaciones importantes y deseables en ciertas aplicaciones estructurales - durabilidad, resistencia a la abrasión (desgaste) en puentes, plataformas marinas, túneles, sin embargo el aumento de la resistencia provoca que su comportamiento sea más frágil que los hormigones convencionales. Una de las formas de atenuar este inconveniente y potenciar las prestaciones de estos hormigones de alta resistencia es la incorporación de fibras distribuidas aleatoriamente en toda la masa de hormigón. De los principales beneficios de esta incorporación de fibras es el aumento de la ductilidad y la capacidad de absorber energía a mayores deformaciones que un hormigón sin fibras; además se obtienen beneficios en la resistencia a la fisuración, durabilidad, retracción, etc. A pesar de los beneficios que aportan estos materiales su aplicación principal ha quedado fuera del ámbito estructural y relegado como refuerzo secundario, principalmente por la ausencia de normativas para cuantificar sus beneficios adecuadamente.

La caracterización de la absorción de energía de los materiales pseudo-dúctiles, como el hormigón de alta resistencia con fibras, ha recibido mucha atención en los últimos años, y algunas normas aceptadas ampliamente en la actualidad son objeto de discusión y debate sobre la capacidad de caracterizar adecuadamente a estos compuestos, como la norma ASTM C 1018. Además queda por demostrar si las actuales normas son aplicables a los hormigones de altas resistencia con fibras o habrá que realizar modificaciones para poder caracterizarlos adecuadamente.

La presente investigación demuestra el incremento de la ductilidad de los hormigones con fibras, presenta resultados cuantitativos del aumento de la tenacidad con el contenido de fibras, compara 3 configuraciones de ensayo a flexotracción para caracterizar la tenacidad - carga en 4 puntos, carga en 3 puntos y vigas con entalla cargadas al centro. También se demuestra que la tortuosidad del plano de fisura aumenta con el contenido de fibras a diferencia de los hormigones de alta resistencia donde la zona de fisuración presenta caras planas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La dosificación por peso del hormigón en estudio cemento:arena:grava: microsílice:agua fue 1:1.9:1.9:0.35:0.1. Se utilizó cemento CEM I 52.5 R; arena silícea 0-5, grava caliza 5-12, humo de sílice ELKEM Grado 920D, superfluidificante tipo naftaleno GRACE Daracem 120 en una proporción de 17.8 l/ m^3 de hormigón. La fibra fue de alto carbón con una resistencia a tracción de 2000 N/mm^2 con una esbeltez de 60 (l/d) y dosificadas al 0.5% (40 kg/m^3) y 1% (80 kg/m^3) del volumen de hormigón. Las fibras eran conformadas en los extremos y encoladas en peines.

Tabla 1.1. Códigos de identificación de las series realizadas.

Tabla 1. Datos Generales de los ensayos						
Código	**Entalla**	**Contenido de Fibras (kg/m^3)**	**Parámetro de Control**	**Configuración de Carga ***	**Cono de Abrams (cm)**	**fc (MPa)**
AR80NE	0.0	80	Flecha	UNE 83-510-89	15	86
AR80CC	0.0		Flecha	carga central		
AR80ET	12.7		A. Fisura	entalla		
AR40NE	0.0	40	Flecha	UNE 83-510-89	17	87
AR40CC	0.0		Flecha	carga central		
AR40ET	12.7		A. Fisura	entalla		
AR00NE	0.0	0	Flecha	UNE 83-510-89	23	77
AR00CC	0.0		Flecha	carga central		
AR00ET	13.0		A. Fisura	entalla		

* *Ver figura 1.*

Se elaboró una serie de prismas de un hormigón base sin fibras, otra con el mismo hormigón base adicionando 0,5% de fibras en peso, y una tercera serie con 1% de fibras. Cada serie consistió de 9 prismas. La geometría de los prismas fue 15x15x60 cm. De cada serie 3 prismas se ensayaron en flexotracción siguiendo la configuración de 4 puntos de carga y de

acuerdo a la norma UNE 83-510-89, otros 3 prismas con la configuración de 3 puntos de carga (carga central), y por último en 3 prismas se realizó una entalla de 12 mm de longitud y 3 mm de ancho al centro del lado posterior al punto de aplicación de la carga y se ensayaron aplicando la carga al centro de la luz.

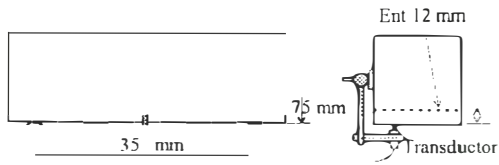
La nomenclatura de cada serie se presenta en la tabla 1.1. Todas las vigas se giraron 90° para aprovechar las caras planas de las probetas y reducir posibles efectos del método de compactación de las fibras. Además de los prismas se moldearon 5 cilindros (15x30 cm) de cada serie para la determinación de propiedades estándar (compresión y tracción)

La lectura de la flecha central se realizó con un transductor lineal Schaevitz ±5 mm soportado mediante un marco rígido a la probeta. Los ensayos se realizaron en una máquina INSTRON 8505 con capacidad de 1 MN equipada con control por lazo cerrado.

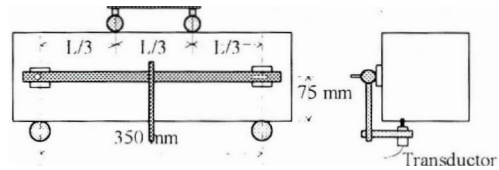
Todos los materiales se utilizaron en condiciones secas, la amasadora empleada es de 250 litros de capacidad con acción giratoria independiente en la cuba y las palas (araña). La secuencia del amasado fue mezclar la arena, áridos gruesos y cemento en seco durante 1 minuto, después se colocaba el agua mezclada con el aditivo y se dejaba mezclar durante 2 minutos, a continuación se colocaban las fibras y se continuaba mezclando 2 minutos más; de esta forma el tiempo total de amasado después de la colocación del agua fue 4 minutos. Los conos y resistencias a compresión (fc) de los cilindros se presenta en la tabla 1.1. La compactación de los moldes prismáticos fue mediante mesa vibratoria una vez llenos durante 30 segundos. Los cilindros se llenaron en dos capas de igual espesor vibrando 15 segundos por capa. En ningún caso se presento segregación en el hormigón con y sin fibras. Todas las probetas se desmoldearon entre 20-24 horas después del amasado y fueron colocados en cámara húmeda (24 °C y 100% H.R.) hasta la edad de 28 días en que fueron ensayados.

3. DETALLES DEL MÉTODO DE ENSAYO

El marco que sostuvo al LVDT fue de dos elementos de fijación y una barra longitudinal. Los elementos de fijación del marco se colocaron a una distancia igual a la luz en la misma posición de los apoyos de la viga, y a la mitad del canto en una de las caras paralelas a la dirección de aplicación de la carga.



(a) 3 puntos de carga (carga central)



(b) Esquema de 4 puntos de Carga

Fig. 3.1. Detalle de la configuración de los ensayos de flexotracción.

La carga se aplicó de forma que se consiguieran las velocidades de deformación indicadas en la tabla 3.1 para el control por flecha o en la tabla 3.2 para el control por apertura de fisura y flecha. Para el segundo caso la secuencia fue primero el control por apertura de fisura con dos velocidades de aumento de ésta, y al límite indicado se cambia al control por flecha con una sola velocidad de aumento de la misma.

Tabla 3.1. Velocidades de deformación para el caso de control por flecha y carga central

Flecha absoluta (μm)*	Velocidad de flecha (μm/s)
δ_i a 100+ δ_i	0,2
δ_i +100 a δ_i +1000	1,0
δ_i +1000 a δ_f	7,5

* donde: δ_i : Lectura inicial del aparato de medición de flecha (LVDT); δ_f: δ_i + 5000

Tabla 3.2. Velocidades de deformación para el caso de control por CMOD y flecha.

Tipo de control	Límites (μm)*	Velocidad de apertura de fisura (μm/s)	Velocidad de flecha (μm/s)
CMOD	ϕ_i a 150+ ϕ_i	0,2	
	ϕ_i +150 a ϕ_i +1500	1,0	
Flecha	δ_m a δ_f		6,0

donde: ϕ_i : Lectura inicial de apertura de fisura (CMOD).

δ_i : Lectura inicial del aparato de medición de flecha (LVDT).

δ_f : δ_i + 5000.

δ_m: Lectura de flecha cuando la apertura de fisura es ϕ_i + 1500, en este límite se cambia el control a flecha.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
4.1. RESPUESTA INICIAL

Los resultados demuestran el incremento de la ductilidad y absorción de energía de los hormigones de alta resistencia con fibras. La respuesta en la primera etapa pre-pico es esencialmente lineal para todos los hormigones, la similitud de estas respuestas demuestra que las fibras tienen poca influencia en la respuesta inicial. En la figura 4.1 se observa la respuesta inicial de los ensayos controlados con la apertura de fisura de las vigas entalladas. Los valores de la resistencia a flexotracción en la carga máxima para cada configuración de ensayo, presentados en la tabla 4.1, son cuantitativamente similares, lo que demuestra nuevamente el dominio de matriz, en la etapa inicial de la respuesta de estos materiales.

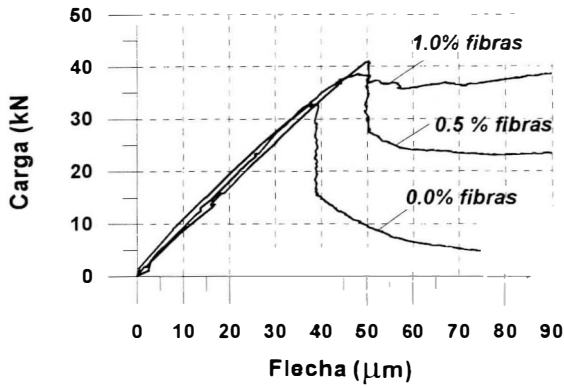


Figura 4.1. Respuesta inicial ampliada de los ensayos de vigas con entalla.

La presencia de las fibras atenúa la fragilidad de la zona de transición de dominio de la matriz a la parte de la respuesta donde las fibras soportan las tensiones inducidas por las solicitaciones impuestas a la probeta. Es decir, como se observa en la figura 4.1, la respuesta justo después de la carga máxima del hormigón de referencia es de una caída brusca de la carga, con un pequeño incremento de la flecha; según la gráfica, en 10 micrones la carga descendió al 30% de la máxima alcanzada como cabe esperar de la naturaleza frágil de estos hormigones.

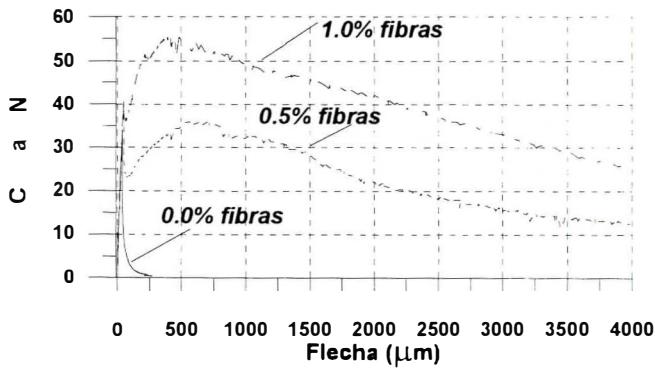


Fig. 4.2. Hormigón de alta resistencia (sin fibras y con 0,5 y 1.0% de fibras). Probetas con entalla

En el caso de las probetas fabricadas con 0.5% de fibras se observa en la misma figura 4.1 como la probeta mantiene cierta capacidad de carga, aproximadamente el 65% de la carga máxima, una vez que la matriz ha fallado por completo. En el caso de los hormigones con un volumen del 1% de fibras la capacidad de carga de la probeta una vez que falla la matriz se mantiene hasta deformaciones importantes de la probeta, figura 4.2; además, se observa que la transición entre la respuesta dominada por la matriz y las fibras se presenta sin cambios bruscos en el comportamiento, como en hormigones con un bajo contenido de fibras. Esta mayor o menor "fragilidad o ductilidad" de la zona de transición dependerá de la fragilidad de la matriz y resistencia, del contenido de fibras y eficiencia en función de su geometría y interfase matriz-fibras.

4.2. TENACIDAD

Para la caracterización de la capacidad de absorción de energía de los hormigones de alta resistencia con fibras se utiliza el ensayo de flexotracción con 4 puntos de carga registrando la curva carga-flecha en el centro de la probeta, como la Norma UNE 83-510-89. Con la respuesta carga-flecha se obtiene la tenacidad a través de varios enfoques: energía total hasta cierta deformación prescrita, índices de tenacidad adimensionales basados en la energía absorbida, resistencia a flexión hasta deformaciones post-fisuración prescritas. Y recientemente se ha propuesto la utilización de la respuesta carga-apertura de fisura como una forma de caracterizar la tenacidad de los hormigones de alta resistencia con fibras con buenas perspectivas a futuro (Bryars et al., 1994).

Tabla 4.1. Resultados cuantitativos de la evaluación de la tenacidad de los ensayos de flexotracción.

	Carga al primer pico (kN)	Flecha al primer pico (μm)	Tenacidad al pico (kN*μm)	I_{30}	fr (N/mm^2)	Carga P.Fisura (kN)	Tenacidad L/150 (kN μm)
AR80NE	81.8	78.5	3375.8	25.4	10.8	50.7	178770.1
	5%	3%	7%	17%	4%	8%	17%
AR80CC	62.9	72.5	2368.7	24.7	13.1	40.4	136176.8
	3%	2%	6%	10%	4%	10%	15%
AR80ET	37.3	47.7	980.1	37.3	8.5	30.7	136179.4
	4%	4%	9%	9%	3%	4%	16%
AR40NE	85.2	76.7	3415.1	13.9	11.1	57.0	94576.7
	4%	2%	7%	18%	4%	5%	10%
AR40CC	58.6	65.6	1996.8	19.2	11.8	41.4	84629.3
	2%	4%	6%	7%	6%	3%	10%
AR40ET	39.5	49.4	1017.2	23.9	9.3	31.4	75640.8
	3%	3%	4%	21%	2%	3%	15%
AR00NE	79.8	73.9	3038.4	0.0	10.4	79.0	0.0
	9%	6%	15%		8%	10%	
AR00CC	59.4	72.1	2181.8	0.0	12.1	43.8	0.0
	3%	2%	4%		5%	11%	
AR00ET	33.1	41.1	720.7	0.0	7.8	29.3	0.0
	1%	5%	2%		1%	6%	

fr: Resistencia a flexotracción

A pesar de la aceptación general de los ensayos a flexotracción para caracterizar la tenacidad, en la actualidad existe una amplia discusión de algunos inconvenientes que se

presentan en la evaluación: la determinación del punto de primera fisura, medición de la flecha en los puntos de aplicación de la carga, incorporación de máquinas con servo-control o control por lazo cerrado etc. (Gopalaratnam y Gettu, 1994).

Con objeto de evaluar cuantitativamente los resultados de los ensayos se empleó la norma UNE 83-510.89 en todas sus indicaciones excepto que en lugar de utilizar la carga de primera fisura para definir el índice de tenacidad I_{30} se optó utilizar la carga máxima, ya que la determinación de esta última es más objetiva que la definición de la primera fisura incluida en la norma UNE 83-510-89. La tabla 4.1 se muestran los promedios y desviación estándar de resultados de la evaluación de la tenacidad para los diferentes ensayos realizados y en la fig. 4.3 se observa la respuesta en flexotracción por la incorporación de fibras al hormigón de alta resistencia bajo las tres configuraciones de ensayo.

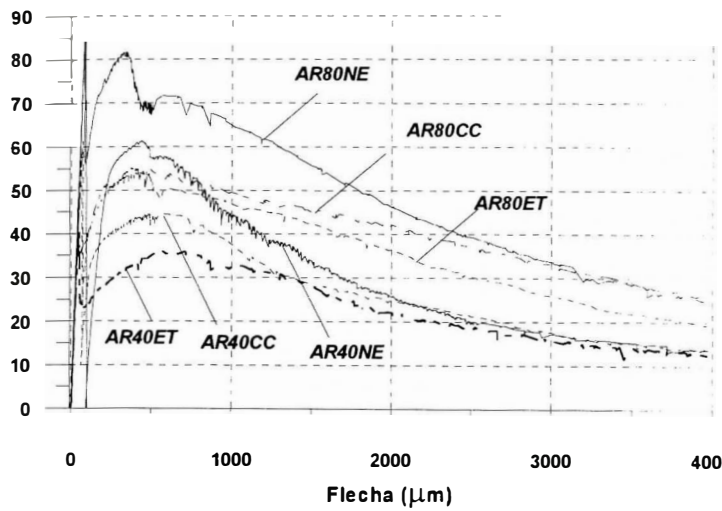


Fig. 4.3. Respuesta del hormigón con 0.5% y 1.0% de fibras bajo las 3 configuraciones ensayadas

El índice de tenacidad I_{30} se obtiene dividiendo la energía absorbida bajo la curva carga-flecha hasta una deformación 15.5 veces la deformación a primera fisura por la energía hasta la carga de primera fisura (según la norma UNE 83-510-89) pero en nuestro caso tomamos la deformación a la carga máxima.

La figura 4.4. muestra que el índice de tenacidad I_{30} es sensible a los contenidos de fibras empleados en los ensayos, es decir, cuantifican claramente el aumento de la tenacidad por el incremento en el contenido de fibras. Incluso identifica diferencias en la configuración de los ensayos de 3 y 4 puntos de carga, estas diferencias posiblemente se deban a las asimetrías de las probetas, y también a que el transductor que registra la flecha no se sitúa en los puntos de aplicación de las solicitaciones sino en el centro (en el caso de la configuración de 4 puntos de carga). De esta forma cualquier excentricidad en la aparición de la fisura puede inducir errores en el registro de la respuesta.