

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DEL REFUERZO EN HORMIGONES CON FIBRAS

Torrijos, C.¹, Tobes, J. M.¹, Giaccio, G.² y Zerbino, R.³

RESUMEN

Los recientes avances en los tipos de fibras, así como en el diseño del hormigón, han dado lugar a nuevas aplicaciones estructurales para el Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) que se suman a las tradicionales de este material. Entre ellas se destacan el uso de fibras de acero en hormigones de alta resistencia y el diseño de hormigones autocompactables reforzados con fibras; así como los hormigones con fibras sintéticas estructurales. En forma paralela se han propuesto criterios para el control de calidad de HRF que incluyen la valoración del contenido de fibras. Este artículo presenta un estudio sobre la distribución de fibras en probetas de HRF y sus efectos sobre las propiedades mecánicas del material.

INTRODUCCIÓN

Además de los conocidos beneficios y aplicaciones tradicionales de los Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) los recientes avances en los tipos de fibras y en el diseño del hormigón, han dado lugar a nuevas aplicaciones estructurales. Las ganancias en tenacidad que imparten las fibras de acero y en particular las de acero de alto carbono, abren un nuevo campo para el uso estructural de hormigones de alta resistencia (1-2). También se ha avanzado en el diseño y aplicación de hormigones autocompactables reforzados con fibras, en los que suma a las grandes posibilidades del hormigón autocompactable la contribución de las fibras (3-5). Por otro lado han aparecido en el mercado nuevas fibras sintéticas de uso estructural que pueden llegar a competir en algunos campos hasta ahora reservados al hormigón con fibras de acero.

Paralelamente se ha profundizado en la caracterización mecánica y la valoración de las propiedades constitutivas del HRF en orden a lograr un avance en los criterios y métodos de diseño estructural. Se ha propuesto un nuevo ensayo de flexión sobre probetas entalladas (6) para la determinación de la resistencia y tenacidad que brinda especial atención al comportamiento postpico y supera varias de las debilidades que presentaban los métodos existentes. También se han desarrollado métodos para la caracterización de HRF en tracción directa (7) y corte (8) especialmente orientados a la valoración de las propiedades constitutivas. Hace pocos años se realizó un extenso programa de investigación en donde además de la caracterización a nivel material, se desarrolló una propuesta para el cálculo estructural de HRF (9-10), estudiando nuevas aplicaciones, como así también planteando criterios para el control de calidad. Sobre este último punto se ha planteado la necesidad de valorar el tipo, contenido y distribución de fibras, y se han propuesto algunos métodos para tal efecto.

¹ Becario CONICET, LEMIT. Docente Facultad de Ingeniería UNLP.

² Investigador CIC, LEMIT. Profesor Facultad de Ingeniería UNLP.

³ Investigador CONICET, LEMIT. Profesor Facultad de Ingeniería UNLP.

Es interesante destacar el significado práctico de valorar el contenido y distribución de fibras ya que el control de rutina en obra puede limitarse sencillamente a establecer la dosis y características de las fibras y realizar ensayos de resistencia a compresión del hormigón, en la medida que durante la etapa previa de diseño fueran determinadas la resistencia y tenacidad del HRF elaborado con dicho contenido y tipo de fibras.

Esta propuesta es criteriosa ya que la dosis, distribución y tipo de fibras constituyen un parámetro característico de la estructura a nivel material del HRF. Estudios previos han mostrado de qué forma las propiedades mecánicas, y en especial la tenacidad y el comportamiento postpico se correlacionan con el refuerzo utilizado. Un estudio del comportamiento en tracción directa de HRF (7,11) mostró cómo la resistencia residual se vincula con el número de fibras eficaces; por otro lado, en ensayos sobre testigos de HRF en diferentes direcciones se observó un comportamiento anisotrópico que pudo ser justificado por la distribución y orientación de las fibras, esto es muy significativo al momento de considerar su respuesta estructural. Diversos trabajos indican que en HRF de acero es usual una distribución en dos dimensiones al compactar mediante vibrado externo. Esto no será necesariamente igual en hormigón autocompactable con fibras o en hormigones reforzados con fibras sintéticas estructurales, por lo que resulta de interés valorar estas situaciones particulares.

En este trabajo se presenta un estudio de la distribución del refuerzo en HRF y sus efectos sobre las propiedades mecánicas del material. Se analiza la relación entre la resistencia y otros parámetros representativos del comportamiento postpico en flexión sobre probetas de diferentes dimensiones, también se compara la orientación de las fibras en hormigones reforzados con fibras de acero y con fibras sintéticas estructurales.

ESTUDIOS EXPERIMENTALES

Recientemente se realizó un estudio experimental del nuevo método propuesto por el comité RILEM TC 162 para el ensayo de flexión de HRF (12-13) Además del tamaño de probeta recomendado se ensayaron otras geometrías. En la Tabla 1 se muestran las dimensiones de probetas estudiadas y la orientación adoptada de ensayo. Se seleccionaron tres HRF que se diferencian en el contenido y tipo de fibras incorporadas a un mismo hormigón de base, en la Tabla 2 se indican las proporciones de los mismos y en la Tabla 3 se detallan las geometrías ensayadas en cada uno de ellos. En todos los casos se utilizaron fibras conformadas en sus extremos, las características de las fibras se presentan en la Tabla 4. Como puede apreciarse los HRF1 y HRF2 se elaboraron con un mismo tipo de fibra (40 u 80 kg/m³ de F1) y el HRF3 con 40 kg/m³ de fibra F2.

Para cada geometría se realizaron como mínimo 6 ensayos de flexión. Luego se seleccionaron dos o tres probetas representativas de cada grupo para contar las fibras que atravesaban el plano de fractura (sumando las dos mitades de cada prisma). Se consideraron el total de fibras y las fibras eficaces. Debido a su orientación respecto al plano de rotura existen fibras que no contribuyen a la capacidad resistente. Se asume como fibra eficaz aquella que al ser extraída resiste la apertura de la fisura (como contraposición de aquellas que quedan simplemente despegadas). En este estudio no existió ambigüedad en la identificación, ya que debido al tipo de fibra utilizado, se definieron como eficaces aquellas fibras donde se deformó el gancho del extremo.

Tabla 1. Dimensiones de las probetas estudiadas.

Grupo	Largo (mm)	Altura, h (mm)	Entalla a (mm)	Base, b (mm)	Luz, L (mm)	a/h	(h-a)/L	Giro
A	550	153	26	152	500	0.17	0.25	90°
B	450	103	17.5	103	350	0.17	0.25	90°
C	450	103	17.5	103	350	0.17	0.25	0°
D	430	103	17.5	75	350	0.17	0.25	90°
E	430	75	13	103	350	0.17	0.18	0°
F	550	152	26	75	500	0.17	0.25	0°

Tabla 2. Proporciones (kg/m³) y propiedades de los HRF.

Hormigón	HRF1	HRF2	HRF3
a/c		0.40	
cemento		400	
arena		900	
piedra 19 mm		900	
superfluidif.		2.96	
Fibras			
tipo	F1	F1	F2
contenido	40	80	40
f'c (MPa)	56.0	59.7	53.6

Tabla 3. Programa de ensayos.

Hormigón	HRF1	HRF2	HRF3
Geometrías ensayadas	A a F	A a F	A, B, E

Tabla 4. Fibras empleadas.

Fibra de acero	F1	F2
Contenido de carbono	Alto	Bajo
Resistencia a tracción (MPa)	>2500	>1100
Elongación máxima (%)	>1.0	>0.8
Longitud (mm)	30	60
longitud/diámetro	60	80

Efecto del número de fibras sobre la resistencia y otros parámetros representativos del comportamiento postpico en flexión

Es evidente que en los HRF la presencia del refuerzo constituye un elemento determinante de la estructura interna del material. En esta sección se analiza la vinculación entre el contenido de fibras y la resistencia y otros parámetros representativos de la respuesta postpico en flexión. En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos para cada probeta individual según el método propuesto por RILEM TC-162 TDF (6) y junto a ellos el número de fibras eficaces (F_e) y de fibras totales (F_t). También se indica la densidad de fibras/cm² en la superficie de fractura. Entre los resultados se incluyen la resistencia a primera fisura (f_{1F}), la tensión máxima (f_M) y los demás parámetros que valoran el comportamiento postpico del HRF, a saber: las resistencias equivalentes f_{eq2} , f_{eq3} , las resistencias residuales definidas a partir de la curva carga–flecha, $f_{R\ 1-\delta}$, $f_{R\ 2-\delta}$, $f_{R\ 3-\delta}$, $f_{R\ 4-\delta}$, y las resistencias residuales definidas a partir de la curva carga–apertura de fisura CMOD, $f_{R,1-C}$, $f_{R,2-C}$, $f_{R,3-C}$. Los criterios y métodos utilizados para el cálculo exceden el alcance de este artículo y pueden fácilmente encontrarse en la citada norma o en recientes publicaciones (6, 12-14).

Tabla 5. Número de fibras en la superficie de fractura, dimensiones de las vigas y resultados de los ensayos de flexión, medidos para probetas individuales de cada grupo.

HRF	Fibras				Dimensiones			Resultados del ensayo de flexión en vigas entalladas															
	número		fibras/cm ²		h	a	b	f _M	f _F	f _{eq2}	f _{eq3}	f _{R1-C}	f _{R2-C}	f _{R3-C}	f _{R1-δ}	f _{R2-δ}	f _{R3-δ}	f _{R4-δ}					
	Fe	Ft	Fe	Ft	mm	mm	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa					
1-A	119	214	0.61	1.11	156	27	150	5.7	5.4	6.1	5.3	5.3	5.6	4.2	5.2	5.6	5.7	4.7					
	126	216	0.66	1.13	156	26	147	5.2	5.2	5.2	4.6	4.9	4.9	3.9	5.1	5.1	4.1	3.9					
1-B	51	90	0.61	1.08	102	18	99	6.0	6.0	5.9	5.4	5.2	5.7	5.3	5.8	5.8	4.5	4.7					
	41	72	0.48	0.84	101	17	102	6.0	6.0	4.4	4.1	4.0	4.4	4.2	4.0	4.4	4.3	4.0					
1-C	52	86	0.60	0.99	101	17	103	5.9	5.9	4.9	4.4	4.2	4.5	4.3	4.2	4.6	4.3	4.3					
	45	84	0.56	1.05	95	15	100	5.5	5.5	5.2	4.8	4.5	4.9	4.5	4.9	4.9	4.4	4.1					
1-D	42	89	0.64	1.36	103	16	75	6.0	6.0	5.7	5.2	5.3	5.2	5.0	5.3	5.2	4.8	4.6					
	23	64	0.34	0.96	105	17	76	5.9	5.9	3.9	4.4	3.9	4.7	5.0	4.7	4.7	5.0	4.0					
1-E	23	64	0.36	1.00	76	15	105	6.0	6.0	6.4	5.6	5.1	5.5	5.1	5.0	5.2	5.7	5.2					
	18	56	0.28	0.88	75	13	103	6.2	6.2	6.3	5.4	5.6	5.3	4.3	5.2	5.2	5.3	4.4					
1-F	70	132	0.79	1.49	151	28	72	6.9	6.2	6.7	6.3	6.2	6.4	5.7	5.9	6.4	6.3	5.7					
	56	112	0.56	1.12	150	20	77	5.1	5.1	4.8	4.0	4.3	3.9	3.5	4.6	4.6	4.0	3.5					
2A	217	454	1.11	2.32	153	24	152	8.3	6.5	8.9	8.1	7.9	8.3	7.4	7.7	8.1	8.3	7.4					
	162	353	0.83	1.82	155	28	153	8.0	6.7	8.3	7.4	7.4	8.0	6.4	8.0	8.0	6.5	-					
	211	413	1.08	2.11	155	26	152	8.9	5.9	9.1	8.4	8.2	7.9	7.9	7.6	8.7	7.4	-					
2-B	79	203	0.95	2.45	100	17	100	8.1	6.3	8.3	7.8	7.4	8.1	6.9	7.2	8.0	8.0	7.1					
	100	212	1.18	2.49	102	17	100	8.6	7.1	8.9	8.1	7.7	8.6	7.9	7.7	8.6	7.9	6.9					
	121	246	1.40	2.85	100	17	104	10.0	7.7	10.6	9.5	9.3	9.7	9.3	9.3	9.7	9.3	-					
2-C	59	202	0.69	2.36	100	16	102	8.3	6.9	9.3	7.8	8.1	7.7	7.0	8.1	7.7	7.1	-					
	91	204	1.05	2.36	102	18	103	8.2	6.2	8.1	7.9	7.1	8.1	7.9	7.1	8.1	7.8	-					
	80	219	0.94	2.58	100	15	100	9.2	6.4	9.5	9.0	8.6	9.1	8.4	8.5	9.1	8.7	7.9					
	90	215	1.05	2.50	103	18	101	8.0	6.9	8.3	7.7	7.4	7.9	7.5	7.4	8.0	6.9	7.2					
2-D	67	155	1.04	2.40	104	18	75	9.0	7.7	9.3	8.3	8.0	8.6	7.6	8.0	8.7	7.7	6.7					
	71	187	1.06	2.80	107	18	75	8.6	7.2	9.9	7.7	8.2	8.1	6.6	8.1	8.1	6.7	-					
	53	171	0.80	2.57	105	15	74	8.7	7.3	9.7	8.0	8.5	8.3	6.8	8.5	8.3	6.8	5.6					
2-E	53	158	0.81	2.41	78	15	104	8.4	6.2	7.8	7.8	6.7	8.4	7.3	6.5	7.8	7.9	7.3					
	43	119	0.69	1.92	74	15	105	7.6	6.7	8.2	7.3	6.8	7.5	5.9	6.8	7.4	6.8	5.9					
	54	134	0.87	2.17	76	16	103	8.3	6.7	8.3	8.2	7.4	8.3	8.1	7.0	8.1	8.3	8.1					
2-F	103	259	1.03	2.60	151	20	76	8.4	6.2	8.8	7.5	7.8	7.7	6.0	7.7	7.7	6.0	-					
	84	199	0.89	2.11	150	21	73	7.2	5.7	7.8	6.6	6.8	7.0	6.0	6.9	6.9	4.8	-					
	106	228	1.00	2.16	154	25	82	8.7	6.5	9.5	8.3	8.3	8.6	7.4	8.3	8.6	7.4	-					
3-A	95	126	0.49	0.65	155	25	15	6.4	5.1	3.6	5.2	3.5	5.8	6.4	3.3	4.8	6.1	6.3					
	105	141	0.56	0.75	153	28	15	7.9	4.5	4.7	6.9	4.5	7.3	7.8	4.1	6.2	7.8	7.8					
3-B	32	46	0.35	0.51	104	16	103	5.1	5.1	3.3	3.6	2.8	3.6	4.2	2.8	3.6	4.2	3.8					
	39	56	0.44	0.64	101	15	102	6.3	4.6	4.8	5.5	4.3	5.7	5.8	4.3	5.6	5.7	6.2					
3-D	44	63	0.67	0.95	106	18	75	8.7	5.1	4.9	7.0	4.2	7.0	7.8	4.3	7.3	8.0	8.5					
	30	44	0.45	0.67	103	15	75	5.6	5.3	4.7	5.0	4.0	5.0	5.2	4.0	4.8	5.3	5.2					
3-E	50	58	0.79	0.91	75	14	104	9.1	5.2	5.6	6.5	4.8	6.9	8.7	4.5	5.9	7.2	8.5					
	38	56	0.56	0.83	75	11	106	7.5	5.0	6.0	5.9	5.0	6.0	6.5	4.8	5.4	6.2	7.1					

En la Fig. 1 se presenta la variación de las propiedades mecánicas medidas en flexión con respecto al contenido de fibras totales de cada una de las probetas seleccionadas de cada tipo de hormigón. La Fig. 1.a muestra la variación de la tensión máxima (f_M), la resistencia a primera fisura (f_{1F}), y las resistencias equivalentes f_{eq2} , f_{eq3} , con la densidad de fibras para las vigas de 150 mm de altura preparadas con la fibra F1, incluyendo los hormigones con 40 y 80 kg/m³ de refuerzo. Se observa una relación directa entre el contenido de fibras y la tensión máxima o las tensiones equivalentes, representativas del comportamiento postpico. Por el contrario la tensión de primera fisura prácticamente no se modifica para diferentes contenidos de fibras. Esto es lógico ya que la resistencia a primera fisura se encuentra gobernada principalmente por la resistencia de la matriz (hormigón de base) mientras que la respuesta postpico depende directamente del tipo y contenido de refuerzo. En la Fig. 1.b se representa la misma relación incluyendo todos los tamaños de vigas. Es posible observar que el comportamiento es similar para los otros tamaños de probetas ensayados. Por su parte la Fig. 1.c representa para todas las probetas elaboradas con la fibra F1 el efecto de la densidad de fibras totales sobre las tensiones residuales medidas a partir de la flecha. Es evidente que la densidad de fibras posee un efecto directo sobre la tenacidad y comportamiento postpico, que es el aspecto de mayor interés en HRF.

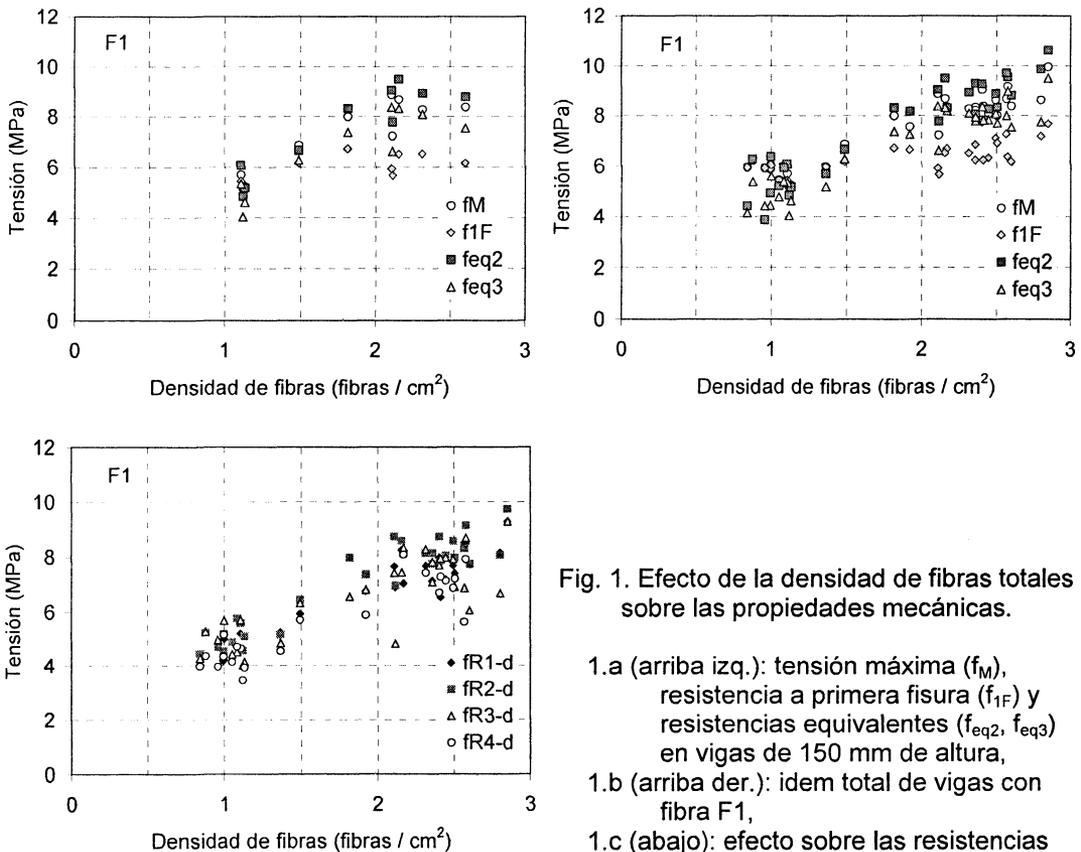


Fig. 1. Efecto de la densidad de fibras totales sobre las propiedades mecánicas.

- 1.a (arriba izq.): tensión máxima (f_M), resistencia a primera fisura (f_{1F}) y resistencias equivalentes (f_{eq2} , f_{eq3}) en vigas de 150 mm de altura,
- 1.b (arriba der.): idem total de vigas con fibra F1,
- 1.c (abajo): efecto sobre las resistencias residuales.

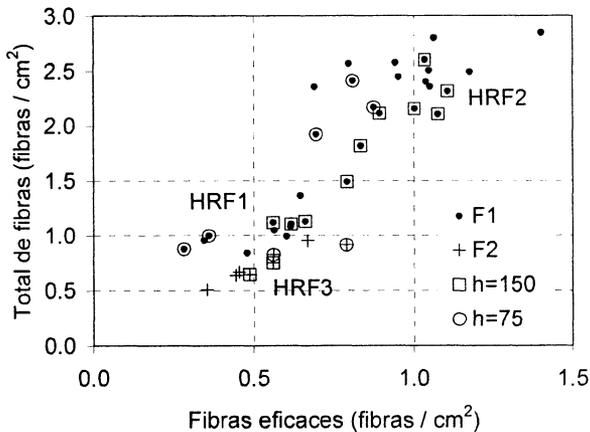


Fig. 2 Relación entre densidad de fibras totales y eficaces.

En la Fig. 2 se muestra la relación entre la densidad de fibras totales y eficaces, incluyendo los dos tipos de fibras. También se han diferenciado los datos obtenidos sobre las vigas de 150 mm (A y F) y 75 mm (E) de altura, los puntos sin recuadrar corresponden a las vigas de 100 mm de altura (B, C y D). Es posible observar que la proporción de fibras eficaces aumenta ligeramente con las fibras más largas (F2). Esto se puede deber a una mayor orientación del refuerzo debido al efecto pared de los moldes, si la fibra es más larga aumenta la probabilidad que se disponga en la dirección de los esfuerzos de tracción, y al hacerlo se oponga al arrancamiento. Otra causa podría ser que las fibras más largas, F2, de mayor diámetro, están constituidas por acero de bajo carbono, por lo que puede favorecerse la deformación del gancho en el extremo de las fibras con respecto a las F1.

En relación al efecto del tamaño de las vigas, parece existir una ligera tendencia a aumentar el número de fibras eficaces en las probetas de mayor altura para los mayores contenidos de la fibra F1. En este sentido puede ser importante utilizar un tamaño de viga lo más cercano posible al tipo de aplicación. Con los hormigones HRF2 y HRF3 no existe un efecto marcado del tipo de probeta empleada. Como resultado general surge que, para estas experiencias, la relación entre fibras eficaces y totales es bastante dispersa. Promediando para cada tipo de hormigón los resultados sobre los diferentes tamaños de vigas, la relación entre fibras eficaces y fibras totales fue del orden de 0.50, 0.44 y 0.72 para HRF1, HRF2 y HRF3 respectivamente. Cabe notar que el concepto de fibras eficaces sólo es aplicable a fibras conformadas en sus extremidades.

En un estudio de HRF en tracción directa (7,11) se observó cómo parte de la variabilidad de resultados en probetas de un mismo HRF geoméricamente semejantes puede justificarse considerando el efecto del número de fibras en los planos de fisuración. Al respecto se encontró que tanto para la tensión máxima como para la tensión de primera fisura no surgía un efecto de la cantidad de fibras eficaces, hecho que confirma que esta última depende principalmente del comportamiento de la matriz. Por el contrario se encontró una fuerte dependencia entre los parámetros de post-pico y el número de fibras eficaces. Esta correlación explica el origen de la variabilidad que a veces aparece en los resultados de tenacidad. Si se tiene en cuenta que en las probetas el área de fractura es relativamente pequeña, las tendencias observadas permiten inferir que en un elemento estructural (con un área más grande) la dispersión debería ser mucho menor. En el citado estudio la relación entre fibras eficaces y totales fue 0.63.

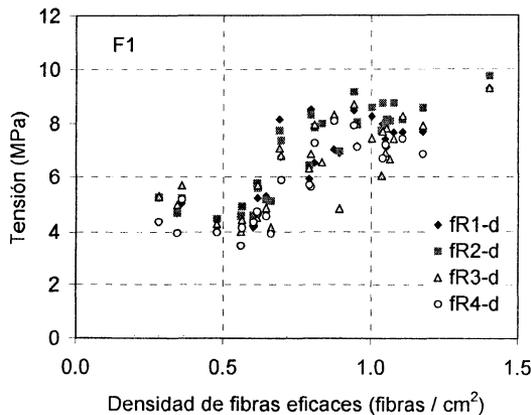
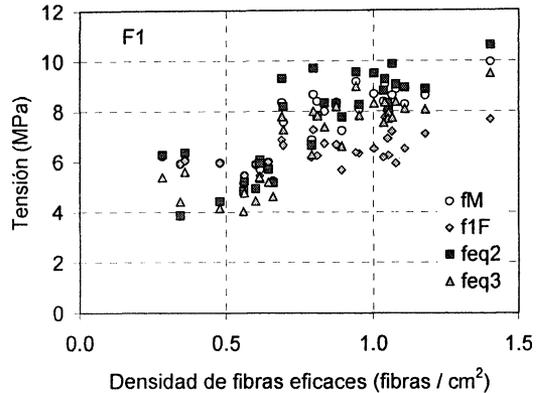
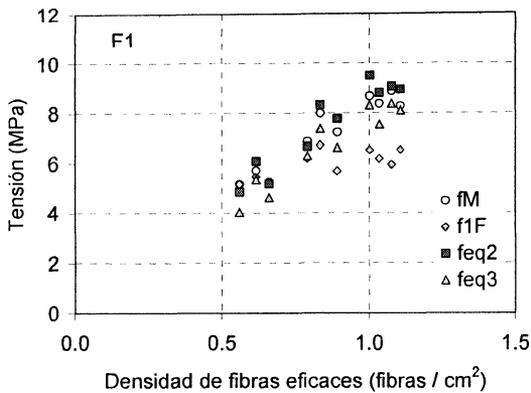


Fig. 3. Efecto de la densidad de fibras eficaces sobre las propiedades mecánicas.

- 3.a arriba izq.: tensión máxima (f_M), resistencia a primera fisura (f_{1F}) y resistencias equivalentes (f_{eq3} , f_{eq3}) en vigas de 150 mm de altura,
- 3.b arriba der.: idem total de vigas con fibra F1.
- 3.c abajo: efecto sobre las resistencias residuales.

En la Fig. 3 se realizan, en forma análoga a la Fig. 1, las mismas comparaciones considerando la densidad de fibras eficaces en cada probeta. Es posible apreciar un comportamiento similar destacando que la tensión de primera fisura resulta poco afectada por la cantidad de fibras a diferencia de la tensión máxima y las resistencias equivalentes y residuales que varían en estrecha vinculación con la densidad de fibras.

En la Fig. 4 se muestran las correlaciones entre las propiedades mecánicas y la densidad de fibras para el HRF3 realizado con la fibra F2, considerando las fibras totales y las fibras eficaces. Una vez más se aprecia que la tensión de primera fisura es poco afectada por la cantidad de fibras, pero hay buena correlación entre la densidad del refuerzo y las tensiones de rotura, residuales y equivalentes determinadas en el ensayo de flexión.

Estos resultados confirman lo observado por diversos autores que consideran la posibilidad de realizar un control de calidad en HRF atendiendo a la cuantificación del tipo, contenido y distribución de fibras en los elementos del hormigón. Esta alternativa puede facilitar significativamente las acciones de aplicación y control en este tipo de hormigones. A la vez la dependencia lineal de los parámetros de post-pico con el número de fibras que atraviesan la fisura o con la densidad de fibras puede conducir a parámetros del material más fiables si es posible establecer una correlación para los diferentes tipos de hormigones

y fibras. El concepto de fibras eficaces no evidenció grandes beneficios en este caso y, al mismo tiempo considerando las aplicaciones prácticas, aún resulta más interesante vincular la respuesta mecánica con el número total de fibras por plano de fisuración, dado que el mismo puede ser estimado por diferentes modelos (15-17), a partir de la cantidad de fibras presentes en el hormigón.

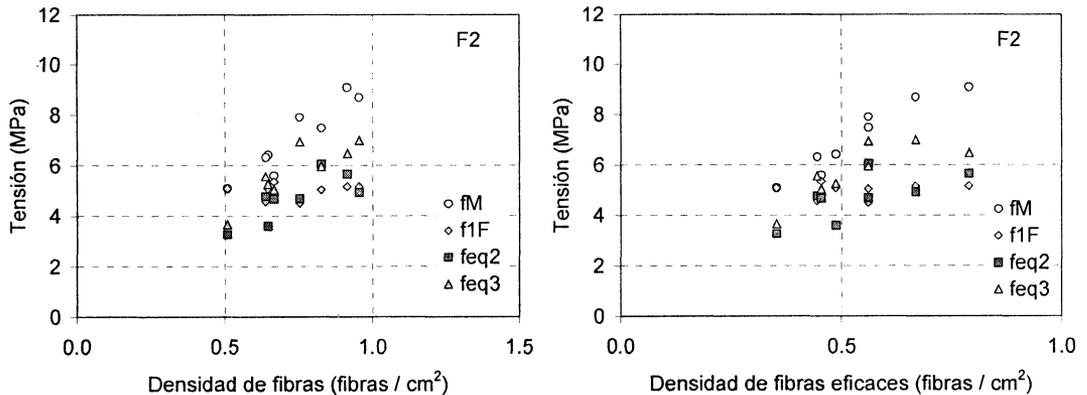


Fig. 4. Efecto de la densidad de fibras sobre las propiedades mecánicas (HRF3, F2).

Orientación de las fibras en HRF

Los resultados presentados anteriormente confirman el efecto del número de fibras sobre las propiedades mecánicas del HRF. Además se ha comprobado que es frecuente una orientación preferencial del refuerzo conforme el tipo de fibra, geometría de elementos, tipo de hormigón y método de compactación usados (18). En este punto se presentan estudios de la orientación de las fibras en probetas de HRF. Se incluyen los HRF analizados en la sección anterior compactados con mesa vibradora, a los que se suman otros hormigones con fibras de acero y con fibras sintéticas estructurales y no estructurales.

Se realizaron mediciones de densidad de fibras por unidad de área obtenidas sobre cortes en distintas orientaciones de los diferentes tamaños de vigas, correspondientes a los hormigones HRF1, HRF2 y HRF3 (Tablas 1 a 4). Las direcciones estudiadas incluyen el plano normal a la dirección de llenado, el plano transversal (paralelo a la superficie de fractura de las vigas) y el plano longitudinal (siguiendo el eje de la viga paralelo al llenado). Las mismas se identifican en la Fig. 5.

Los resultados se incluyen en la Tabla 6. Se observa que para todas las geometrías las fibras se ubican preferencialmente en los planos normales a la dirección de llenado; la densidad de fibras es similar en los planos longitudinal y transversal, mientras que el número de fibras que atraviesan el plano normal es significativamente menor. Las densidades en el plano normal, referidas a las medidas en los otros dos planos, resultan del orden de 54, 50 y 38 % para HRF1, HRF2 y HRF3 respectivamente. La densidad promedio de todos los tamaños de probetas fue semejante a las de las vigas de 150 mm de altura que propone la norma. Desde este punto de vista también se confirma la posibilidad de emplear vigas más pequeñas cuando el tipo de aplicación y el tamaño de las fibras lo permitan (13).

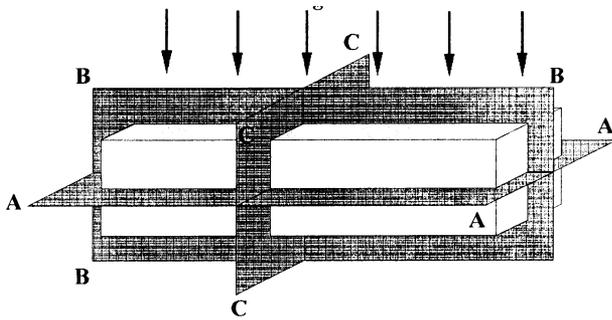


Figura 5. Cortes de las vigas. Planos para la determinación de la orientación de las fibras.

A: Normal al moldeo,
 B: Longitudinal,
 C: Transversal.

Tabla 6. Densidad de fibras en HRF de acero compactados por vibrado externo. (N°/cm²)

Plano	Longitudinal	Transversal	Normal al moldeo	Normal / Longitudinal	Normal / Transversal
HRF1A	1.55	1.75	0.85	0.55	0.49
HRF1-B	1.50	1.32	0.64	0.43	0.48
	1.11	1.37	0.91	0.82	0.66
HRF1-C	2.40	1.58	0.71	0.30	0.45
HRF1-D	1.56	1.30	no medida	-	-
	1.07	1.26	0.73	0.68	0.58
HRF1-E	1.51	1.52	0.72	0.48	0.47
HRF1-F	1.48	1.45	0.89	0.60	0.61
	1.42	1.90	1.14	0.80	0.60
Promedio HRF1	1.51	1.49	0.82	0.54	0.55
HRF2-A	2.11	2.84	1.22	0.58	0.43
HRF2-B	1.85	2.85	1.09	0.59	0.38
	no medida	2.58	1.30	-	0.50
HRF2-C	2.58	2.92	1.45	0.56	0.50
	2.13	2.03	no medida	-	-
HRF2-D	2.27	2.20	1.41	0.62	0.64
	2.52	2.31	no medida	-	-
HRF2-E	3.24	2.23	0.85	0.26	0.38
	2.56	2.49	1.32	0.52	0.53
HRF2-F	2.34	2.68	1.25	0.53	0.47
	no medida	3.12	1.20	-	0.38
Promedio HRF2	2.40	2.57	1.23	0.51	0.48
HRF3-A	0.73	0.62	0.27	0.37	0.44
HRF3-B	0.89	1.01	0.27	0.30	0.27
HRF3-C	0.71	0.71	0.46	0.65	0.65
HRF3-D	0.88	0.66	0.33	0.38	0.50
	0.77	0.77	0.20	0.26	0.26
HRF3-E	0.66	0.96	0.26	0.39	0.27
Promedio HRF3	0.77	0.79	0.30	0.39	0.38

Tabla 7. Densidad de fibras en prismas con HRF sintéticas.

Tipo de Fibra		S	SEa	SEb	SEb	SEc	Aa	Ab
Densidad		0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	7.8	7.8
Largo (mm)		20	54	40	40	50	25	54
Dosis de fibras (kg/m ³)		1.9	4	1.4	2.2	5	30	30
Modo de compactación		M	VE	M	M	VE	VE	VE
Fibras/cm ²	Plano Longitudinal	1.03	1.61	0.26	0.58	1.21	0.15	0.22
	Plano Transversal	1.52	1.74	0.24	0.95	1.54	0.25	0.28
	Plano Normal al llenado	0.84	0.95	0.23	0.48	0.69	0.10	0.14
Normal / Longitudinal		0.82	0.59	0.88	0.83	0.57	0.67	0.64
Normal / Transversal		0.55	0.55	0.96	0.51	0.45	0.40	0.50

En la Tabla 7 se presentan otros resultados de densidad de fibras en diferentes direcciones para diversos HRF. Se utilizaron tres fibras sintéticas estructurales (SEa, SEb, SEc), una fibra sintética no estructural (S) y dos fibras de acero diferentes a las empleadas en la primera parte del trabajo (Aa: tipo planas onduladas y Ab: tipo twincone). También se incluyen en la tabla las principales características de las fibras utilizadas en esta etapa. En algunos casos se realizó la compactación mediante vibrado externo (VE) mientras que en otros las probetas se compactaron manualmente mediante la técnica de varilleo (M).

Es posible observar nuevamente que en la mayoría de los casos se verifica la orientación preferencial con una menor cantidad de fibras según la dirección del llenado. Los valores de densidad en el plano normal al llenado en los HRF de acero (en este caso compactados con vibrado externo) varían entre el 40 y el 67 % de la densidad en los otros planos. La densidad en el plano transversal parece ser ligeramente mayor.

En los hormigones reforzados con sintéticas estructurales, también se observa una orientación preferencial pero algo menos marcada y también ocurre que la densidad es mayor en el plano transversal. La densidad en el plano normal al llenado varía entre el 45 y el 55 % de la densidad en la dirección transversal, con un valor atípico de 96 % en el HRF con bajo contenido (1.4 kg/m³) de la fibra SEb y compactado por varilleo (M), mientras que la relación de densidades entre el plano normal y el plano longitudinal oscila entre el 57 y el 88 %. Sin embargo se estima que se requiere un mayor número de experiencias con este nuevo tipo de fibras para confirmar estas observaciones.

Comparación de los resultados con un modelo teórico

Como fuera comentado una de las propuestas recientes para el control de calidad en HRF plantea la determinación de la resistencia a compresión del hormigón junto con la verificación del tipo y contenido de fibras. De este modo una vez que en la etapa de diseño previo en laboratorio se han comprobado experimentalmente para una dosificación las propiedades mecánicas, en especial el comportamiento postfisuración del HRF, se simplifica notoriamente y con un impacto en tiempo y costos el control de obra. En este apartado se aplica un modelo teórico con el fin de estimar a partir de las medidas de densidad de fibras

obtenidas sobre muestras de hormigón endurecido, la dosis de refuerzo. Los datos calculados se comparan con los contenidos empleados en la elaboración de los diversos hormigones.

Uno de los modelos teóricos que considera la uniformidad e isotropía en la distribución de fibras fue propuesto por Stroeven (15). En este modelo se puede predecir el número de fibras por unidad de área (N_A^P) para un elemento de hormigón de espesor t proyectado en un plano paralelo a la dirección de llenado como:

$$N_A^P = L_v * ((t/l_f + 0.5) + (2/\pi - 0.5) * w) \tag{1}$$

donde L_v es la longitud total de fibras por unidad de volumen de hormigón, l_f es la longitud de cada fibra y w el grado de orientación. Si w es cero significa que existe una isotropía perfecta en cambio un w igual a 1 indica que las fibras están orientadas en un plano perpendicular a la dirección de llenado.

Para un plano perpendicular a la dirección de llenado el número de fibras por unidad de área será:

$$N_A^T = L_v * ((t/l_f + 0.5) - 0.5 * w) \tag{2}$$

El grado de orientación w se evalúa como (15):

$$w = (2 * t/l_f + 1) * (N_A^P - N_A^T) / (N_A^P + (4/\pi - 1) * N_A^T) \tag{3}$$

Si se cuentan las fibras que cruzan un plano determinado estas expresiones se simplifican para el caso límite en que el elemento es de espesor nulo $t \rightarrow 0$, resultando:

$$N_A^P = L_v * (0.5 + (2/\pi - 0.5) * w) \tag{4}$$

$$N_A^T = L_v * (0.5 - 0.5 * w) \tag{5}$$

En la Tabla 8 se muestran los valores teóricos de las relaciones N_A^P / L_v y de N_A^T / L_v calculadas a través de la fórmula de Stroeven para diferentes valores de w .

Tabla 8. Valores teóricos de la longitud total de fibras por unidad de volumen de hormigón para diferentes grados de orientación (15).

W	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
N_A^P / L_v	0.64	0.62	0.61	0.60	0.58	0.57	0.56	0.54	0.53	0.51	0.50
N_A^T / L_v	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50

Considerando dicho modelo se utilizaron los valores de densidad de fibras obtenidos para los diferentes planos (Tablas 6 y 7) a fin de calcular, a partir de los mismos y teniendo en cuenta el tipo de fibra empleada, la dosis de fibra del hormigón.

Se denomina N_A^T a la densidad de fibras relevadas en el plano Normal al llenado y N_A^P a la densidad en los planos paralelos a la dirección de llenado. Dado que el modelo no discrimina entre los planos Longitudinal y Transversal, y considerando que en la mayoría de los casos no existen grandes diferencias en la densidad de fibras relevada en los mismos se adoptó como N_A^P al valor promedio de ambos.

El procedimiento seguido para la estimación del contenido de fibras se describe a continuación.

- Se calculó para cada HRF la relación N_A^P / N_A^T , al mismo tiempo se calcularon para diferentes grados de orientación todas las posibles relaciones entre los valores teóricos de w para N_A^P / L_v y N_A^T / L_v consignados en la Tabla 8 (el valor de w de un plano no coincide con el w del otro salvo en el caso de isotropía).
- Se individualizó el valor de la relación N_A^P / N_A^T que más se aproximaba a la obtenida experimentalmente, verificando que las densidades entre los diferentes planos guardara un orden similar al medido.
- Obtenidos w^P y w^T para cada plano, aplicando las ecuaciones [4] y [5], se puede calcular un valor de L_v para cada uno de ellos.
- Como el valor de la longitud total de fibras por unidad de volumen de hormigón es independiente de la orientación en un mismo hormigón, los datos de L_v^P y L_v^T se promediaron obteniendo un único L_v .
- A partir del valor calculado de L_v y aplicando la ecuación [6] se puede estimar la dosis de fibras.

$$L_v = F * l_f * D_{calc} \quad [6]$$

donde F es el número de fibras por unidad de peso, l_f la longitud de cada fibras y D la dosis de fibras por metro cúbico.

En la Tabla 9 se indican los valores de F , N_A^P / N_A^T , w^P , w^T , L_v^P , L_v^T y L_v promedio. A partir de dichos valores se calcularon las dosis estimadas de fibras por metro cúbico de hormigón D_{cal} . Estos últimos se presentan en la Tabla 10, donde además se comparan con las dosis utilizadas (D_{uti}) para la elaboración de los hormigones.

A partir de la Tabla 10 se aprecia que la correlación entre la dosis calculadas con el modelo y las efectivamente empleadas es bastante aceptable. En la mayoría de los casos estudiados, particularmente en aquellos en los que se utilizaron fibras de acero, los valores promedio no difieren en más de un 25%. Para HRF1 el promedio de las relaciones D_{cal}/D_{uti} fue 1.24, para HRF2 1.04 y para HRF3 1.10 mientras que para la fibra A fue igual a 1.00.

En el caso de las fibras sintéticas estructurales, por su naturaleza, el relevamiento es de menor precisión que para las fibras de acero, y esto puede justificar en parte las mayores diferencias obtenidas en este caso. La Tabla 10 muestra que las relaciones D_{cal}/D_{uti} variaron entre 0.46 y 1.87. Las diferencias entre los datos experimentales y las estimaciones teóricas también se pueden atribuir a dispersiones propias del ensayo, al efecto pared de las probetas, así como al grado de homogeneidad en la distribución de fibras en el hormigón fresco. En hormigones con fibras sintéticas estructurales se observó que pueden producirse fenómenos de segregación con formación de "erizos" para altos contenidos de fibras.

Tabla 9. Parámetros para el cálculo de la longitud total de fibras por volumen de hormigón.

Hormigón	N_A^P / N_A^T	w^P	w^T	L_v^P	L_v^T	L_v
HRF1A	1.94	0.60	0.40	2.84	2.83	2.83
HRF1B	2.20	1.00	0.40	2.21	2.13	2.17
	1.36	0.80	0.10	2.04	2.02	2.03
HRF1C	3.90	1.00	0.60	3.13	2.55	2.84
HRF1D	1.60	0.40	0.30	2.10	2.09	2.09
HRF1E	2.10	0.90	0.40	2.43	2.40	2.42
HRF1F	1.65	0.60	0.30	2.52	2.54	2.53
	1.46	0.60	0.20	2.85	2.85	2.85
HRF2A	2.03	0.80	0.40	4.06	4.07	4.06
HRF2B	2.16	1.00	0.40	3.69	3.66	3.66
	1.98	0.70	0.40	4.33	4.33	4.33
HRF2C	1.90	1.00	0.30	4.32	4.14	4.23
	1.02	0.20	0.15	4.04	4.06	4.05
HRF2D	1.59	1.00	0.20	3.51	3.53	3.52
HRF2E	3.22	1.00	0.60	4.30	4.25	4.27
	1.91	0.60	0.40	4.34	4.40	4.37
HRF2F	2.01	0.70	0.40	4.21	4.17	4.19
	2.60	1.00	0.45	4.90	4.80	4.85
HRF3A	2.50	0.90	0.50	1.08	1.08	1.08
HRF3B	3.52	1.00	0.60	1.49	1.35	1.42
HRF3C	1.54	0.90	0.20	1.14	1.15	1.14
HRF3D	2.33	0.60	0.50	1.32	1.32	1.32
	3.85	0.70	0.40	1.29	0.67	0.98
HRF3E	3.12	0.90	0.60	1.30	1.30	1.30
SEa	2.70	0.90	0.30	2.69	2.71	2.70
SEb ₁	1.76	0.10	0.00	0.46	0.46	0.46
SEb ₂	1.02	0.70	0.40	2.31	2.30	2.30
Sec	1.99	0.40	0.60	2.48	3.45	2.96
Aa	2.00	0.70	0.40	0.34	0.33	0.33
Ab	0.79	0.90	0.30	0.40	0.40	0.40

Tabla 10. Parámetros para el cálculo de las dosis de fibras empleadas.

Hormigón	F (fibras/kg)	l_f (mm)	L_v (m/m ³)	D_{cal} (kg/m ³)	D_{ult} (kg/m ³)	D_{cal}/D_{ult}
HRF1A	16670	30	2.83	56.7	40	1.42
HRF1B			2.17	43.5		1.08
			2.03	40.6		1.01
HRF1C			2.84	56.8		1.42
HRF1D			2.09	41.9		1.05
HRF1E			2.42	48.3		1.21
HRF1F			2.53	50.6		1.26
			2.85	57.0		1.45
HRF2A	16670	30	4.06	81.3	80	1.02
HRF2B			3.66	73.2		0.91
HRF2B			4.33	86.6		1.08
HRF2C			4.23	84.6		1.06
			4.05	81.0		1.01
HRF2D			3.52	70.4		0.88
HRF2E			4.27	85.4		1.07
			4.37	87.4		1.09
			4.19	83.8		1.05
HRF2F			4.85	97.0		1.21
HRF3A	4600	60	1.08	39.2	40	0.99
HRF3B			1.42	51.5		1.29
HRF3C			1.14	41.5		1.04
HRF3D			1.32	47.9		1.20
			0.98	35.6		0.89
HRF3E			1.30	47.1		1.18
SEa	66670	54	2.70	7.50	4	1.87
SEb ₁	179000	40	0.46	0.64	1.4	0.46
SEb ₂			2.30	3.22	2.2	1.46
SEc	92600	50	2.96	4.99	5	1.28
Aa	4400	25	0.33	30.4	30	1.01
Ab	2500	54	0.40	29.7	30	0.99

CONCLUSIONES

Estas experiencias muestran la estrecha vinculación que existe entre la distribución de fibras y las propiedades del HRF. La misma se verifica para diferentes tamaños de probetas y tipos de fibras. A la vez existe una muy buena correlación entre los parámetros representativos del comportamiento postfisuración y la cantidad de fibras. Considerando que dicho comportamiento resulta fundamental al momento de valorar la aptitud de un HRF para cualquier tipo de aplicación, la verificación de la distribución y contenido de refuerzo aparece como una herramienta de interés en el control de calidad de HRF.

Se verificaron experiencias previas acerca de la orientación en un plano que se produce en hormigones con fibras de acero. También se ha encontrado que en hormigones reforzados con fibras sintéticas estructurales puede darse una orientación preferencial en planos normales a la dirección de llenado. Sin embargo mayores experiencias se requieren con este nuevo tipo de fibras.

Finalmente y en base a las experiencias realizadas, surge que es posible utilizar modelos teóricos para estimar la dosis de refuerzo por unidad de volumen de hormigón, a partir del conteo de fibras en diversos planos. Las estimaciones fueron más ajustadas para el caso de las fibras de acero.

REFERENCIAS

- (1) Giaccio, G., Zerbino, R. y Gettu, R. "Hormigones de alta performance con fibras de acero para aplicaciones estructurales", Revista Hormigón N 33, AATH, 1999, pp. 53-63.
- (2) Giaccio, G., Zerbino, R. y Gettu, R. "Hormigones de alta performance con fibras de acero: evaluación de su comportamiento mecánico", Ciencia y Tecnología del Hormigón, N 7, 1999, pp 3-25.
- (3) Barragán, B., Giaccio, G., Soriano, M. y Zerbino, R. "Desarrollo y caracterización de hormigones autocompactables reforzados con fibras de acero", CD 15 Reunión Técnica AATH, 2003, Trabajo T-53.
- (4) Soriano, M. Zerbino, R. Giaccio, G. Barragán, B. and Gettu R. "Development and Characterization of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete", in Recent Trends in Concrete technology and structures, Chapter 37, Coimbatore India, Vol II, 2003, pp. 316-322.
- (5) Barragán B., Zerbino, R., Gettu, R., De la Cruz, C. and Bravo, M. "Development and application of fiber-reinforced self-compacting concrete", 6th International Congress Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities, Vol. Young researchers forum, Dundee, Scotland, 2005, pp.165-172.
- (6) RILEM TC 162-TDF Bending test, Final Recommendation. Materials & Structures, Vol 35, N°253, 2002, pp. 579-582.
- (7) Barragán, B.E., Gettu, R., Martín, M.A. and Zerbino, R.L. "Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete - A parametric study", Cement and Concrete Composites, Elsevier Science, Oxford, UK., V 25, N 7, 2003, pp. 767-777.
- (8) Barragán, B., Gettu, R., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Resistencia y tenacidad frente a sollicitaciones de corte en hormigones reforzados con fibras de acero", Revista Hormigón 37, AATH, 2001, pp.25-43.

- (9) BRPR-CT98-08013 "Test and design methods for steel fiber reinforced concrete", en CD, 2002.
- (10) RILEM TC 162-TDF " σ - ε design method", Final Recommendation Materials & Structures, Vol 36, N°262, 2003, pp 560-567.
- (11) Barragán, B. E. "Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete", Tesis Doctoral, UP Cataluña, 2002, 151p.
- (12) Giaccio, G.; Martín, A. y Zerbino, R. "Análisis del comportamiento en flexión de hormigones reforzados con fibras siguiendo la recomendación RILEM TC 162-TDF", CD 15 Reunión Técnica AATH, 2003, Trabajo T-51.
- (13) Giaccio, G. y Zerbino, R. "Caracterización de hormigones con fibras de acero basada en la recomendación RILEM TC 162-TDF empleando vigas de menor tamaño", en Tecnología de Estructuras de Hormigón, Ed. A. Aguado, L. Agullo, B. Barragán y G. Ramos, Barcelona, 2004, pp. 235-247.
- (14) Zerbino, R. "Hormigón reforzado con fibras: propiedades y aplicaciones estructurales", en Hormigones Especiales, Capítulo 5, Ed. E. Irassar, AATH, 2004, pp. 143-181.
- (15) Stroeven, P. "The Analysis of Fibre Distributions in Fibre Reinforced Materials", J. Microscopy, 111, 1977, pp. 283-295.
- (16) Soroushian, P. and Lee, C.D., "Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete", ACI Materials Journal, Vol 87, 5, 1990, pp. 433-439.
- (17) Stroeven, P., "Effectiveness of Steel Wire Reinforcement in a Boundary Layer of Concrete", Acta Stereol., 10/1, 1991, pp. 113-122.
- (18) Gettu, R., Gardner, D.R., Saldívar, H. and Barragán, B.E. "Study of the Distribution and Orientation of Fibers in SFRC Specimens", Materials & Structures, Vol 38, N°275, 2005, pp. 31-37.