

# INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE FIBRAS DE ACERO EN LA RESPUESTA A CORTE DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO

**Norma Lujan Ercoli<sup>(1)</sup> ; Maria Haydee Peralta<sup>(1)</sup>; Andres Negrette<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Ingeniero Civil- Docentes Investigadores Área de Estructuras – Departamento de Ingeniería Civil- Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires,-Olavarría- Bs.As. Argentina. E-mail: [nercoli@fio.unicen.edu.ar](mailto:nercoli@fio.unicen.edu.ar).

<sup>(2)</sup> Becario Alumno- Área de Estructuras – Departamento de Ingeniería Civil- Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires -Olavarría.

## RESUMEN

Resultados de investigaciones recientes muestran que el hormigón con fibras incorporadas (HRF) posee un comportamiento diferenciado con respecto al hormigón armado, en lo referente a la mejora de la ductilidad y resistencia al corte, lo cual genera un campo de aplicación en aquellos diseños que requieren este tipo de prestaciones, evitando colapsos frágiles y súbitos. El Código ACI 318/08, considera al Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, SFRC, estableciendo la posibilidad de reemplazar estribos a partir de una determinada incorporación de fibras de acero al hormigón.

En el presente trabajo se exponen las experiencias que se desarrollan en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA. Se analizó la influencia de la incorporación de fibras de acero al hormigón en el comportamiento de vigas de hormigón armado. El diseño de las vigas se efectuó de tal modo de permitir la falla por corte, con y sin estribos, y se ensayaron bajo cargas estáticas crecientes hasta la rotura. Paralelamente, se evaluó el comportamiento del material a compresión y flexión, mediante probetas cilíndricas y prismáticas respectivamente. El análisis de los ensayos permitió arribar a conclusiones referidas a ductilidad, fisuración y resistencia a esfuerzos de corte en función de la cantidad de fibras incorporadas.

## ABSTRACT

*The most recent investigations show that the Fibers Reinforced Concrete (FRC) possesses a different behavior compared to the reinforced concrete, in terms of improving the ductility and shear strength, which generates a field of application in those designs that require this type of performance, avoiding crashes and fragile collapse. The ACI 318/2008 incorporates the treatment of the SFRC, and the conditions that should be accomplished in order to substitute the stirrups obtained by the design of shear resistance.*

*In the present work experiences developed in the Structures Laboratory of the Facultad of Ingenieria, UNCPBA are shown. The influence of the incorporation of steel fibers to concrete behavior of reinforced concrete beams in the structural response it was analyzed. The design of the beams was performed in such a way to*

*allow shear failure, with and without stirrups, and tested under static loads increased until collapse. The material behavior was evaluated under compression and flexion on cylindrical and prismatic cast specimens, respectively. The results obtained allowed to arrive at conclusions referring to ductility, cracking and shear strength depending on the percentage of fiber incorporated.*

## INTRODUCCION

Investigaciones y desarrollos experimentales de las dos últimas décadas llevados a cabo con Hormigón Reforzado Con Fibras, HRF, muestran que la incorporación de fibras al hormigón, en dosis adecuadas, proporciona modificaciones en el comportamiento a nivel material y en la respuesta estructural <sup>[1],[2]</sup>. Al respecto, la incorporación de fibras al hormigón incrementa la capacidad de absorción de energía permitiendo un comportamiento más dúctil hasta la carga última. Esto resulta de interés para aquellas aplicaciones donde los aspectos de durabilidad y seguridad de las estructuras durante la vida útil de las estructuras requieren especial atención del diseñador quien, fundamentalmente, deberá atender el modo de falla de sus diseños en pos de evitar colapsos frágiles mediante un adecuado incremento de ductilidad, tenacidad y control de fisuración <sup>[3]</sup>. En particular, la incorporación de fibras de acero apunta a controlar el modo de falla frágil fundamentalmente, cuando existen elementos sometidos a esfuerzos de corte <sup>[2],[4]</sup>.

Las fibras como componente del hormigón tienen por objeto el mejoramiento de algunas propiedades, tanto en estado fresco como endurecido. Los factores principales que controlan el desempeño del material compuesto son: propiedades físicas de las fibras y de la matriz; adherencia entre las fibras y la matriz. Además la dosis de adición óptima para el mejoramiento del comportamiento estructural depende de la calidad del hormigón, según Altun et al <sup>[1]</sup>.

La evaluación del HRF en el nivel material ha demostrado que la trabajabilidad se ve afectada por la incorporación de las fibras lo cual limita su dosificación de acuerdo al tipo de hormigón que se diseñe.

La influencia, en el comportamiento en el nivel estructural, está contemplado por el ACI 318/08 <sup>[5]</sup> que establece que la incorporación de fibras de acero al hormigón en dosis mayores o iguales a 60 kg/m<sup>3</sup> produce una colaboración de las mismas en la resistencia al corte. Por su parte, el Reglamento Argentino CIRSOC 201/05 <sup>[6]</sup> no contempla dicha posibilidad.

Desde el punto de vista estructural la presencia de fibras retarda y reduce la fisuración en un elemento de hormigón, lo que incrementa la ductilidad y tenacidad del material, de importancia en la evaluación del análisis al límite o modo de falla de los elementos.

En este trabajo se presentan las experiencias desarrolladas tendientes a explorar las posibilidades de uso de HRFA, utilizando fibras de acero disponibles en el mercado y considerando la aplicación en elementos estructurales vigas de hormigón armado cargados con carga estática creciente hasta la rotura. El diseño de las secciones de hormigón armado se efectuaron según el diseño por resistencia a flexión y corte establecidos en el CIRSOC 201/ 05 <sup>[6]</sup>. Se desarrollaron los hormigones a emplear, teniendo como meta un hormigón autocompactante, HAC H-35, según CIRSOC 201/82 <sup>[7]</sup>. La utilización del HAC permitió lograr la adecuada trabajabilidad para

valores de  $60 \text{ kg/m}^3$  de fibra de acero incorporada, dado que en desarrollos anteriores <sup>[8]</sup>, con hormigón convencional la incorporación de ese porcentaje redujo la trabajabilidad en porcentajes muy altos, tornando difícil la colocación en los encofrados. Los especímenes de vigas están armados con dos cuantías de armadura longitudinal, las correspondientes a la Serie B son sub-armadas, por lo cual es de esperar un importante desarrollo de fisuras por flexión y de flexión y corte. En el caso de los especímenes de la Serie C fueron diseñados con una mayor cuantía de armadura, super-armados, para tener un marcado desarrollo de fisuras por corte.

Con respecto al armado por corte, se colocó en un caso el estribado mínimo por corte y en el otro solo se colocaron estribos en las zonas de apoyos e introducción de cargas a efectos de evaluar la colaboración de las fibras para la absorción de esfuerzos cortantes. Se evaluó el comportamiento del material a compresión y flexión, mediante probetas cilíndricas y prismáticas, respectivamente. El análisis de los ensayos permitió arribar a conclusiones referidas a aspectos relacionados con la influencia en las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, según la dosis de fibras de acero incorporadas, y en el nivel estructural se exponen las mejoras en la respuesta estructural, medida en términos de carga última, comportamiento a flexión y corte, en relación a los cuadros de fisuración que se obtuvieron hasta la rotura.

### **MECANISMOS DE RESISTENCIA A CORTANTE DE LAS VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO, HRFA. FRC**

En una viga de HRFA en rotura, la fuerza de cortante transferida por el alma debido al efecto engranaje de los áridos se incrementa, ya que ésta depende de la apertura de fisura (o de la apertura relativa de la fisura con respecto al tamaño de los áridos) y con el HRF el tamaño de la fisura se ve claramente reducido

Cuando se produce la fisuración en un elemento de hormigón armado con fibras, la presencia de unas pocas fibras en la fisura ofrece resistencia a la apertura de la misma. En consecuencia la ductilidad y tenacidad del hormigón se incrementa. Teniendo en cuenta el diferente comportamiento postpico del HRF, una vez producida la fisura de corte existen unas tensiones de tracción atravesando la fisura cuya proyección vertical equilibra al esfuerzo de corte que actúa sobre la viga. Estas tensiones de tracción equivalentes al esfuerzo necesario para arrancar las fibras de la matriz de hormigón son las que definen el comportamiento postfisuración del material <sup>[3]</sup>

Con respecto al cuadro de fisuración y tipo de rotura, se analiza teniendo en cuenta que para las dimensiones adoptadas para los especímenes de vigas de hormigón armado sin fibras a ensayar, la relación  $2.5 < a/d < 5.5$  corresponde a categoría de vigas intermedias, para las cuales hay dos tipos de fisuras inclinadas: por cortante en el alma y fisuras de cortante por flexión, según Figura 1, Art.11.3.3, ACI 318/ 08 <sup>[5]</sup> y CIRSOC 201/ 05 <sup>[6]</sup>. En la relación  $a/d$ ,  $a$  es la distancia del apoyo a la carga y  $d$  la altura de la sección de la viga, en este caso la fisuración se inicia y desarrolla en el tramo central con finas fisuras de flexión verticales, y con el aumento de la carga se desarrollan las fisuras inclinadas. Esta fisuración estará restringida según el

refuerzo por cortante, en este caso estribos verticales de dos ramas cerrados, que surgieron del diseño por resistencia a cortante. En el caso de no colocar ese estribado, ocurrirá la fisuración inclinada por tracción diagonal a partir de una distancia  $1.5 d$  medida desde el apoyo si la viga no cuenta con el estribado necesario por cortante. Para todas las vigas, la proporción entre el espacio de producido para la falla de corte y la altura efectiva fue entre 3.5 y 4.5, a fin de minimizar el efecto de arco de la acción.

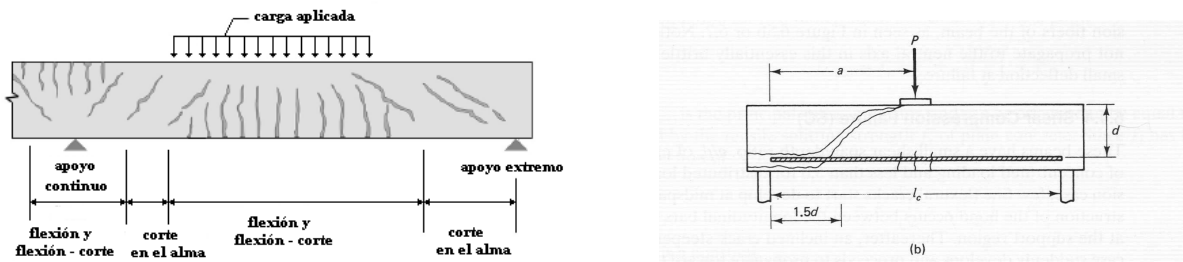


Figura 1 – Tipos de fisuración en vigas de hormigón armado, a la izquierda con cargas distribuida y a la derecha con carga concentrada para  $2.5 < a/d < 5.5$ .

El ACI 318/08 [5] incorpora en esta versión el tratamiento del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, HRF, y en el Art. 5.6.6 especifica que dicho hormigón se considera aceptable para resistencia a cortante si:

a)- la masa de las fibras de acero por metro cúbico de hormigón es mayor o igual a 60 kg.

b)- La resistencia residual obtenida en el ensayo a flexión es del 90% para una deflexión en el centro de la luz de 1/300; y del 75% para una deflexión de 1/150.

Además en el Art. 11.4.6.1(f), establece que para vigas con hormigón de peso normal reforzado con fibras de acero, con resistencia  $f'_c$  que no supere 40 MPa, y  $h$  no mayor de 600 mm, y  $V_u$  no mayor que  $\Phi 0.17 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$ , puede no colocarse el estribado mínimo especificado por el Reglamento.

Esta excepción, de acuerdo al Comentario del artículo en cuestión, proporciona una alternativa de diseño para usar el refuerzo a cortante, para el caso de vigas de HRFA, con fibras de acero en cantidades mayores a las especificadas en a), dado que ensayos de laboratorio han demostrado tener resistencia a cortante mayor que

$$V_c = 0.29 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad \text{Art. 11.2.1.1, ACI 318/08 [5]}$$

valor mayor al establecido para hormigón armado sin fibras, según Art. 11.3.1.1

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d \quad \text{Art. 11.3.1.1 CIRSOC 201/05 [6]; ACI 318/08 [5]}$$

Esto es acorde con los resultados de las experiencias desarrolladas por Parras-Montesinos [4], donde a partir de cierta dosis de fibras es posible el reemplazo del estribado diseñado por resistencia al corte, a partir de un aumento del esfuerzo de corte absorbido por la colaboración del hormigón según ACI 318/08 [5].

El método que presenta el Código ACI 318, y las normas europeas, para la evaluación de la respuesta a cortante último  $V_u$  consiste en sumar un término que

considera la contribución del hormigón Vc , otro que representa el papel de los estribos y un tercer sumando que tiene en cuenta el efecto de las fibras <sup>[3]</sup>.

## MATERIALES EMPLEADOS

Los hormigones utilizados en ambas series experimentales, fueron desarrollados en el Laboratorio de Materiales, teniendo como meta lograr un hormigón autocompactante, HAC H-35, según CIRSOC 201/82 <sup>[7]</sup>, equivalente a un H-40 del CIRSOC 201/05 <sup>[6]</sup>.

Se proyectó en el laboratorio la mezcla para obtener el *hormigón autocompactante, H-35*, y con el objetivo particular en esta etapa de analizar el comportamiento del material fundamentalmente en estado fresco a medida que se incorporaban dosis crecientes de fibras de acero, con materiales componentes de la mezcla en su mayor proporción de nuestra zona. En estado fresco, conocida es su capacidad de deformarse por acción de su propio peso llenando todos los sectores del encofrado, logrando sortear obstáculos como las armaduras y llenar completamente y sin segregación los mismos. Para el diseño de la mezcla, además del requisito de resistencia antes especificado, en los ensayos en estado fresco se estableció para el de flujo libre en cono invertido, diámetros entre 65 y 60 cm, a ser alcanzado entre 2-4 segundos. La estimación del Índice Visual se estableció entre 0 y 1, que corresponde a mezclas estables sin evidencias de segregación, Becker, E <sup>[9]</sup>.

El cemento utilizado es Cemento Pórtland Normal de 40 MPa de resistencia mínima a la compresión a los 28 días (CPN-CP40). Este tipo de material puede contener hasta un 10% de escoria de alto horno. Como agregado grueso se utilizó piedra granítica partida de tamaño máximo nominal (TM) de 12,5 mm. Este agregado cumple los requisitos establecidos en el artículo 3.2.4.2 del CIRSOC 201/05 <sup>[6]</sup>. Se utilizó como adición de reemplazo de materiales gruesos escoria de alto horno con una densidad de 2900 kg/m<sup>3</sup>.

Se dosificaron hormigones con tres tipos de agregados finos diferentes:

(1) arena silíceo con módulo de finura (Mf) de 2.6, masa específica relativa de 2640 kg/m<sup>3</sup> y adsorción de 0.7%

(2) arena granítica triturada con módulo de finura (Mf) de 2.9, masa específica relativa de 2680 kg/m<sup>3</sup> y adsorción de 0.9%

(3) arena silíceo con un 30% de reemplazo de arena granítica triturada cuyo módulo de finura (Mf) de 2.8, su masa específica relativa de 2660 kg/m<sup>3</sup> y su adsorción de 0.8%. Para este último caso cabe mencionar que 30% es el límite de reemplazo permitido según lo indicado en el artículo 3.2.3.1 del CIRSOC 201/05. Además todos los agregados cumplen el resto de las normativas establecidas por el artículo 3.2.3.2 del mismo reglamento.

Como aditivo superfluidificante se utilizó un producto comercial que cumple con las normas IRAM 1663 y las especificaciones de la norma ASTM C-494 para aditivos tipo A y F. Es del tipo policarboxilato modificado en base acuosa, de 1090 kg/m<sup>3</sup> de densidad a 20° C, y con una dosis de uso recomendada por el fabricante entre el 0.4% y 1.5% del peso de cemento empleado. En Tabla 1 se indica la dosificación de la mezcla diseñada para el HAC.

Tabla 1-Diseño de la mezcla para el HAC

MATERIAL	DOSIS
Cemento	272 kg/m <sup>3</sup>
Escoria	131 kg/m <sup>3</sup>
Superfluídificante	1,77 kg/m <sup>3</sup>
Agua	210 kg/m <sup>3</sup>
Arena silícea	246 kg/m <sup>3</sup>
Arena Granítica Triturada	574 kg/m <sup>3</sup>
Piedra partida	851 kg/m <sup>3</sup>

Se utilizaron fibras de acero para incorporar al hormigón tipo Wirand FF1 de Maccaferri (10) cuyas propiedades físicas y mecánicas se indican en Tabla 2, y el aspecto según se observa en Figura 2.

Tabla 2-Características de las Fibras de Acero

Material	Relación L/D (largo/diám)	Diámetro [mm]	Largo [mm]	Módulo de Elasticidad [MPa]	Resist. a Tracción [MPa]
Fibras de Acero	50	1	50	210000	1100



Figura2-Fibras de Acero

Las barras armaduras longitudinales y estribos utilizadas corresponde a calidad DNA- 420, según normas IRAM-IAS U500-528-98 en CIRSOC 201/05.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se efectuaron los siguientes desarrollos experimentales:

➤ Para **CARACTERIZACION DEL MATERIAL:**

Sobre el hormigón en estado fresco, ensayos de Flujo Libre con Cono Invertido para el HAC y medición de temperatura e Índice Visual.

Sobre el hormigón en estado endurecido en probetas cilíndricas, 150 mm x 300 mm, se evaluó la resistencia a compresión en probetas cilíndricas, IRAM 1546.

Sobre el hormigón endurecido en probetas prismáticas, 75 mm x 100 mm x 500 mm, se determinó la resistencia a flexión en el nivel material, según ASTM C78-84.

➤ **En el NIVEL ESTRUCTURAL:**

**CARACTERÍSTICAS DE LOS ESPECIMENES TIPO VIGA**

El trabajo expone el desarrollo de dos programas experimentales, que denominamos Serie B y Serie C, cuyas características se detallan a continuación:

**Características Geométricas y de Disposición de armado para la SERIE B**

Se confeccionaron en el Laboratorio de estructuras seis especímenes de vigas, de dimensiones 150 mm x 300 mm x 3000 mm, según Figura 3, para la evaluación del comportamiento en el nivel estructural. Cuatro vigas fueron llenadas con el Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, HRFA, en proporciones que se detallan en Tabla 3, y dos especímenes con la misma mezcla del hormigón proyectado sin fibras incorporadas, el cual se toma como testigo para los posteriores análisis. Se analizaron experimentalmente a flexión hasta la rotura, con escalones crecientes de carga estática, aplicadas en los tercios de la luz, según ASTM C78, siendo a/d= 3.3.

El diseño por resistencia a flexión de estos elementos se efectuó de manera tal de obtener para la geometría definida, secciones sub-armadas, CIRSOC 201/05 [6], con armadura longitudinal formada por 3 barras de acero del tipo ADN-420, con un diámetro de 12mm, resultando una cuantía de armadura de 0.75 %, siendo el valor teórico para carga última de diseño de 70 kN. La carga en correspondencia con el Momento de fisuración, calculada tomando una tensión de rotura por flexión,

$$f_r = 0.625 \cdot \sqrt{f_c'} = 3.95 \text{ MPa, es de } F_{\text{isuración}} = 10 \text{ KN.}$$

Con respecto al diseño por cortante, se efectuaron dos disposiciones de estribado, según Figura 3. Se colocó estribado mínimo según normativa CIRSOC 201/05 [6] en tres especímenes, uno sin fibras y los restantes con fibras incorporados en las dosis adoptadas. En los restantes modelos, se colocó un estribado solo en la zona de apoyos e introducción de cargas, a efectos de inducir una falla por cortante, y evaluar la contribución del HRF para absorber dicho esfuerzo. La resistencia al corte proporcionada por el hormigón, HAC H-35, según Art. 11.3.1.1 CIRSOC 201/ 05 [6]; ACI 318/08 [5], es de  $V_c = 42.7 \text{ KN}$ .

Tabla 3- Características de los modelos Serie B

Dosificación de fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	Modelos Serie B HAC H-35	
	Denominación	Estribado
0	B0	1φ6 c/ 15 cm
0	B*0	3φ6 en apoyos y zonas aplicación cargas
30 ( 1.25 % en peso)	B3	1φ6 c/ 15 cm
30	B*3	3φ6 en apoyos y zonas aplicación cargas
60 ( 2.50 % en peso)	B6	1φ6 c/ 15 cm
60	B*6	3φ6 en apoyos y zonas aplicación cargas

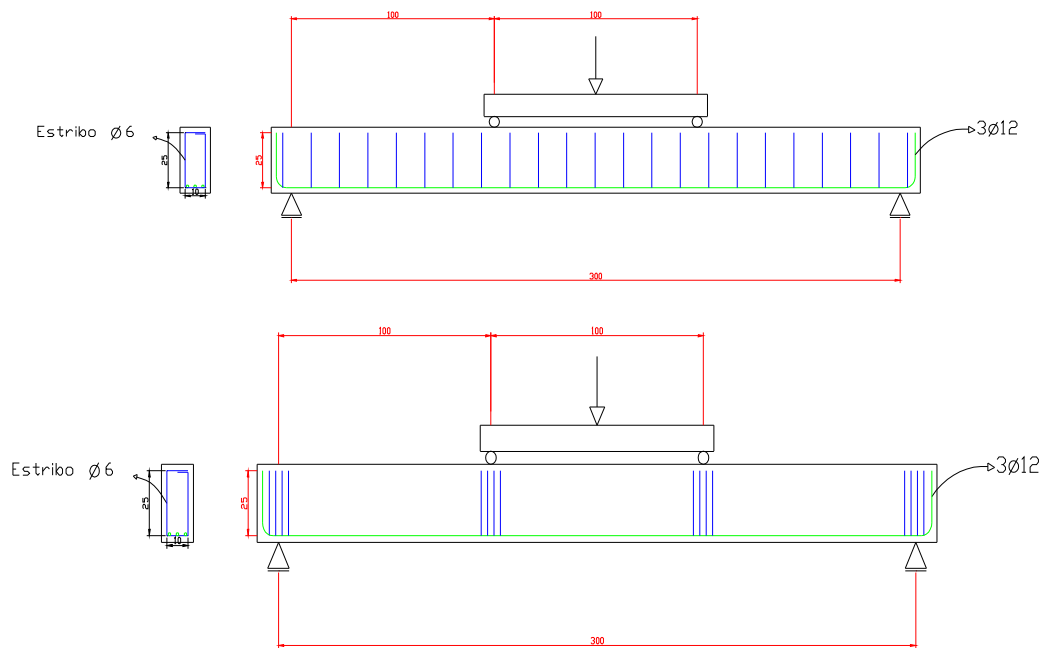


Figura 3-Eschema de armado longitudinal y estribado de vigas. Diagrama de carga del ensayo. Serie B

### Características Geométricas y de Disposición de armado para la SERIE C

Se confeccionaron en el Laboratorio de estructuras tres especímenes de vigas, de dimensiones 150 mm x 300 mm x 2500 mm, según Figura 4, para la evaluación del comportamiento en el nivel estructural. Dos vigas fueron llenadas con el Hormigón Reforzado con Fibras de Acero, HRFA, en proporciones que se detallan en Tabla 4, y el restante con la misma mezcla de hormigón proyectado sin fibras incorporadas, el cual se toma como testigo para los posteriores análisis. Se analizaron experimentalmente a flexión hasta la rotura, con escalones crecientes de carga estática, aplicada en forma concentrada, según Figura 4, a 1.32 m del apoyo izquierdo, resultando  $a/d = 4.4$ .

El diseño por resistencia a flexión de estos elementos se efectuó según CIRSOC 201/05 <sup>[6]</sup>, con armadura longitudinal formada por 2 barras de acero del tipo ADN-420, con un diámetro de 20mm, resultando una cuantía de armadura de 1.4 %, siendo el valor teórico para carga última de diseño de 110 kN. La carga en correspondencia con el Momento de fisuración, calculada tomando una tensión de rotura por flexión,  $f_r = 0.625 \sqrt{f'_c} = 3.95$  MPa, es de  $F_{\text{fisuración}} = 21$  KN.

En cuanto al estribado adoptado, en el sector de la derecha en una longitud de 1.3 m solo se colocaron estribos en el sector del apoyo, mientras que a la izquierda del punto de aplicación de la carga concentrada, se colocó estribado mínimo por reglamento. Por ser iguales las dimensiones geométricas y calidad del hormigón que las vigas de la Serie B, la resistencia al corte proporcionada por el hormigón, según Art. 11.3.1.1 CIRSOC 201/05 <sup>[6]</sup>; ACI 318/08 <sup>[5]</sup>, es de  $V_c = 42.7$  KN.

Tabla 4- Características de los modelos Serie C

Dosificación de fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	Modelos Serie C (HAC) H-30	
	Denominación	Estribado
0	Serie C-00	3φ6 en apoyos y zonas aplicación de cargas. 1φ6 c/ 15 cm
40 ( 1.25 % en peso)	Serie C-40	IDEM Serie C-00
60 ( 2.50 % en peso)	Serie C-60	IDEM Serie C-00

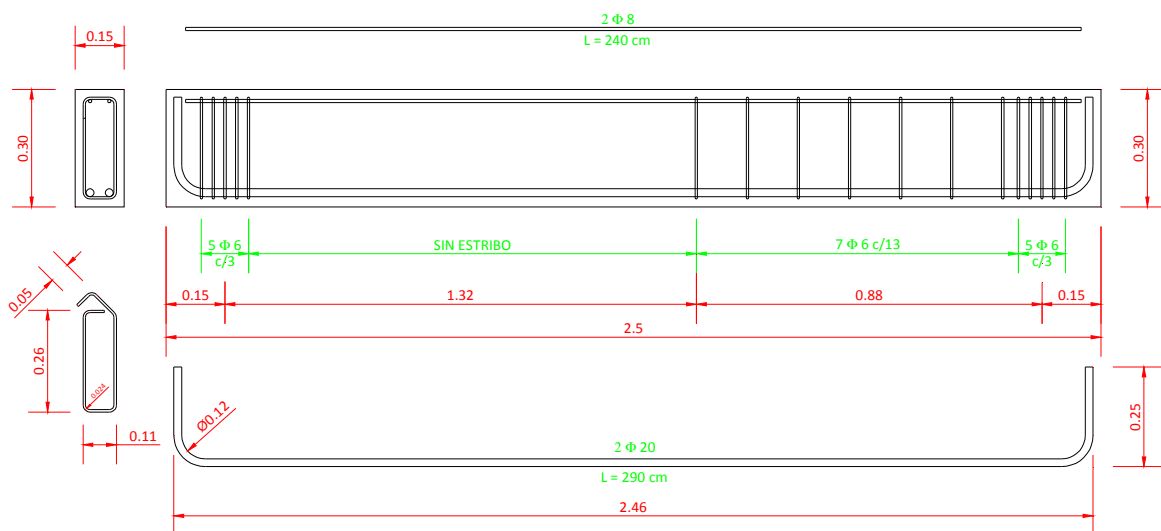


Figura 4-Eschema de armado longitudinal y estribado de vigas. Diagrama de carga del ensayo. Serie C

## ENSAYOS A NIVEL MATERIAL. CARACTERIZACION del HORMIGON

- **Estado Fresco**

Tabla 5- Extendidos medidos en ensayo Flujo Libre con Cono Invertido

Dosificación de fibras [kg/m <sup>3</sup> ]	Modelos Serie B- HAC H-35 Extendido [cm]	Modelos Serie C- HAC H-35 Extendido [cm]
0	52	65
30	46	
40		55
60	45	52

La Figura 5 muestra el aspecto de la mezcla con una incorporación de fibras de acero de 40 kg/m . Para estas mezclas se realizó el ensayo de flujo libre con cono invertido, midiendo el diámetro de la mezcla extendida, según se observa Figura 6, que se vuelcan en Tabla 5. Además mediante observación visual, se determinó que no presentaba segregación, o sea bordes “limpios”, Becker E. <sup>[9]</sup>.



Figura 5- Aspecto HAC con 40 kg/m<sup>3</sup> de fibras incorporadas



Figura 6 - Ensayo Flujo Libre

- **Estado Endurecido**

### **ENSAYOS A COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS**

Los ensayos a compresión arrojaron los resultados de la Figura 7 para los dos programas experimentales, Serie B y C. Dichos resultados permiten indicar, para los casos en estudio, que la resistencia a compresión se ve muy poco afectada por la incorporación de fibras. Esto es acorde con los resultados de los ensayos efectuados por Altun et al <sup>[1]</sup>.

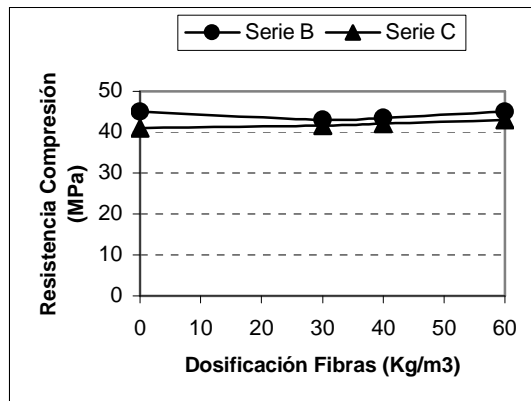


Figura 7- Resistencia a compresión Vs. Dosis de fibras para Series B y C

### ENSAYOS A FLEXIÓN EN PROBETAS PRISMÁTICAS

Para los especímenes correspondientes a las Serie B y C, se efectuaron ensayos a los 28 días, sobre las probetas prismáticas de 75 mm x 100 mm x 500 mm, en prensa INSTRON, con desplazamientos controlados, según la configuración indicada en Figura 8.



Figura 8-Vista de ensayo antes y después de la rotura

En Figura 9 se muestran los resultados obtenidos para la Serie B, no se denotan variación en los valores de la resistencia a tracción por flexión hasta 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero incorporadas, incrementándose en un 28% para 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero incorporadas. Para los especímenes de la Serie C no se denotan variaciones significativas en los valores de ensayo.

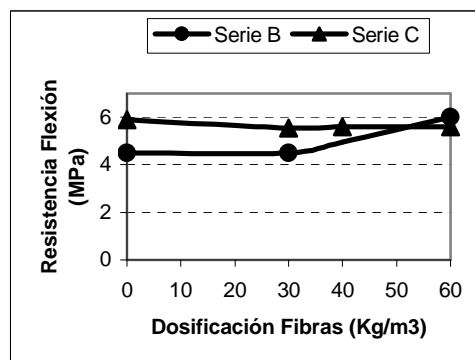


Figura 9-Resistencia a tracción por flexión vs dosis de fibras, Series B y C.

En Figura 10 se muestran las curvas correspondientes a la relación Carga-Flecha obtenidas durante el ensayo a flexión para las probetas prismáticas correspondientes a la serie B. De igual manera en la Figura 11 se presentan las curvas para la Serie C. En ambos casos se evidencia el incremento del área debajo de la curva de ensayo a medida que se aumenta la dosis de fibras incorporadas, indicativo de un incremento de la tenacidad y ductilidad del material.

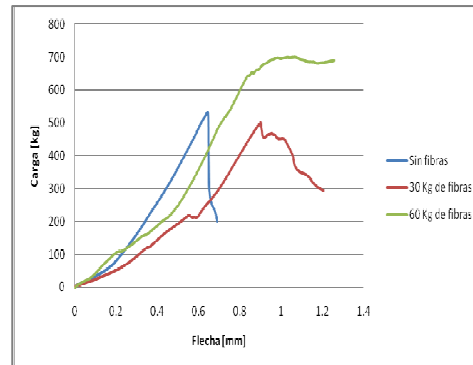


Figura 10–Diagrama Carga-Flecha del ensayo de las probetas prismáticas Serie B

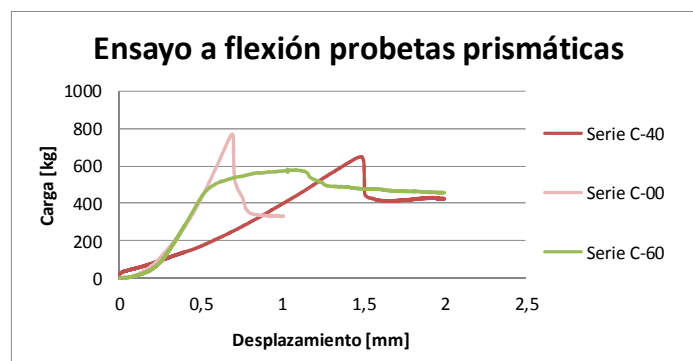


Figura 11–Diagrama Carga-Flecha del ensayo de las probetas prismáticas Serie C

### Recuento de Fibras y Orientación en probetas prismáticas

Se observó que la orientación de las fibras en la superficie de rotura de las probetas prismáticas, para ambas Series, están alineadas en un plano aproximadamente horizontal, Figuras 12 y 13, coincidente con lo expresado por Torrijos et al <sup>[11]</sup>, acorde a la forma de moldeo del espécimen desde el centro por la parte superior.



Figura 12 – Plano de fractura, ensayo probetas prismáticas Serie B, con 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero en la prensa INSTRON



Figura 13 – Vista del plano de fractura, ensayo probetas prismáticas Serie B, con 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero

Esta disposición y orientación de las fibras de acero influiría sobre el proceso de fisuración, colaborando a disminuir la longitud y los anchos de fisuras.

### EN EL NIVEL ESTRUCTURAL

La Figura 14 muestra la configuración de los ensayos realizados con aplicación de escalones crecientes de carga estática, para las vigas de la Serie B y C en el marco de carga del Laboratorio de Estructuras, a la izquierda y derecha respectivamente.



Figura 14-Laboratorio de Estructuras - Configuración e Instrumental para medición carga aplicada en ensayos de vigas Serie B ( a la izquierda) y C ( a la derecha)

En la Figura 15 se muestra el registro fotográfico obtenido para las Series B y C, para el escalón de carga de rotura, según Tabla 6.

Modelo Serie B	Carga de rotura [kN]	$\frac{P_{rot}}{P_{rot.teorico}}$ (%)
B0	85	21
B*0	81	20
B3	100	42
B*3	95	36
B*6	95	36

Modelo Serie C	Carga de rotura [kN]	$\frac{P_{rot}}{P_{rot.teorico}}$ (%)
00	125	22
40	146	41
60	145	41

Tabla 6- Carga de rotura para cada modelo [kN], Serie B y C, respectivamente



Figura 15- Registro fotográfico para las vigas de la Serie B, correspondiente a la carga de rotura.



Figura 16- Registro fotográfico para las vigas de la Serie C, correspondiente a la carga de rotura.

La instrumentación de los ensayos en el marco de carga, permitió obtener la carga última, y la relación de las cargas y los desplazamientos máximos (flechas) para distintos escalones de carga. En la rotura, la flecha en los especímenes de la Serie B y C duplicó los valores medidos para los especímenes testigos de hormigón armado sin incorporación de fibras.

Se relevaron los cuadros de fisuración correspondientes a las cargas últimas, para los modelos ensayados de las Series B y C, los cuales se muestran en las Figuras 17 y 18 respectivamente.

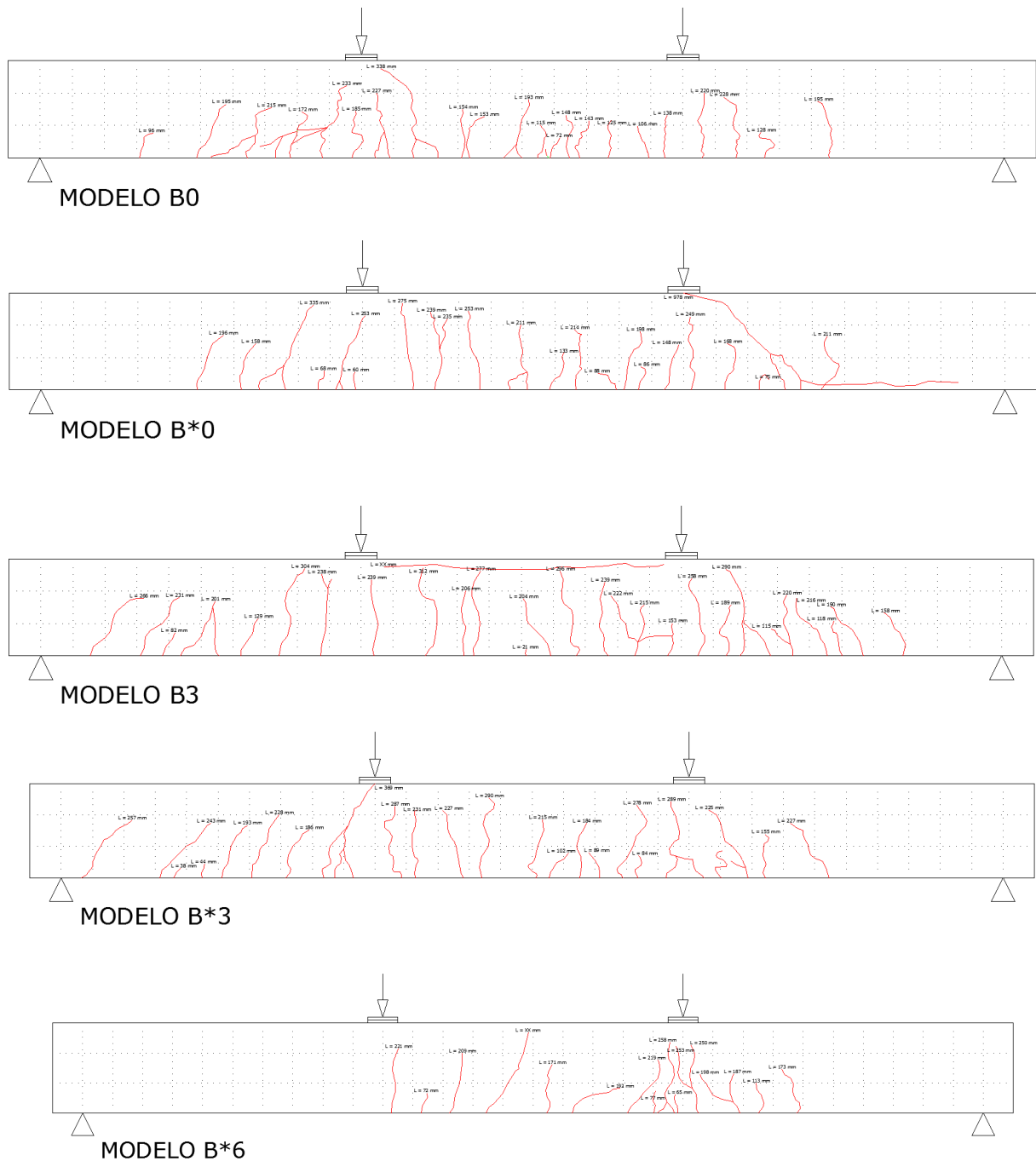
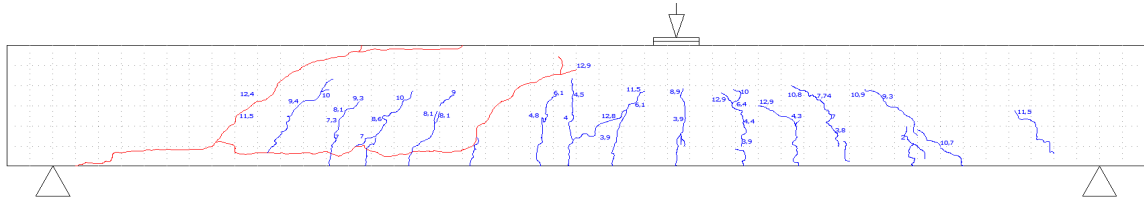
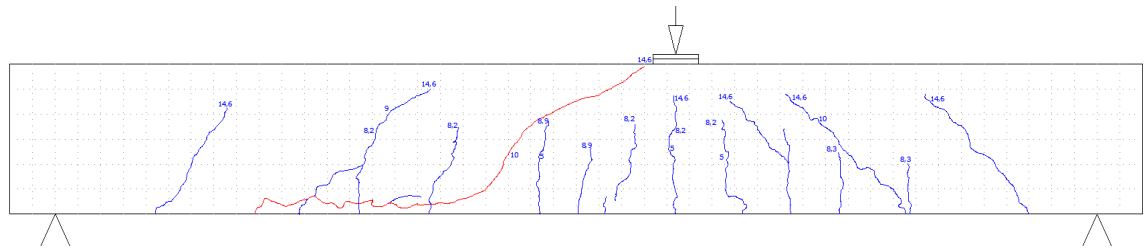


Figura 17- Mapas de Fisuración para modelos Serie B correspondientes a la carga de rotura.

### Serie C- Modelo 00



### Serie C- Modelo 40



### Serie C- Modelo 60

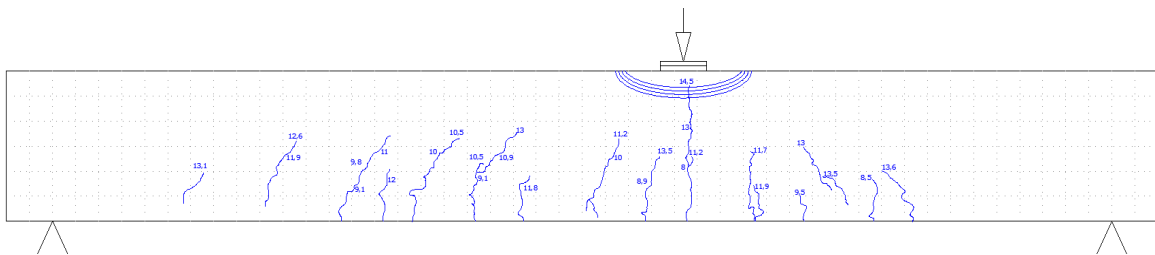


Figura 18- Mapas de Fisuración para modelos Serie C correspondientes a la carga de rotura.

Del análisis de las Figuras 17 y 18 surge que en ambas series se observó que las primeras fisuras fueron por flexión y por flexión y corte.

Este cuadro de fisuración resultó más extendido en el tercio central de la luz de las vigas correspondientes a la Serie B, concordante con el tipo de armado adoptado, donde además la cantidad de fisuras principales se mantiene en todos los modelos de la serie. Los anchos de fisuras relevados, originados por flexión en los modelos con fibras incorporadas, denotan una importante disminución respecto a las relevadas en el modelo sin la incorporación de fibras, que están en el orden del 1/10. Las fisuras por esfuerzo de corte en los tercios laterales de la luz de las vigas, se presentan en mayor número y de menor ancho, a medida que se aumenta el porcentaje de fibras incorporadas. Los cuadros de fisuración observados, son similares a los presentados en la referencia Cucchiara C. et al [2].

Los cuadros de fisuración correspondientes a la Serie C presentan resultados acordes al diseño efectuado. Es de interés centrar el análisis de los resultados experimentales en la zona de la izquierda del punto de aplicación de la carga concentrada, dado que presenta ausencia de estribos, lo cual implica que el esfuerzo de corte se absorbe mediante la contribución del hormigón, en el caso del espécimen sin fibras, y para los restantes se puede evaluar la contribución de las fibras en la absorción de dicho esfuerzo y su influencia en el cuadro de fisuración resultante. Las fisuras presentan una marcada inclinación desde su inicio. A medida

que se aumentaron las dosis de fibras incorporadas se denoto un retraso en el inicio de la fisuración en esa zona, que fue a los 39 KN para el espécimen sin fibras, de 82 KN para el modelo con 40 Kg/m<sup>3</sup> de fibras incorporadas y de 89 KN para el de 60 kg/m<sup>3</sup>, siendo nuevamente el ancho de fisura muy inferior respecto del espécimen testigo. Esto es coincidente con los resultados de diversas investigaciones <sup>[2], [3]</sup>, de que cuando se produce la fisuración en un elemento de hormigón armado con fibras, la presencia de unas pocas fibras en la fisura ofrece resistencia a la apertura de la misma. Además pueden observarse dos fisuras inclinadas en el alma de la viga para el espécimen con 60 Kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero incorporadas, que se inician para valores de carga entre 120 y 130 KN con una apertura de fisuras casi imperceptible, relevada con el uso de lupa autoimluminada.

En cuanto a la cuantificación de la resistencia al corte en función de los valores de carga de rotura medidos significa un incremento del 23% con respecto a la contribución para el hormigón sin fibras según CIRSOC 201/05, en coincidencia con otros desarrollos experimentales recientes <sup>[3]</sup>.

### **CONSIDERACIONES FINALES**

- En el nivel material para el HAC utilizado para el llenado de las dos series de vigas, los resultados experimentales obtenidos en el estado fresco para el Hormigón Autocompactante proyectado, HAC H-35, indican que es posible la incorporación de los porcentajes de fibras incorporados y se denota una disminución de los asentamientos, en parte influenciada por el tipo de agregados graníticos provenientes de la trituración.
- Los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión no presentaron variaciones significativas para las dosis de fibras de acero incorporadas utilizadas en este desarrollo. En cuanto a la resistencia flexional no presentó variación hasta los 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras incorporadas, presentando un aumento significativo para 60 kg/m<sup>3</sup> de fibras incorporadas, para el caso de los especímenes de Serie B.
- El análisis de los cuadros de fisuración obtenidos, permite indicar que existen diferencias entre los modelos de vigas con y sin incorporación de fibras, notándose una disminución del ancho máximo de las fisuras y una mayor cantidad de fisuras de corte por flexión de menor ancho con el aumento de la dosificación de fibras.
- Según los resultados experimentales obtenidos la incorporación de fibras contribuye a la resistencia al corte, en concordancia con los resultados obtenidos en otras investigaciones <sup>[9]</sup>.
- En concordancia con las dosis necesarias establecidas en el ACI 318/08 <sup>[3]</sup> para considerar la contribución de las fibras al corte (mayor o igual a 60 kg/m<sup>3</sup>), el Modelo B\*6 de la Serie B, no presentó fisuras por tracción diagonal en la zona de máximo cortante para la carga de rotura. Lo indicado permite inferir que, efectivamente, serían las fibras incorporadas las que están colaborando en la absorción de dicho esfuerzo en ausencia de armadura de estribos.
- En el caso de los especímenes de la Serie C los cuadros de fisuración relevados denotan un retraso en el inicio de los procesos de fisuración, y una notable disminución de los anchos de fisura relevados, del orden del décimo respecto al testigo de hormigón sin fibras.

- Los resultados obtenidos permiten inferir que el hormigón con fibras incorporadas (HRF) posee un comportamiento diferenciado con respecto al hormigón armado, relacionado con la ductilidad en la respuesta y disminución de los anchos de fisura, lo cual le otorga importantes prestaciones en aquellos diseños con exigencias por durabilidad en la vida útil de las estructuras y en el diseño por capacidad para cargas sísmicas.

El grupo de trabajo continúa desarrollando esta línea de investigación, planteando nuevos desarrollos experimentales aplicados a vigas, con el objetivo de obtener conclusiones más generales del comportamiento estructural del HRF en lo referido al proceso de fisuración, cantidad y anchos de fisuras, y a la colaboración de las fibras al esfuerzo de corte, como posible sustitución de estribado.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Altun, T. Haktanir, K. Ari, "Effects of Steel Fiber Addition on Mechanical Properties of Concrete and RC Beams", *Construction and Building Materials*, article in press, available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), accepted December 2005.
- [2] Cucchiara C., La Mendola L., Papia M., Effectiveness of stirrups and steel fibers as shear reinforcement, *Cement and Concrete Composites*, 26, 2004, pp. 777–786.
- [3] J. Turmo, N. Banthia, R. Gettu y B. Barragán –Estudio del comportamiento a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras. *Materiales de Construcción*. Vol. 58, 292, 5-13.octubre-diciembre 2008.
- [4] Parras-Montesinos, G.J, "Shear strength of beams with deformed steel fibers", *Concrete International*, 28 (11) (2006) 57-66.
- [5] ACI Committee 318, ACI 318 /08. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008.
- [6] CIRSOC 201/05, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI-CIRSOC, 2005.
- [7] CIRSOC 201/82, Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado.-CIRSOC, 1982.
- [8] Effects Of Steel Fiber Addition Of Structural Behaviour Of Reinforced Concrete Beams- Ercoli, N.; Peralta M. H.; Ortega, N.; La Malfa, S.; Librandi, C- 50ºCongresso Brasileiro do Concreto-"Concreto para Infra-Estrutura e Preservação do Meio Ambiente" IBRACON 2008- Salvador, Bahia, Brasil .
- [9] Becker, Edgardo- "Hormigones de Alto Desempeño – HAC". LOMAX- LOMA NEGRA. Conferencia en Ciclo Modernas Experiencias Tecnológicas, MET 2008. Facultad de Ingeniería, UNCPBA. Olavarria. Set. 2008.
- [10] MACCAFERRI (2009) Manual Técnico "Fibras como elemento estructural para el refuerzo de hormigón"
- [11] Torrijos, Zerbino, Barragán, Estudio de la orientación y distribución de fibras de acero en hormigón autocompactante. Primer Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Publicado en Comunicaciones Página 555, Valencia, 2008.

### AGRADECIMIENTOS

A las empresas MACCAFERRI, ACINDAR S.A. y CONAR que contribuyen al desarrollo de esta investigación con el aporte de los materiales utilizados.

Al Ing. Oscar Cabrera del Laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería de UNCPBA, por su asesoramiento.