

ORIENTACIÓN DEL REFUERZO Y ANISOTROPÍA EN HORMIGONES CON FIBRAS

Torrijos, María Celeste¹, Giaccio, Graciela² y Zerbino, Raúl¹

LEMIT-CIC, 52 e/121 y 122, (1900) La Plata, Argentina

Palabras claves hormigón reforzado con fibras, orientación, distribución

RESUMEN

El uso de hormigón reforzado con fibras ha crecido significativamente a nivel mundial, la gran variedad de fibras y los avances en el conocimiento han permitido un mejor aprovechamiento de este material de alta performance. Las fibras controlan la fisuración variando la eficiencia del refuerzo conforme el tipo, cantidad, distribución y orientación de las fibras; pero esto último también puede variar según las dimensiones de los elementos estructurales y las propiedades del hormigón fresco. Numerosos estudios confirman que las fibras se ubican en planos normales a la dirección de llenado, pero en mezclas autocompactantes o de elevada fluidez la velocidad de flujo y el efecto pared afectan su orientación en elementos delgados. En este trabajo se discuten los principales factores que inciden sobre la orientación de las fibras en hormigón vibrado y autocompactante, y se muestran ejemplos de su influencia en la respuesta post-fisuración.

INTRODUCCIÓN

Es sabido que la incorporación de fibras al hormigón controla el desarrollo de fisuras y mejora su respuesta residual a tracción. El tipo y dosis de fibra, la adherencia con la matriz y la orientación y distribución en el hormigón son factores determinantes. Pero la orientación de las fibras varía con las dimensiones del elemento estructural, las propiedades del hormigón fresco y las condiciones de colocación y compactación.

El desarrollo de hormigones autocompactantes con fibras ha dado lugar a estudios sobre el efecto del flujo del hormigón en la orientación de las fibras; encontrando que el tema adquiere relevancia en elementos delgados.

Existen antecedentes en mezclas con fibras de acero o macrofibras sintéticas, pero no es tal el caso cuando se utilizan macrofibras de vidrio de reciente desarrollo. Este trabajo discute los factores que inciden en la orientación de las fibras en hormigón vibrado y autocompactante y su influencia en la respuesta post-fisuración.

¹ Investigador CONICET. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP.

² Investigador CIC. LEMIT - Facultad de Ingeniería UNLP.

SOBRE LA ORIENTACION DE LAS FIBRAS EN EL HORMIGON

En Hormigón Reforzado con Fibras convencional Vibrado (HRFV) influyen el tipo y tiempo de compactación. El vibrado externo da lugar a una orientación preferencial en planos (2D) normales al llenado y un exceso en el tiempo de vibrado aumenta el riesgo de segregación de las fibras (1-4). Dicha tendencia a la segregación depende de las propiedades del hormigón fresco, en mezclas de gran fluidez la segregación de las fibras tiende a ser mayor y esto incide en las propiedades mecánicas residuales (5-6). Kooiman (2) evaluó la influencia del proceso constructivo sobre la distribución y orientación de las fibras en dovelas de 3,6 m de largo y 0,35 m de espesor, que fueron llenadas y vibradas por capas; los lados cortos del molde orientaron las fibras al verter el hormigón pero luego de vibrar las fibras se orientaron en planos horizontales, y se detectó cierta segregación de fibras en la parte central. En Torrijos (7) se analizó la influencia del tipo de fibra comparando tres HRFV con el mismo hormigón de base, incorporando 40 y 80 kg/m³ de fibras de acero de 30 mm de longitud y 40 kg/m³ de una fibra de 60 mm de largo. Se observó que las fibras más largas son más afectadas por el efecto pared y se orientan en dirección longitudinal, y que una mayor dosis de fibras da lugar a una mayor orientación. En hormigones elaborados con macrofibras sintéticas también se observó una orientación preferencial en planos horizontales, pero la misma fue menos marcada que en hormigones con fibras de acero (7).

En Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras (HACRF) las propiedades en estado fresco y las condiciones de colocación tendrán una gran influencia en la distribución del refuerzo. La viscosidad afecta la resistencia a la segregación (8), la dirección y velocidad del flujo orientan las fibras (9-12) en mayor medida que en un HRFV y las fibras se alinean a lo largo de las paredes de los moldes (13-14). En general a mayor longitud de las fibras aumenta su orientación (9, 12), sin embargo para Vanderwalle et al (10) la influencia de la longitud en su alineación es despreciable.

Grunewald (9), estudió la orientación de fibras de acero de 30 y 60 mm en dovelas para túneles a través de rayos X y su vinculación con las propiedades mecánicas; las fibras se orientaron a lo largo de las paredes del molde, siendo este efecto mayor para las fibras más largas, pero donde no había pared no encontraron efectos del flujo. En otra experiencia sobre prismas encontró que el número de orientación disminuyó con la distancia desde el extremo donde se vertió el hormigón.

Stähli et al (14) para analizar la influencia de las propiedades en estado fresco y del flujo del hormigón utilizaron moldes en forma de U donde vertieron el hormigón por una rama y lo dejaron fluir hasta la otra. A través de tomografía computada concluyeron que las fibras se alinean con el flujo del hormigón y cuanto más rápido fluye el hormigón mayor es su alineación; además observaron que según las diferentes velocidades del flujo las fibras pueden rotar y alinearse en su dirección.

Torrijos et al (15) evaluaron la influencia del tipo de fibra y el modo de colocación llenando prismas de 150x150x600 mm en tres formas distintas: vertiendo el HACRF desde el centro o desde un extremo con las probetas dispuestas en forma horizontal o desde un extremo del molde ubicado a modo de columna en dirección vertical. La experiencia se repitió con fibras de acero de 30 y de 50 mm de longitud y con macrofibras sintéticas. Se observó que la forma de llenado y las características del molde tienen gran influencia sobre la disposición de las fibras, el efecto pared depende de la relación entre las dimensiones del molde y las dimensiones de las fibras, y con las fibras de acero más largas se observaron diferencias entre los prismas que fueron llenados desde el centro y aquellos moldeados desde un extremo del molde luego que el HACRF atravesara una

tubería de 5 m de largo donde el flujo orientó las fibras. Con las fibras de acero más cortas o con macrofibras sintéticas esta diferencia no fue apreciable.

Comparando HACRF y HRFV, Vanderwalle et al (10) indican mejor comportamiento postpico en el primer caso y lo atribuyen a la alineación de las fibras por efecto del flujo. Sanal y Ozyurt. (16) estudiaron la relación entre el tipo de fibra y el modo de colocación encontrando que las fibras se alinean en la dirección del flujo y que la cantidad de fibras alineadas disminuye con el ancho del elemento estructural y al disminuir el largo de las fibras. La respuesta post pico puede variar significativamente con la orientación.

Ferrara et al, (17) moldearon dos losas de 30x500x1000 mm con HACRF de acero, en una el hormigón fluyó a lo largo de la losa desde el lado más corto y en la otra el hormigón fue vertido desde el centro de uno de los lados más largos. Aserraron y ensayaron a flexión placas en dos direcciones ortogonales observando un post pico diferencial en las placas de la primera losa y una respuesta similar en las de la segunda.

Zerbino et al (18) estudiaron la orientación de las fibras en elementos delgados, losas y paneles, elaborados con HACRF de acero o con macrofibras sintéticas; concluyen que el flujo y el efecto pared producen anisotropía en la orientación de las fibras y las propiedades residuales pueden diferir significativamente en distintas zonas y/o direcciones en elementos delgados y la respuesta post-pico puede pasar de una tipo “endurecimiento” a otra con caída substancial de la capacidad residual. Pujadas et a (19) realizaron un estudio moldeando losas de igual espesor y longitud pero diferente ancho con HACRF con macrofibras sintéticas. Encontraron que estas fibras tienden a orientarse en forma paralela a las superficies del molde. En las zonas donde el flujo del hormigón no está influenciado por las paredes las fibras se orientan perpendiculares a la dirección del flujo. Las paredes de los moldes reorientan las fibras en su dirección, cuanto menor es el ancho del molde mayor es la orientación de las fibras en dirección longitudinal.

Lameiras et al (20) evaluaron la influencia de las condiciones de colocación en las propiedades de fractura de un HACRF, y encontraron que la orientación de las fibras resulta altamente influenciada por el flujo del hormigón. Por ejemplo, en el caso de un flujo radial, las fibras tienden a orientarse en forma perpendicular al flujo. En este trabajo concluyeron que para definir un valor de diseño de las propiedades de fractura, se debe tener en cuenta el procedimiento de moldeo y el flujo del hormigón.

En la Tabla 1 se resumen los principales factores que afectan la orientación de las fibras en HACRF y HRFV (7). Tanto en HACRF como en HRFV la longitud de las fibras y el efecto pared tienen una muy alta influencia sobre la orientación, los otros dos factores de muy alto impacto son la compactación por vibrado para el HRFV y el flujo del hormigón para el HACRF. Con un grado menor de influencia aparece el tipo de fibra encontrándose una mayor orientación de las fibras de acero respecto de las sintéticas para los dos tipos de hormigones; la dosis de fibra parece tener un bajo impacto en la orientación en un HRFV y un impacto muy bajo en HACRF.

Tabla 1. Factores que influyen en la orientación de las fibras en HACRF y HRFV.

Tipo de hormigón	Fibras				Colocación y compactación			
	Longitud	Tipo		Dosis	Efecto pared	Efecto del flujo	Compactación	
		Acero	Sintéticas				Manual	Vibrado
HRF	●●●●	●●	●	●	●●●●	○	○	●●●●
HACRF	●●●●	●●	●	○	●●●●	●●●●	○	○
Grado de influencia: ○ - muy bajo; ● bajo; ●● medio; ●●● alto; ●●●● muy alto								

EXPERIENCIAS

Detalles metodológicos

Se llenaron elementos delgados para analizar la influencia del tipo de fibra, el efecto del flujo y la geometría de los moldes con diferentes HACRF losas de 0,90 x 1,80 x 0,05 m y paneles de 0,58 x 2,00 x 0,08 m. Se estudiaron las siguientes mezclas:

- A35: incorpora 35 kg/m³ de fibras de acero tipo hooked end, de 35 mm de longitud y 0,45 mm de diámetro.
- S3 y S3,5: que incluyen 3 kg/m³ o 3,5 kg/m³ de macrofibras sintéticas de 50 mm de longitud y relación de aspecto 83.
- V5 y V10: que incorporan 5 kg/m³ o 10 kg/m³ de macrofibras de vidrio de 36 mm de longitud y relación de aspecto 67, la losa se moldeó con una dosis igual a 10 kg/m³ mientras que se moldeó un panel con 5 kg/m³ y otro con 10 kg/m³.

Tanto de los paneles como de las losas se aserraron pequeños prismas de aproximadamente 0,3 m de largo en direcciones perpendiculares entre sí sobre los que se evaluaron en primer lugar las propiedades mecánicas en flexión y luego se contaron las fibras en la superficie de fractura para calcular la densidad y analizar la orientación y distribución a lo largo de cada elemento. La Figura 1 indica en forma esquemática el punto de vertido del HACRF y la ubicación de los testigos y la forma de identificación; en las losas Normal (N) o Paralelo (P) a la dirección del flujo, y en los paneles Horizontal (H) o Vertical (V) .

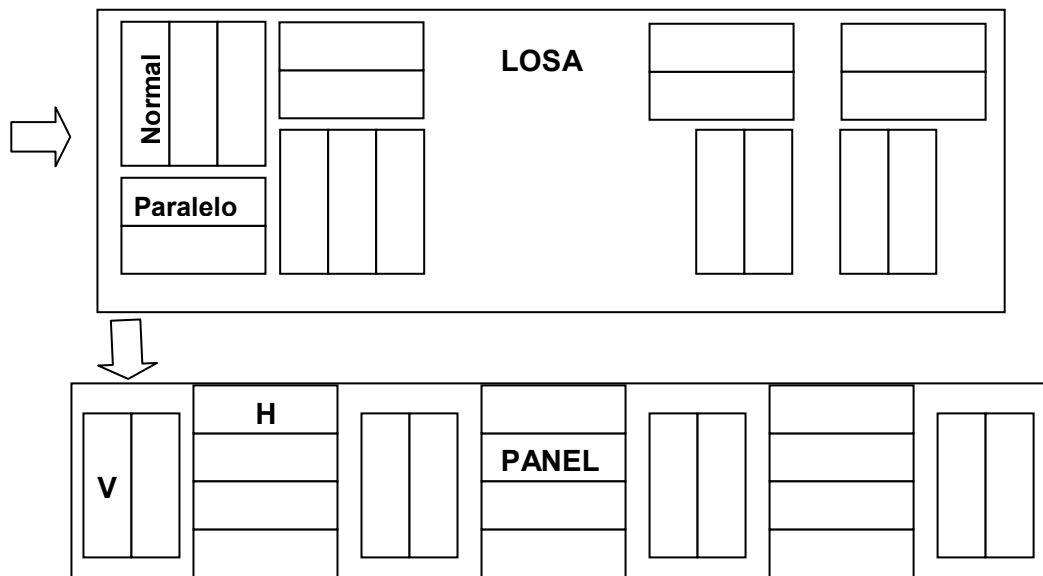


Figura 1. Esquema de aserrado de los paneles y losas

Los ensayos de flexión se realizaron controlando la velocidad de la apertura de fisura (CMOD) siguiendo los lineamientos generales de la norma EN 14651 (21). Se adoptaron una luz de 270 mm y una entalla de 13 mm para mantener constantes las relaciones luz/altura y profundidad de entalla/altura respecto a la norma. De este modo los parámetros residuales resultan similares a los que se obtendrían en vigas estándar de 150 mm de altura, si se calculan a igual rotación; para ello, conforme se explica en (22), se corrigen las deformaciones por el factor 150 mm / h (mm) y luego se calculan los parámetros postpico como indica la norma. En este trabajo se analizan la tensión de primera fisura (f_L), y las resistencias residuales f_{R1} y f_{R3} , correspondientes a aperturas de fisura iguales a 0,5 mm y 2,5 mm.

Efecto de la densidad de fibras sobre las propiedades residuales

La principal motivación por la cual resulta significativo analizar la orientación del refuerzo surge del hecho que las propiedades residuales dependen directamente de la densidad de fibras en las superficies de fractura (23). Mientras en HACRF de acero o sintéticas prácticamente no hay efectos sobre la tensión de primera fisura no es tal el caso de las macrofibras de vidrio donde también pueden existir cambios (24).

En la Figura 2 se muestra la influencia de la densidad de fibras sobre la capacidad residual de los distintos HACRF estudiados, tanto para el caso de paneles como losas. Es posible observar que el aumento en la densidad da lugar a una mejora sustancial en la respuesta postpico en las fibras de vidrio y de acero. Tanto en el panel como en la losa, a igual densidad, las fibras de vidrio mejoran en mayor medida la respuesta para pequeñas aperturas de fisuras ($f_{R1}=0,5$ mm), mientras que para mayores aperturas ($f_{R3}=2,5$ mm) las fibras de acero presentan un mejor comportamiento. Tanto en la losa como en el panel con estas fibras de acero se observa un postpico con endurecimiento para una densidad de fibras mayor a 1 fibra/cm². Es interesante observar en los paneles que el HACRF con menor dosis de fibras de vidrio es el que, para una dada densidad de fibras, presenta un mejor comportamiento residual. El efecto de la densidad sobre las propiedades residuales fue mucho menos significativo en los HACRF sintéticas.

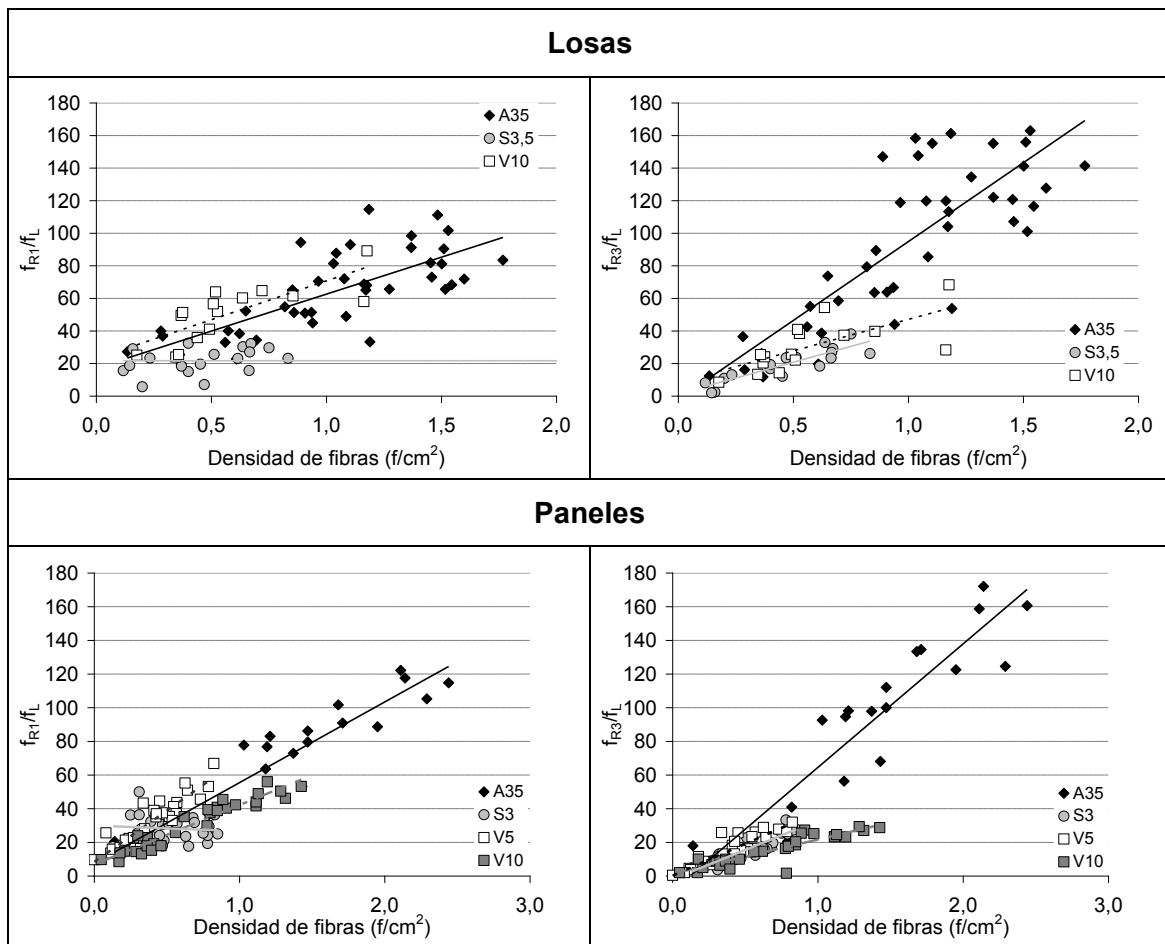


Figura 2. Variación de la relación entre las tensiones residuales (f_{R1} y f_{R3}) y la tensión de primer pico (f_L) en función de la densidad de fibras.

Variación de la densidad de fibras dentro de los elementos estructurales

La Figura 3 muestra la variación de la densidad de fibras a lo largo de los paneles, que corresponde a la densidad media en las vigas verticales (V) y la variación de la densidad con la altura del panel, correspondiente a la densidad medida en cada una de las vigas horizontales (en el gráfico se indica la altura). Es posible observar que en las vigas V existe una mayor densidad de fibras al inicio y final de los paneles, fundamentalmente cuando se utilizan fibras de acero y de vidrio. En las vigas H tanto con fibras de acero como con las diferentes dosis de fibras de vidrio el refuerzo en planos horizontales se orienta entre un 30 y un 50 % más a la entrada del panel que al final. Con macrofibras sintéticas la densidad en el plano horizontal (H) parece ser constante a lo largo del panel, y además no existe prácticamente diferencia en la densidad de fibras entre las vigas H y las V (en promedio $0,58 \text{ f/cm}^2$ y $0,46 \text{ f/cm}^2$, respectivamente); lo que indicaría que el efecto pared no tendría tanta incidencia en la orientación de estas fibras. Con los tres tipos de fibras usados se encontró mayor densidad de fibras en dirección horizontal cercana al piso de los paneles.

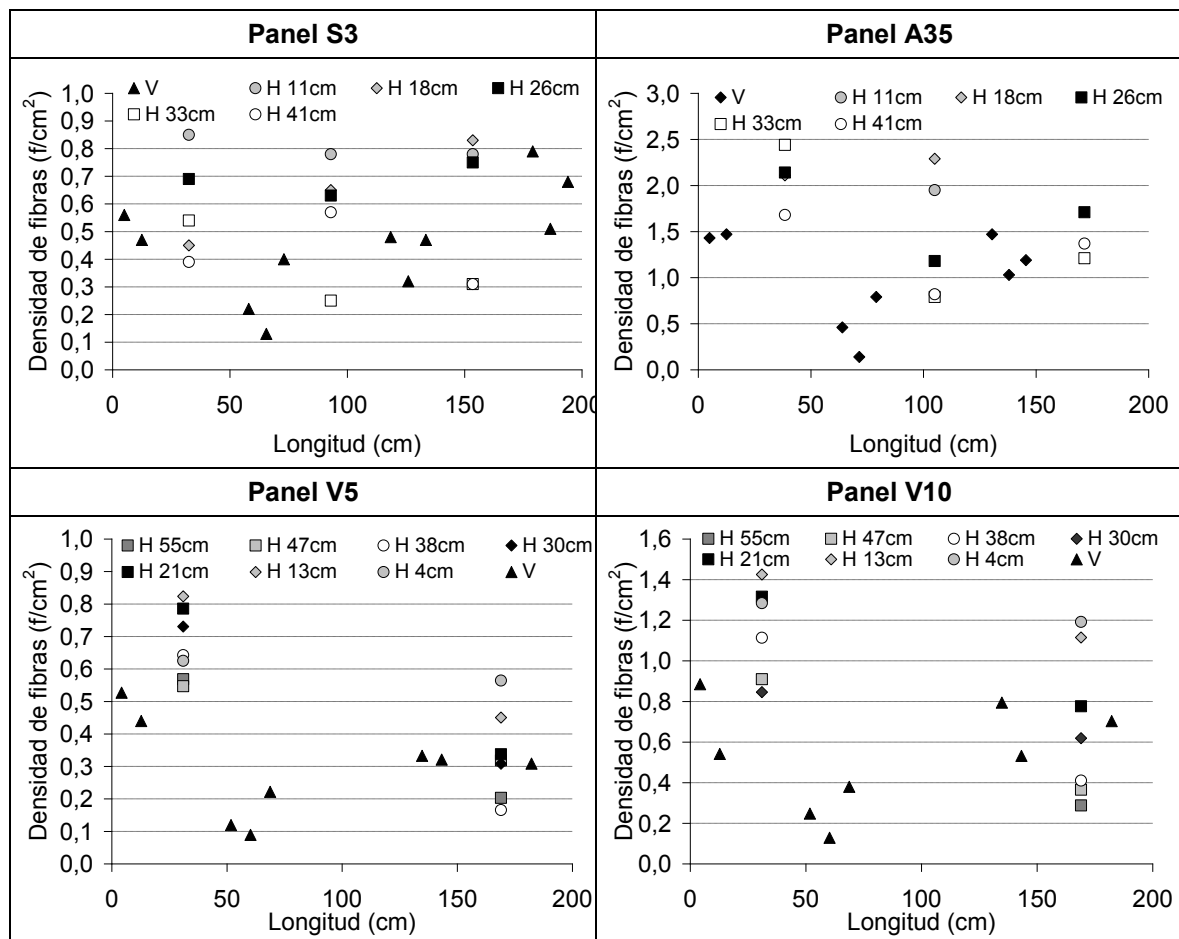


Figura 3. Distribución de fibras en los paneles.

En la Fig. 4 se muestra la distribución de fibras a lo largo de las losas. En dirección normal al llenado la densidad aumenta hacia el extremo final de la losa para los tres tipos de fibras estudiadas debido el efecto pared del final del molde, pero en la proximidad del punto de vertido sólo las fibras de acero presentan una mayor densidad; al ser más rígidas estas fibras el efecto pared resultaría mayor. En dirección paralela al llenado existe mayor densidad de fibras en los prismas de la parte central de las losas lo que se atribuye al efecto del flujo.

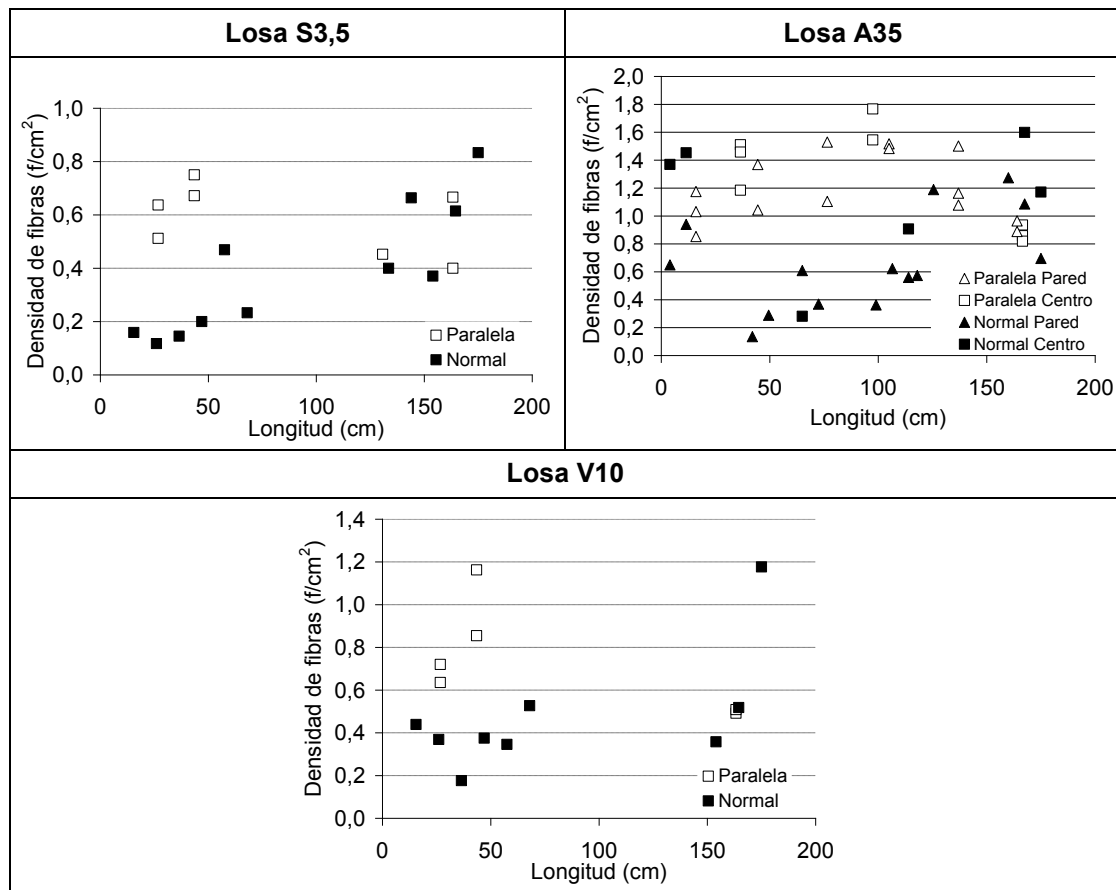


Figura 4. Distribución de fibras a lo largo de las losas.

Comparando la distribución de fibras entre losas y paneles, se aprecia que al final de dichos elementos, las densidades de fibras son similares para ambas direcciones. La densidad a la entrada de los paneles es mayor que al inicio de las losas lo que se atribuye a la forma de llenado. Al incorporar fibras de acero la cantidad de refuerzo fue mayor en dirección horizontal en la zona cercana al fondo del panel que en el extremo final de las losas. El efecto pared fue mayor con fibras de acero; en los paneles el efecto pared tiene más preponderancia en la orientación de las fibras que el flujo del hormigón.

CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron los factores que afectan a la distribución y orientación de las fibras en elementos delgados elaborados con HACRF como tabiques y losas. Es posible concluir que el flujo del hormigón y el efecto pared poseen gran incidencia sobre la distribución de las fibras, tanto para fibras de acero, macrofibras de vidrio y macrofibras sintéticas; el efecto pared se acentúa en el caso de las fibras de acero. La influencia de la densidad de fibras en el comportamiento residual de los HACRF fue mayor con fibras de acero y con las macrofibras de vidrio que con las fibras sintéticas estudiadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación de los proyectos “Hormigones reforzados con fibras y sus aportes al desarrollo sustentable” 11/I188 Secyt UNLP 2014-2017 y “Avances en Hormigones reforzados con fibras” CONICET PIP 2015-2017 GI.

REFERENCIAS

- (1) Edgington J, Hannant DJ., "Steel fibre reinforced concrete. The effect on fibre orientation of compaction by vibration", *Materials and Structures* 5, 25, (1972), p. 41-44,
- (2) Kooiman AG, "Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design", Ph.D. Thesis, Dept. of Structural and Building Eng., Delft Univ of Technology, (2000), p.184.
- (3) Gettu R, Gardner DR, Saldivar H, Barragán BE., "Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens", *Materials and Structures* 38, (2005), p.31-37.
- (4) Ozyurt N, Mason TO, Shah SP., "Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs", *Cem and Concr Comp*, 29, (2007), p.70-79.
- (5) Toutanji, H. y Bayasi, Z., "Effects of manufacturing techniques on the flexural behavior of steel fiber-reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, 28, 1, (1998), p. 115-124.
- (6) Swamy, R.N. y Stavrides, H., "Influence of the method of fabrication on strength properties of steel fibre concrete", *Materials and Structures* 9, 52, (1976), p. 243-253.
- (7) Torrijos, MC., "Mesoestructura, comportamiento mecánico y propiedades de transporte en hormigón", Tesis de doctorado, UNLP, La Plata, 2008, p.240.
- (8) Ferrara, L. y Meda, A. "Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof Elements", *Materials and Structures* 39, (2006), p. 411-420.
- (9) Grünewald S, "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete", Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, (2004), p.233.
- (10) Vandewalle L, Heirman G, Rickstal FV., "Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete", *Proc. 7th Int. RILEM Symp on FRC. India: Chennai (2008)*, p. 719-728
- (11) Tanikella, P. y Gettu, R., "On the distribution of fibres in self compacting concrete", *Proc of 7th Int. RILEM Symp on Fibre Reinforced Concrete. India Chennai (2008)*, p.1147-1153.
- (12) Yardimci, M. Y., Baradan, B. and Tasdemir, M. A., "Studies on the relation between fiber orientation and flexural performance of SFRSCC", *Proceedings of 7th Int. RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete. India, Chennai, (2008)*, p.711-718,
- (13) Stähli P, van Mier JGM., "Manufacturing, fibre anisotropy and fracture of hybrid fibre concrete", *Engng Fract Mech*, 74, (2007), p. 223-242
- (14) Stähli, P, Custer, R., van Mier, JGM, "On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC", *Materials and Structures* 41, (2008), p.189-196.
- (15) Torrijos, M.C., Barragán, B. y Zerbino, R. "Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes", *Construction and Building Materials*, 24, (2010), p.1078-1085.
- (16) Sanal, I y Ozyurt Zihnioğlu, N., "To what extent does the fiber orientation affect mechanical performance?", *Construction and Building Materials*, 44, (2013), p.671-681.
- (17) Ferrara, L., Ozyurt, N., di Prisco, M., "High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of "casting-flow induced" fibre orientation", *Materials and Structures* 44, (2011), p. 109-128.
- (18) Zerbino, R., Tobes, J.M., Bossio, M.E., Giaccio, G., "On the orientation of fibres in structural members fabricated with self compacting fibre reinforced concrete", *Cement & Concrete Composites*, 34, (2012) p.191-200
- (19) Pujadas, P., Blanco, A., Cavalero, S., de la Fuente, A., Aguado, A., "Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels", *Construction and Building Materials* 64, (2014), p.496-503.
- (20) Lameiras, R., Barros, J.A.O., Azenha, M., "Influence of casting condition on the anisotropy of the fracture properties of Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC)", *Cement & Concrete Composites* 59, (2015), p. 60-76.
- (21) EN 14651 (2005): Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), 18p.
- (22) Giaccio, G., Tobes, J. M. y Zerbino, R., "Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete", *Cement Concrete Comp*, 30, 4, (2008), p. 297-306.
- (23) Luccioni, B., Ruano, G., Isla, F., Zerbino, R., Giaccio, G., "A simple approach to model SFRC", *Construction and Building Materials*, 37, (2012), p.111-124.
- (24) Torrijos, M.C., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Hormigones Reforzados con Macrofibras de Vidrio: Distribución y Orientación de las fibras en Hormigón Autocompactante", *Proc VI Cong Int, 20^a Reunión Técnica AATH, Concordia, Argentina, (2014)*.