

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Estudio comparativo de la orientación del refuerzo en losas de hormigón autocompactante reforzado con fibras poliméricas y de acero

A. Conforti ⁽¹⁾, G. Plizzari ⁽¹⁾ y R. Zerbino ⁽²⁾

⁽¹⁾ Department of Civil, Environmental, Architectural Engineering and Mathematics, University of Brescia, Via Branze 43, Italia.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, UNLP - LEMIT, La Plata, Argentina.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5496>

RESUMEN

Entre los factores que afectan la orientación de las fibras en el hormigón autocompactante se destacan el efecto pared y la velocidad de flujo. Como consecuencia, se puede producir una respuesta anisotrópica en los elementos estructurales que depende de la forma de vertido y de la geometría de los mismos. Este trabajo analiza la orientación de las fibras y sus efectos sobre las propiedades mecánicas en losas rectangulares de 1800 mm de largo, 925 mm de ancho y 100 mm de altura moldeadas con hormigones autocompactantes reforzados con diferentes fibras de acero y macrofibras poliméricas, todos elaborados a partir de un mismo hormigón de base. De cada losa se aserraron 18 prismas de 550 mm de largo en direcciones normal y perpendicular a la dirección de vertido; luego se ensayaron a flexión siguiendo la norma EN 14651 y finalmente se realizó un conteo de la densidad de fibras en las superficies de fractura. Como referencia también se realizaron ensayos similares sobre probetas prismáticas de 150 x 100 x 600 mm y ensayos de compresión sobre cubos. Los resultados muestran el efecto del tipo de fibra y el grado de variabilidad que puede ocurrir en este tipo de elementos estructurales.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante reforzado con fibras; fibras de acero; macrofibras sintéticas; orientación.

1.- INTRODUCCIÓN

En la actualidad se reconoce que la orientación de las fibras es una variable que no puede desconocerse cuando se utilizan Hormigones Reforzados con Fibras (HRF) ya que modifica las propiedades residuales. El *fib* Model Code 2010 propone para el diseño estructural de elementos de HRF el uso de un factor que considere esta variable [1]. Muchos trabajos han estudiado este tema demostrando que si bien las fibras se orientan en planos horizontales al igual que ocurre en HRF vibrado convencional, la velocidad de flujo y el efecto pared pueden dar lugar a grandes cambios en la orientación del refuerzo cuando se emplean hormigones autocompactantes [2-4]. Esto ocurre en especial cuando se fabrican elementos

delgados [5]. Se ha encontrado que el punto de vertido puede afectar las propiedades residuales [6-8] y se observaron diferencias entre fibras de acero y macrofibras sintéticas, que pueden justificarse por cambios en la geometría y rigidez de las fibras [9-10].

Este trabajo analiza la orientación de las fibras y sus efectos sobre las propiedades mecánicas en losas rectangulares de 100 mm de altura moldeadas con hormigones autocompactantes que incorporan diferentes fibras de acero y macrofibras poliméricas.

2.- EXPERIENCIAS

2.1.- Materiales y mezclas

Se elaboraron cuatro hormigones incorporando diferentes fibras a un mismo hormigón de base y en un mismo contenido (0,5 % en volumen): dos fibras de acero con ganchos en los extremos (a1 y a2) y dos macrofibras sintéticas (p1 de superficie conformada, y p2 ondulada). La Tabla 1 indica las características de las fibras y la Tabla 2 las proporciones de los materiales componentes y los resultados del ensayo de escurrimiento, diámetro (D_f) y tiempo de flujo (t_{50}). Los hormigones se identifican según la fibra empleada.

Tabla 1. Fibras empleadas.

Fibras	a1	a2	p1	p2
Material	acero	acero	polipropileno	polipropileno
Largo l [mm]	50	33	54	40
Diámetro Ø [mm]	0,80	0,60	0,81	0,75
Aspecto geométrico l/Ø	63	55	67	53
Resistencia a tracción [MPa]	> 1100	> 1100	> 552	> 450
Módulo elástico [GPa]	210	210	6	3,6
Densidad relativa [g/cm ³]	7,85	7,85	0,91	0,91

Tabla 2. Proporciones y propiedades en estado fresco de los hormigones elaborados.

Hormigón	A1	A2	P1	P2
Fibras	a1	a2	p1	p2
Contenido de fibras [kg/m ³]	40	40	4,6	4,6
Cemento CEM II/A-LL 42.5R [kg/m ³]	400			
Filler calcáreo [kg/m ³]	200			
Arena 0-4 mm [kg/m ³]	860			
Agregado grueso 4-12 mm [kg/m ³]	725			
Relación agua/cemento	0,44			
Superfluidificante (% peso de cemento)	1,1%			
D_f [mm] / t_{50} [s]	720 / 2,9	680 / 3,2	700 / 4,6	740 / 3,0

2.2.- Detalles metodológicos

Con cada hormigón autocompactante se fabricaron una losa de 925 x 1800 x 100 mm para evaluar efectos de orientación de las fibras, junto con tres prismas de 150 x 600 x 100 mm como muestras de referencia (RS) para evaluar la resistencia y capacidad residual en flexión siguiendo la norma EN14651 [11] y cuatro cubos de 150 mm de arista para evaluar la resistencia a compresión. El hormigón fue vertido en el extremo de menor dimensión de las losas (Fig. 1) para provocar el flujo a lo largo de toda su longitud (1800 mm) mientras que los prismas de referencia fueron llenados en la zona central (conforme establece la norma EN14651).

Luego del moldeo las losas y las probetas fueron protegidas para evitar la pérdida de humedad, desmoldadas a las 24 horas y mantenidas durante dos semanas bajo curado húmedo. A partir de entonces permanecieron al aire libre (humedad relativa $70 \pm 10\%$, temperatura 15 ± 10 °C) hasta la edad de tres meses. Entonces se aserraron de cada losa prismas de 100 x 150 x 550 mm en direcciones ortogonal (O) y paralela (P) con respecto a la dirección de flujo (Fig. 1); estos prismas se identifican como O o P y se numeran en forma progresiva. Estos prismas fueron entallados y ensayados a flexión siguiendo el mismo procedimiento que las probetas de referencia y luego del ensayo se realizó el recuento del número de fibras en ambas mitades a fin de determinar la densidad de fibras. En forma simultánea a los ensayos de flexión se ensayaron los cubos a compresión.

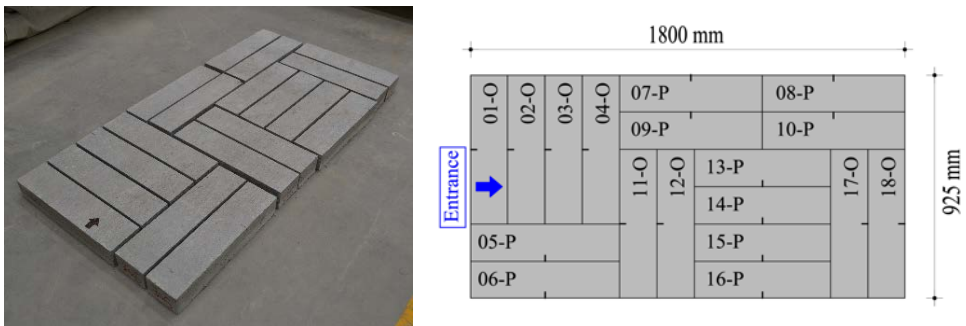


Figura 1. Vista e identificación de los prismas aserrados de las losas.

3.- RESULTADOS

3.1.- Propiedades mecánicas

La Tabla 3 presenta los valores promedio de las propiedades mecánicas determinadas sobre probetas, la resistencia a compresión sobre los cubos (f_c), y la resistencia de primera fisura ($f_{L,m,RS}$) y las propiedades residuales $f_{R,1m,RS}$ y $f_{R,3m,RS}$ obtenidas a partir de las curvas tensión vs. apertura de la boca de fisura (CMOD) en los ensayos de flexión, y finalmente, la clase resistente del HRF calculadas a partir de los valores medios conforme el *fib* Model Code 2010 [1]. Se observa buena homogeneidad en la resistencia a compresión de las diferentes mezclas que resulta del orden de 67 MPa.

Tabla 3. Propiedades mecánicas de las mezclas sobre cubos y prismas de referencia (RS).

Mezcla	f_c [MPa]	$f_{L,m,RS}$ [MPa]	$f_{R,1m,RS}$ [MPa]	$f_{R,3m,RS}$ [MPa]	Clase de HRF
A1	67.8 (0.06)	5.55 (0.04)	6.25 (0.19)	6.03 (0.20)	6c
A2	68.5 (0.04)	6.07 (0.01)	4.95 (0.15)	4.13 (0.15)	4b
P1	65.8 (0.03)	5.46 (0.07)	1.91 (0.14)	2.87 (0.23)	1.5e
P2	66.1 (0.03)	5.25 (0.03)	1.36 (0.08)	2.04 (0.08)	1e

Como era previsible, ya que todas las mezclas fueron elaboradas a partir del mismo hormigón de base, no hay grandes diferencias en la resistencia de primera fisura (límite de proporcionalidad) que resulta en promedio 5.6 MPa. Conforme el tipo de fibra existen diferencias en la clase de HRF establecida a partir de las resistencias residuales determinadas en los ensayos de flexión; se aprecia que los CV crecen el caso de las tensiones residuales como es habitual en HRF.

La Fig. 2 muestra las curvas tensión vs. CMOD obtenidas a partir de los ensayos de flexión de los prismas aserrados de cada una de las losas, se indican a la derecha la respuesta de los prismas aserrados en dirección paralela al llenado (P) y a la izquierda las curvas correspondientes a aquellos aserrados en dirección ortogonal (O), asimismo y como referencia se representan en todos los casos las curvas promedio obtenidas en los ensayos realizados sobre los prismas de referencia (RS). Si se analizan los hormigones A1 y A2 se aprecian claras diferencias en la capacidad residual entre las probetas aserradas en direcciones paralela y normal a la dirección de flujo, siendo claramente superior en el caso de las primeras lo que pone en evidencia una mayor orientación de las fibras. Mayores diferencias se manifiestan cuando se incorporaron las fibras al, de mayor longitud. Lo propio ocurre en el caso de los hormigones P1 y P2 aunque en menor medida. Al comparar con la respuesta que resulta del ensayo de los prismas que habitualmente se emplean para caracterizar al hormigón con fibras (RS) surge como regla general que las propiedades residuales son en promedio similares o ligeramente mayores en el caso de las probetas aserradas en dirección del flujo pero resultan marcadamente menores en la dirección ortogonal a la de flujo.

Para cuantificar estos efectos en la Tabla 4 se comparan los valores promedio de la tensión residual $f_{R,3}$ de todas las probetas de cada losa en una dada dirección. Se observa que las mayores dispersiones corresponden a los prismas aserrados en dirección ortogonal y que en dicha dirección las tensiones residuales pueden disminuir casi al 50 % de las obtenidas en ensayos normalizados.

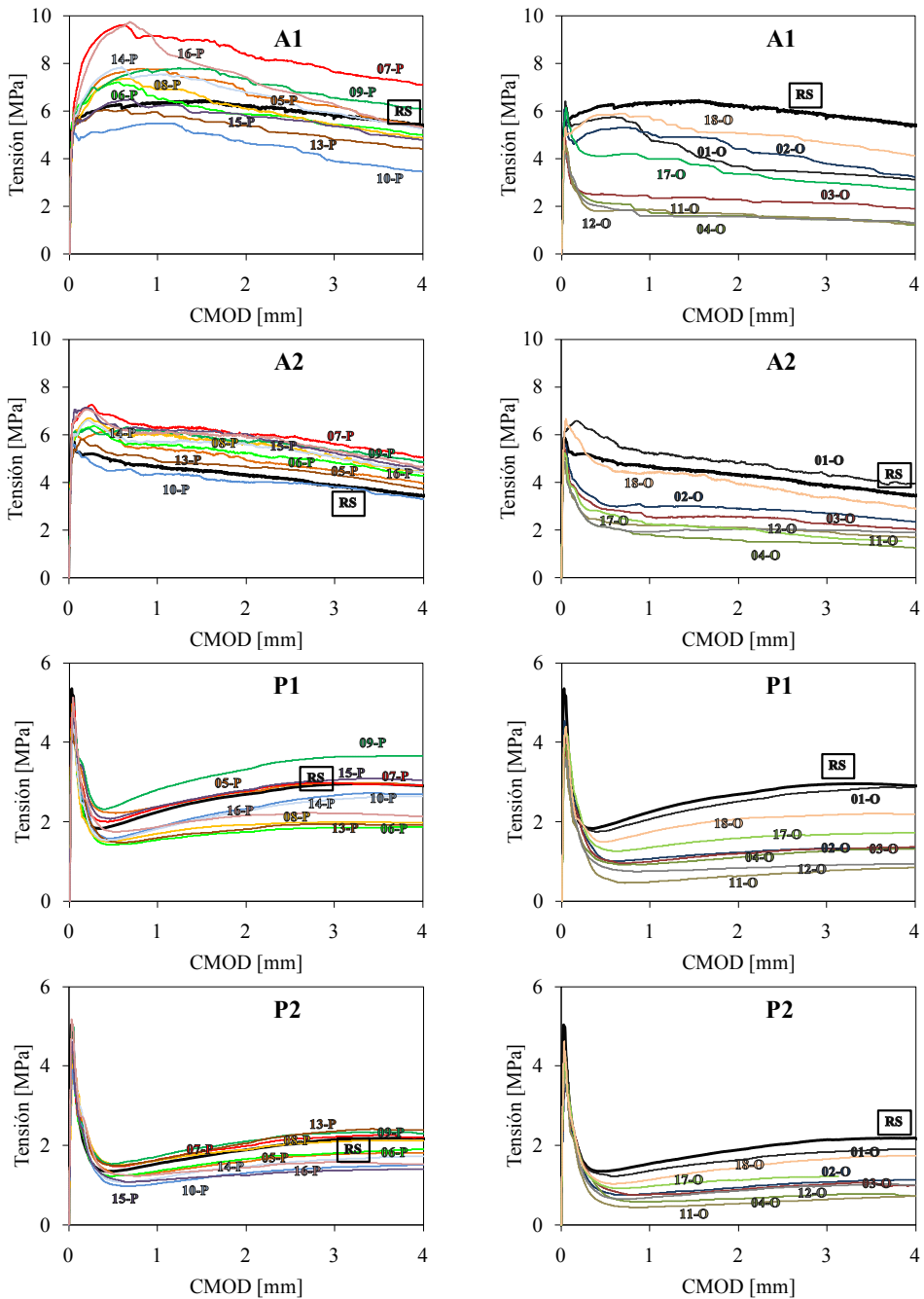


Figura 2. Curvas tensión vs. CMOD sobre prismas aserrados en dirección paralela (izquierda) y ortogonal (derecha) con respecto a la dirección de flujo.

Tabla 4. Comparación entre los valores promedio de la resistencia residual $f_{R,3}$ de las muestras aserradas de las losas y los valores obtenidos en ensayos normalizados (RS).

Prismas	$f_{R,3}$ [MPa]			
	A1	A2	P1	P2
R	6,03 (0,20)	4,13 (0,15)	2,87 (0,23)	2,04 (0,08)
O	2,81 (0,47)	2,76 (0,36)	1,48 (0,44)	1,11 (0,36)
P	6,08 (0,16)	4,94 (0,16)	2,54 (0,22)	1,81 (0,19)
Promedio (O, P)	4,62 (0,43)	3,97 (0,35)	2,07 (0,40)	1,50 (0,34)
Valores relativos				
O / RS	0,47	0,67	0,52	0,54
P / RS	1,01	1,19	0,88	0,89
Promedio / RS	0,76	0,96	0,72	0,74

Como fuera expuesto los cambios en las propiedades residuales se atribuyen directamente a las diferencias en la cantidad de fibras en el plano de fractura. La Fig. 3 muestra la variación de la tensión residual $f_{R,3}$ con la densidad de fibras determinada mediante el recuento de los filamentos en ambas caras de las superficies de fractura al finalizar los ensayos de flexión. Además de la clara tendencia observada, se destaca la variabilidad en densidad de fibras que existe entre los prismas a pesar de que fueron obtenidos de un mismo elemento estructural, los valores que pueden cambiar en un factor igual a 3 o mayor, por ejemplo en A1 la densidad de fibras varía entre 0,3 y 1 fibra/cm². La tendencia también se verifica en magnitudes similares en los hormigones que incorporan fibras poliméricas.

En base a los resultados obtenidos, en la Fig. 4 se representan los cambios en la resistencia residual a lo largo de la losa en ambas direcciones; se aprecia una tendencia bastante uniforme, siendo claramente mayor la capacidad portante en la dirección del flujo; la variabilidad parece ser mayor en el caso de los hormigones con macrofibras sintéticas.

Finalmente, la Fig. 5 se comparan los valores relativos de las resistencias residuales f_{R1} y f_{R3} que se alcanzan a lo largo de cada una de las losas en relación a los obtenidos a partir de las probetas de referencia (RS). Para cada hormigón se indican los valores máximos, promedio y mínimos que registran los prismas aserrados; obviamente los menores corresponden a las muestras orientadas en dirección normal al flujo. Se aprecia la alta variabilidad en la capacidad residual, ligeramente mayor en el caso de los hormigones con fibras de acero, que los valores promedio están cercanos a la unidad en A1 y A2, mientras que en P1 y P2 próximos a 0,8, y que los valores mínimos pueden ser inferiores al 40 % de la capacidad residual medida en los prismas de referencia.

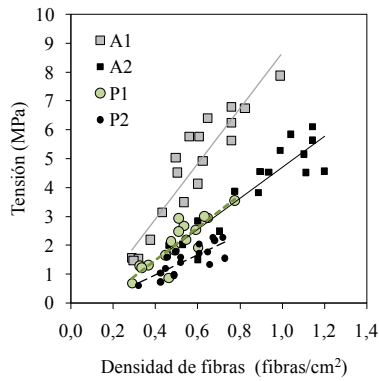


Figura 3. Variación de la tensión residual $f_{R,3}$ con la densidad de fibras en las superficies de rotura.

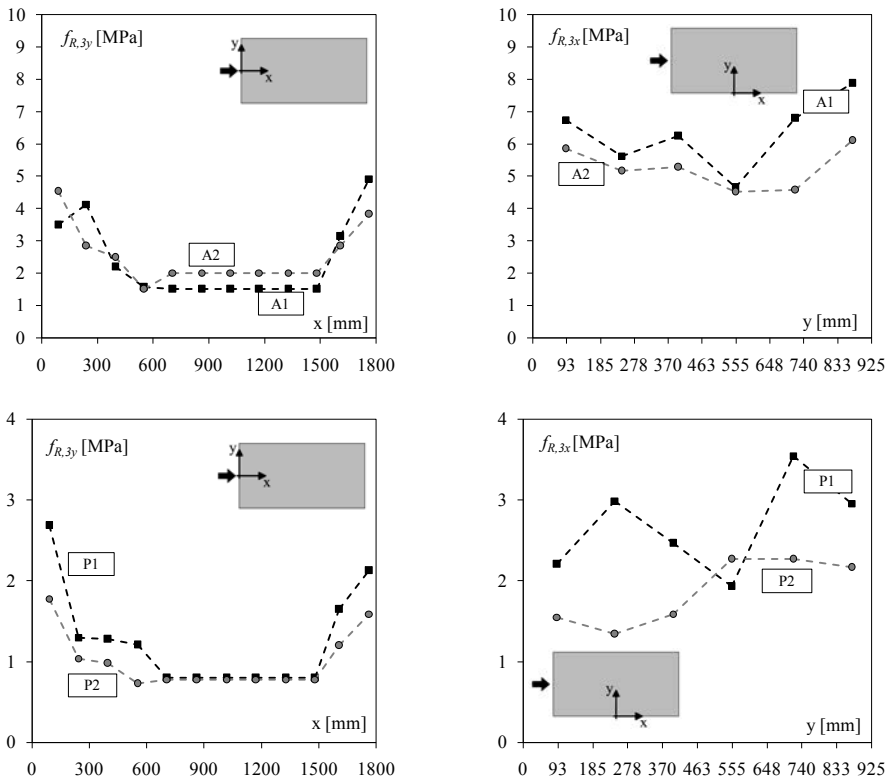


Figura 4. Variación de la resistencia residual a flexotracción $f_{R,3}$ a lo largo de la losa en la dirección del flujo (izquierda) y en dirección ortogonal (derecha).

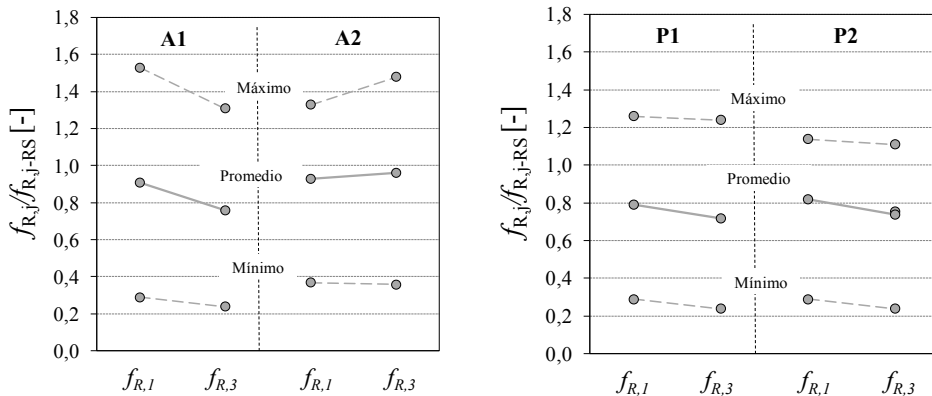


Figura 5. Comparación entre la capacidad residual medida en los testigos extraídos de las losas y la obtenida a partir de los prismas de referencia.

4.- CONCLUSIONES

Se estudió la orientación de las fibras en losas de 100 mm de espesor fabricadas con hormigones autocompactantes obtenidos a partir de un mismo hormigón de base al que se le incorporaron diferentes fibras, dos fibras de acero y dos macrofibras sintéticas. A lo largo de las losas se aserraron prismas en direcciones paralela y normal a la dirección de flujo. Como conclusiones surge que:

- Se verifica que la orientación de las fibras se modifica por efecto pared y por efecto del flujo y como consecuencia puede existir una gran variabilidad en la capacidad residual entre diferentes sectores y direcciones.
- Dichas diferencias resultaron ligeramente mayores al incorporar fibras de acero lo que se atribuye a que su mayor rigidez favorece la orientación.
- Los valores promedio de resistencia residual de los prismas aserrados resultaron algo menores que los obtenidos a partir de las probetas de referencia fabricadas en forma estándar, en el orden del 80% al 90%, en especial en el caso de las fibras poliméricas.
- Si bien en algunos casos la resistencia residual crece en comparación a la medida sobre prismas de referencia, en especial en dirección paralela al flujo, la capacidad residual en direcciones o sectores desfavorables puede reducirse en más del 50 %; este hecho no puede ser ignorado si las condiciones de llenado presuponen efectos de orientación.

Cabe destacar que planificando en forma adecuada la forma de llenado es posible regular la magnitud de los efectos de flujo y pared sobre la orientación de las fibras, que se dan especialmente en elementos delgados, por lo cual las diferencias en la capacidad residual pueden ser minimizadas o potenciadas en función de la aplicación a la cual estén destinados los elementos estructurales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a NICEM s.r.l (Casazza, Italia) por el suministro del filler, a BASF Construction Chemicals Italy (Treviso, Italia) y a Matassina s.r.l. (Vicenza, Italia) por el suministro de las macrofibras sintéticas y de las fibras de acero respetivamente. Asimismo se agradece al Ing. Michele Vesentini y a los técnicos Luca Martinelli, Augusto Botturi, Domenico Caravaggi y Andrea Delbarba por su colaboración durante el desarrollo del programa experimental, y la ayuda de la Universidad de Brescia a través del programa de profesores visitantes año 2016.

REFERENCIAS

- [1] Fédération Internationale du Béton. 'Fib Model Code for Concrete Structures 2010' (2012).
- [2] Grünewald, S. 'Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete', Ph.D. Thesis (Delft University of Technology, 2004).
- [3] Ferrara, L., Meda, A. 'Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements'. *Materials and Structures* **39** (2006) 411-420.
- [4] Stähli, P., Custer, R., van Mier, J.G.M. 'On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC'. *Materials and Structures* **41** (2008) 189-196.
- [5] Zerbino, R., Tobes, J.M., Bossio, M.E., Giaccio, G. 'On the orientation of fibres in structural members fabricated with selfcompacting fibre reinforced concrete'. *Cement and Concrete Composites* **34** (2012) 191–200.
- [6] Abrishambaf, A., Barros, J., Cunha, V.M.C.F. 'Relation between fibre distribution and post-cracking behaviour in steel fibre reinforced self-compacting concrete panels'. *Cement and Concrete Research* **51** (2013) 57–66.
- [7] 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 and Concrete Composites* **59** (2015) 60–76.
- [8] 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) 109-128.
- [9] Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., de la Fuente, A., Aguado, A. 'Fibre distribution in macro-plastic fibre reinforced concrete slab-panels'. *Construction and Building Materials* **64** (2014) 496–503.

- [10] Torrijos, M.C., Barragán, B., Zerbino, R. 'Placing conditions, mesostructural characteristics and post-cracking response of fibre reinforced self-compacting concretes'. *Construction and Building Materials* **24** (2010) 1078–1085.
- [11] EN 14651 'Precast concrete products - test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength' (European Standards 2005).