

Influencia del método de hormigonado en la distribución de macro-fibras metálicas en el hormigón vibrado

Influence of pouring method on the distribution of metallic macrofibres into vibrated concrete

Laura González ^{a,b}, José Sainz-Aja ^b, Carlos Thomas ^b, Albert de la Fuente ^{c,d}, Jokin Rico^a

^a INGENCID S.L. (Ingeniería de la Construcción, Investigación y Desarrollo de Proyectos), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av./Los Castros 44, 39005, Santander, España

^b LADICIM (Laboratorio de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, Santander, 39005, España

^c Departamento de Ingeniería Civil y Medioambiental, Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona Tech, Jordi Girona 1-3, C1, E-08034 Barcelona, España

^d Smart Engineering, Jordi Girona 1-3 K2M 202c, Barcelona, España

RESUMEN

El uso del hormigón reforzado con fibras (FRC) en aplicaciones estructurales está creciendo significativamente debido a (1) la aceptación de este compuesto en las directrices de diseño y (2) el aumento en términos de rendimiento de sostenibilidad que se ha reportado para aquellos casos en los que se ha implementado el FRC. En este contexto, la orientación y la distribución de las fibras son factores que rigen la respuesta post-fisuración del FRC. Aún quedan aspectos técnicos por responder en el marco de la investigación antes de poder abarcar con la suficiente fiabilidad la influencia de estas variables en la respuesta mecánica de los FRC. En este sentido, esta investigación pretende ampliar el conocimiento sobre la influencia de la geometría del molde y de los procedimientos de vertido del hormigón sobre las variables de orientación y distribución de las fibras, así como sobre el comportamiento post-fisuración del FRC. Para ello, se ha llevado a cabo un amplio programa experimental orientado a la caracterización de estas variables mediante novedosas técnicas de ensayo (enfoque inductivo no destructivo para cuantificar la cantidad y orientación de las fibras, y ensayo BCN para evaluar la respuesta pre y post-fisuración del FRC). Los resultados y las conclusiones derivadas de este programa experimental pueden extenderse a los FRC y a las condiciones de contorno similares a las establecidas aquí.

ABSTRACT

The use of fibre-reinforced concrete (FRC) in structural applications is growing significantly due to (1) the acceptance of this composite in design guidelines and (2) the increase in terms of sustainability performance that has been reported for those cases where FRC has been implemented. In this context, fibre orientation and distribution are factors governing the post-cracking response of FRC. There are still technical aspects to be answered in the framework of the research before the influence of these variables on the mechanical response of FRCs can be covered with sufficient reliability. In this sense, this research aims to extend the knowledge on the influence of mould geometry and concrete pouring procedures on

the fibre orientation and distribution variables, as well as on the post-cracking behaviour of FRC. To this end, an extensive experimental programme has been carried out to characterise these variables by means of novel testing techniques (non-destructive inductive approach to quantify the quantity and orientation of the fibres, and BCN test to evaluate the pre- and post-cracking response of the FRC). The results and conclusions derived from this experimental programme can be extended to FRCs and boundary conditions similar to those established here.

PALABRAS CLAVE: FRC, orientación, distribución, método inductivo.

KEYWORDS: FRC, orientation, distribution, inductive method.

1. Introducción

El hormigón reforzado con fibras (FRC) está adquiriendo cada vez más importancia a medida que avanza la investigación, y su uso en componentes estructurales está siendo aceptado en las directrices y recomendaciones de diseño nacionales e internacionales [1]. Las fibras de acero se utilizan, por ejemplo, como refuerzo en suelos, que es uno de los campos de aplicación más comunes. También pueden utilizarse en elementos estructurales en combinación con el refuerzo convencional [2].

La adición de fibras permite mejorar varias propiedades mecánicas (principalmente, la resistencia a la tracción después de la fisuración y el nivel de confinamiento en compresión) y no mecánicas (es decir, reducir el desconchamiento debido a las cargas de fuego) del hormigón en función del tipo y la cantidad de fibras utilizadas [1,3]. La propiedad más significativa del FRC, por sus implicaciones estructurales y de diseño, es la capacidad de desarrollar una capacidad de flexión/tracción posterior a la fisuración [4] que permite controlar tanto la propagación como la apertura de las fisuras [5,6]. Otros estudios informan que la adición de fibras aumenta el módulo de Young, especialmente a una edad temprana [7] y mejora el comportamiento a fatiga [8]. Además de las propiedades mecánicas y geométricas de las fibras, se ha evidenciado que la orientación y distribución de las fibras dentro de la matriz tienen un impacto importante en las propiedades del FRC. En este sentido, la

cantidad de fibras influye en la energía de fractura, que aumenta con el incremento de la dosificación de fibras [3]. Por otra parte, los resultados experimentales permiten afirmar que existe una clara relación entre la orientación de las fibras y las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas de los materiales compuestos [9–11].

El módulo de elasticidad del FRC depende en gran medida de la orientación de las fibras, cuanto más alineadas estén las mismas con la dirección de tracción, menor será el límite elástico [12]. La resistencia a la flexión también depende del ángulo de inclinación de las fibras, de modo que cuanto menor sea el ángulo, mayor será la resistencia a la flexión [13]. La orientación preferente de las fibras que crea planos más débiles favorece una mayor apertura de grietas a niveles de carga más bajos [14]. Además, la orientación de las fibras, en combinación con la geometría de las mismas, tiene un efecto sobre la conductividad térmica [15].

Se ha demostrado que el cambio en la orientación de las fibras y su distribución depende en gran medida de la longitud y la altura del encofrado [12]. Los estudios concluyen que las fibras se alinean como resultado del efecto de la pared del encofrado [16]. La distribución de las fibras también tiene una influencia significativa en la resistencia última a la flexión del hormigón, que aumenta con el incremento del número de fibras por unidad de superficie y el coeficiente de dispersión [16]. P. Martinelli et

al. concluyeron que las probetas en contacto con el encofrado tienen una mayor tensión de post-fisuración que las que están más cerca de la superficie, influidas por el contenido de fibras (relacionado con la segregación) y la orientación de las mismas [17].

En cuanto a la influencia de la reología del hormigón fresco en la orientación de las fibras, algunos autores afirman que la fluidez del hormigón fresco es el parámetro que lo rige mayoritariamente [18].

En algunos estudios se han desarrollado ecuaciones para ayudar a predecir la orientación de las fibras en el hormigón, así como métodos basados en CFD (Dinámica Computacional de Fluidos) para controlar la orientación y distribución de las fibras [12,16,19,20].

El conocimiento de la variación de la orientación y distribución de las fibras es de gran importancia para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón armado.

En este trabajo se realiza una caracterización completa de la distribución de las fibras en función del método de vertido en probetas de hormigón reforzadas con fibras comerciales de gancho HE++90/60. La caracterización de este hormigón reforzado es una continuación de otros estudios realizados por algunos autores [8,21].

2. Materiales y metodología

Se ha realizado un hormigón reforzado con fibras metálicas tipo *Hooked*, de 60 mm de longitud y 0,90 mm de diámetro, utilizando 4 tamaños de árido calizo. Una grava de 20 mm de tamaño máximo, una gravilla y 2 arenas, así como cemento tipo I, 52,5N con una dosificación de 390 kg/m³ y aditivo superplastificante MasterEase 5025. La relación agua/cemento fue de 0,42.

Las proporciones de la mezcla fueron obtenidas por el método de Fuller y se muestran en la Tabla 1

Tabla 1. Dosificación empleada

Material	Mix [kg/m ³]
0/2	480
0/4	480
4/12	480
10/20	480
Cemento	390
Agua	165
Aditivo	3.9 (1%-peso cemento)
Fibras	35

2.1. Fabricación y curado de las probetas

Los moldes utilizados para la fabricación de las probetas fueron prismáticos de dimensiones 600 x 150 x 150 mm para los ensayos de flexión, mientras que para los ensayos a compresión las probetas fabricadas fueron cúbicas de 150 mm de lado. Estas probetas fueron curadas en cámara de humedad bajo condiciones controladas (20±2°C y 95±5% humedad).

Para evaluar la distribución de las fibras y su influencia en el comportamiento del hormigón según la dirección de vertido, se fabricaron bloques de dimensiones 1200x400x1200mm. Estos bloques se dispusieron de dos maneras diferentes, como se muestra en la Figura 1. En la primera, denominada "BH", el hormigón se vertió en la cara mayor del cubo (1200x1200mm), mientras que la denominada "BV" se hormigonó en una de las caras pequeñas (1200x400 mm).

A partir de estos bloques, se extrajeron testigos cilíndricos para realizar los ensayos inductivo y Barcelona, descritos a continuación.

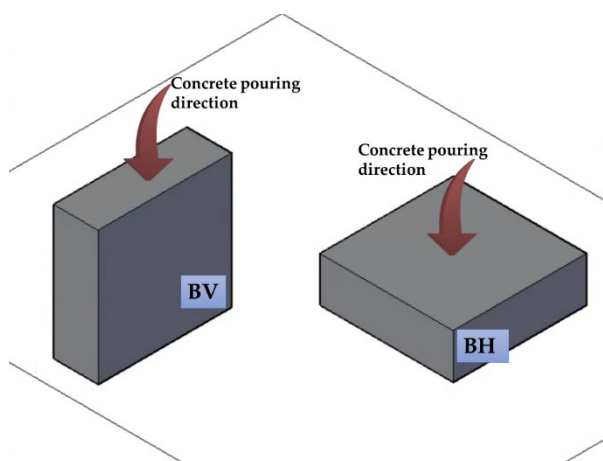


Figura 1. Dirección de hormigonado en cada bloque.

2.2. Propiedades mecánicas convencionales

Para la determinación de la resistencia a compresión se siguió la norma UNE 83507:2004 [22], aplicándose una carga a una velocidad constante, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta fuera de $0,5 \pm 0,2$ MPa/s.

Para la determinación de la resistencia a la tracción por flexión se ha utilizado lo establecido en la norma UNE-EN 14651:2007 [23], calculando la apertura de fisura (CMOD) a partir del desplazamiento vertical medido, siguiendo la norma (ecuación 1).

$$CMOD = \frac{\rho - 0.04}{0.85} \quad \text{Ecuación 1}$$

2.3. Ensayo inductivo

El ensayo inductivo es una aplicación de la ley del magnetismo de Faraday y aprovecha las variaciones de inductancia que producen los elementos metálicos al interactuar con el campo magnético. Para este ensayo, las probetas deben colocarse dentro de un recipiente de plástico con una geometría cilíndrica establecida. Alrededor del recipiente se colocan bobinas de alambre de cobre o aluminio, que constituyen el elemento sensor del sistema, que se muestra en la figura X. Una pequeña corriente eléctrica atraviesa la bobina y produce un campo magnético alrededor del dispositivo, que interactúa con las fibras de acero del interior del hormigón.

Los resultados del ensayo inductivo dependen principalmente del tipo de fibra, el contenido y la orientación.



Figura 2. Analizador y sensor cilíndrico.

2.4. Ensayo Barcelona

El ensayo de Barcelona (BCN) consiste en una prueba de doble punzón sobre una probeta cilíndrica. El ensayo se realiza colocando, concéntricamente por encima y por debajo de la probeta, punzones cilíndricos de acero con una altura de 25 mm y un diámetro igual a $\frac{1}{4}$ de la dimensión menor de la sección transversal de la probeta. La prensa hidráulica aplica una carga a los punzones a una velocidad de desplazamiento constante de $0,5 \pm 0,05$ mm/min. En el proceso, se forma un estado triaxial cónico desde el centro hacia los bordes de la probeta, lo que provoca tensiones internas de tracción que aumentan con la carga. Las grietas aparecen cuando las tensiones alcanzan la resistencia a la tracción de la matriz de hormigón. Después, las fibras tienden un puente sobre la grieta, proporcionando una resistencia residual.

El ensayo BCN se desarrolló originalmente para controlar el TCOd a través de un extensómetro circunferencial, como se describe en la norma UNE 83515. Posteriormente se simuló el ensayo definiendo una correlación entre el TCOd y el desplazamiento vertical para utilizar este último como variable de control.

3. Resultados y análisis

3.1. Propiedades mecánicas

Se han calculado las resistencias residuales a flexotracción para una misma apertura de fisura ($f_{R,3}$, $CMOD=2,5$ mm), obteniendo una resistencia media de 6,27MPa, así como las resistencias a compresión, obteniendo una resistencia media de 50 MPa.

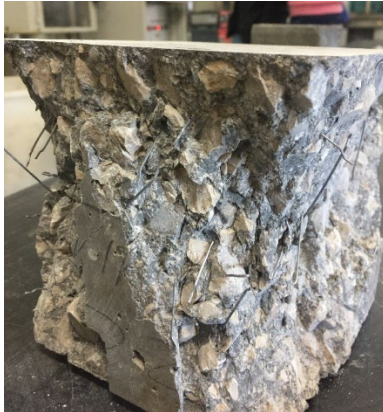


Figura 3. Probeta ensayada a compresión.



Figura 4. Probeta ensayada a flexotracción.

3.2. Ensayo inductivo

En la Figura 5 se muestra la cantidad de fibra en función del método de hormigonado, mientras que en la Tabla 2 se muestran los resultados del T-test y Levene-test, que permiten comparar ambas distribuciones.

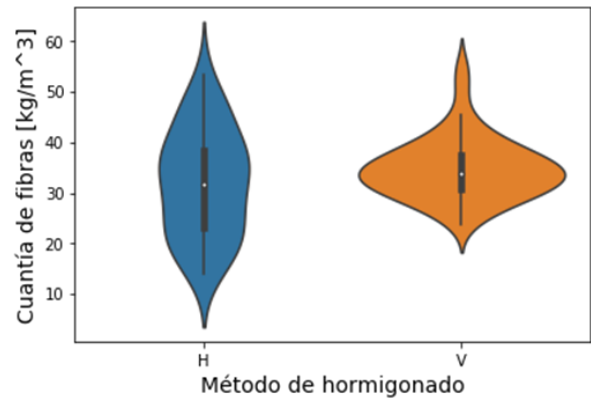


Figura 5. Distribución de la cantidad de fibras en función del método de hormigonado.

Tabla 2. Influencia del método de hormigonado.

	BH	BV
Media	31,91	35,01
Desv. estándar	10,56	6,23
P_{value} (T-Test)	1e-1	
P_{value} (Levene-Test)	1,7e-4	

Se concluye que la cantidad de fibra es equivalente en ambos tipos de hormigón, pero, que en el caso del hormigonado vertical los resultados son más estables que en el caso del hormigonado horizontal. Por otra parte, esta diferencia puede estar relacionada con la energía potencial. En el hormigonado vertical hay más energía potencial porque el flujo es más alto.

A continuación, se muestra en la Figura 6 los resultados de la cantidad de fibras obtenidos en función de la altura del BH, diferenciando parte inferior o superior, en función de si se trata de la cara apoyada en la superficie o de la cara sobre la que se hormigona, respectivamente.

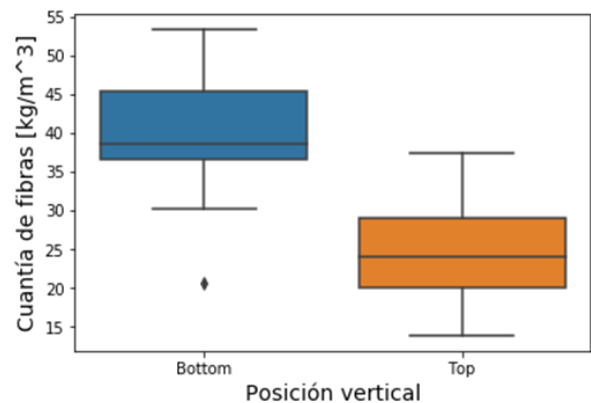


Figura 6. Cantidad de fibras en el BH en función de la altura.

Se ve una clara heterogeneidad en el hormigonado en horizontal, con una mayor cantidad de fibras en la parte inferior, debido a la segregación producida por la gravedad, ya que las fibras se van hacia el fondo. En concreto, se incrementa el doble la densidad de fibras en la parte inferior.

3.3. Ensayo Barcelona

A continuación, se muestra la distribución de la resistencia residual obtenida del BCN en función del método de hormigonado, mostrando los valores antes de fisurarse (Figura 7) y una vez fisurado el hormigón (Figura 8).

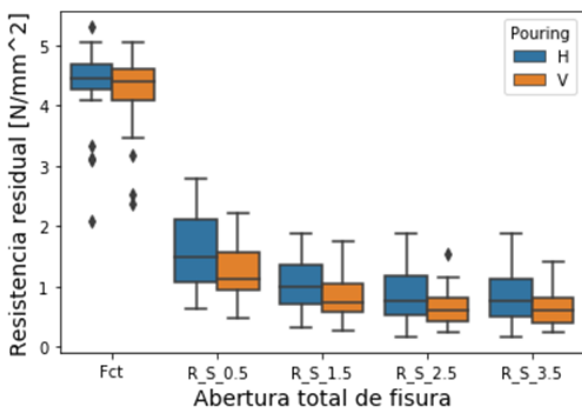


Figura 7. Distribución de la resistencia residual obtenida del BCN, antes de fisurarse, en función del método de hormigonado

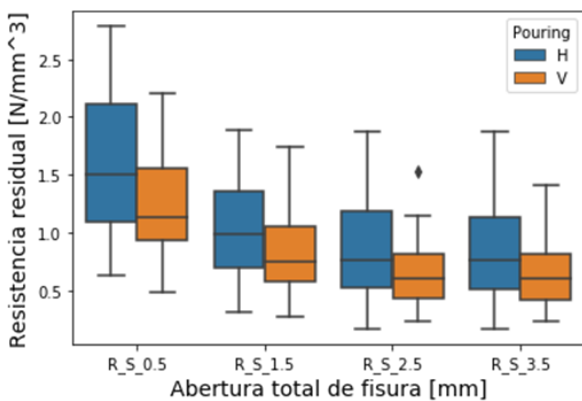


Figura 8. Distribución de la resistencia residual obtenida del BCN, una vez fisurado, en función del método de hormigonado.

En base a los resultados obtenidos, el método de hormigonado no influye en la carga de fisuración, pero sí en las propiedades residuales del hormigón. Esto es debido a la influencia del método de hormigonado en la

orientación de las fibras. En todos los casos, en el caso de hormigonado vertical se obtienen valores menores de Resistencia residual, debido a la que la orientación de las fibras es menos perpendicular a la dirección de la carga.

En la Figura 9 se muestran los resultados de las resistencias residuales obtenidas en función de la altura del bloque.

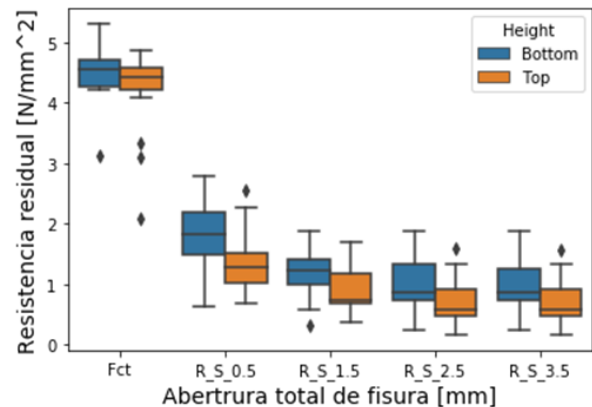
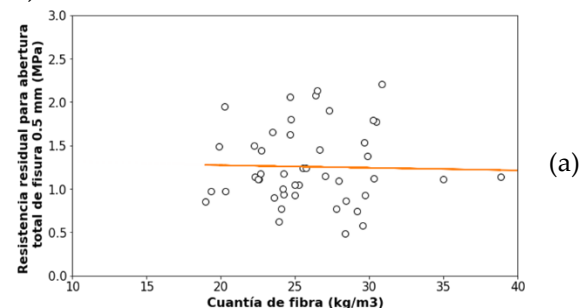


Figura 9. Resistencias residuales obtenidas en función de la altura en el hormigonado horizontal.

En vista de los resultados, se concluye que la posición en altura sí tiene cierta influencia en las propiedades mecánicas del hormigón, lo cual está relacionado con la mayor presencia de fibras en la parte inferior del bloque.

3.4. Relación entre ensayo inductivo y Barcelona

A continuación, se muestra la correlación entre la abertura total de fisura (TCOD) y la cantidad de fibras en el plano XY para BV y BH (Figura 10).



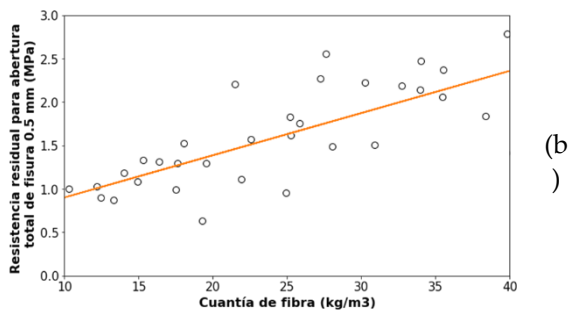


Figura 10. Correlación entre TCOB y la cantidad de fibras en el plano XY para BV (a) y BH (b).

En la figura 10 puede verse cómo en el hormigonado vertical no existe ninguna tendencia, mientras que, en el hormigonado horizontal, aunque con bastante dispersión, se aprecia diferencia en los valores de abertura total de fisura con respecto a la cantidad de fibras.

En la Figura 11 se muestra la relación de la abertura total de fisura respecto al contenido de fibras para el caso del BH.

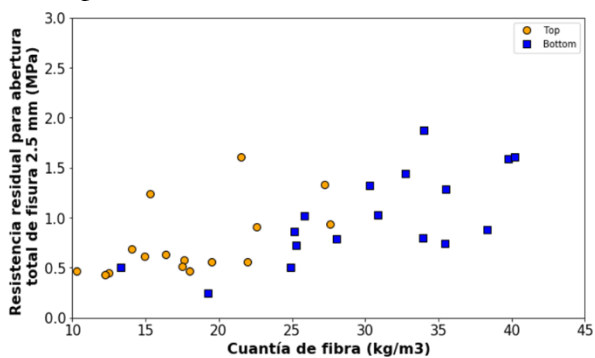


Figura 11. Correlación entre TCOB y la cantidad de fibras en BH.

Los testigos extraídos de la parte inferior del bloque BH tienen mayor contenido de fibras y, por tanto, mayor abertura total de fisura. Esto tiene relación con los resultados de resistencia residual, que eran también mayores en los testigos de la parte inferior, como se mostró en la Figura 9.

4. Conclusiones

Se ha analizado la influencia que tiene el procedimiento y dirección de hormigonado en un bloque, concluyendo lo siguiente:

La distribución de las fibras en el hormigonado BH es significativamente distinta en la parte superior e inferior, incrementándose el doble la densidad de las fibras en esta última.

La altura de hormigonado tiene influencia en la distribución de fibras, que tiene a su vez relación con las propiedades mecánicas del hormigón, por lo que se deduce la relación entre altura de hormigonado y propiedades mecánicas del FRC.

Por otro lado, se concluye que el método de hormigonado influye en la resistencia residual, debido a la orientación de las fibras, pero no existe influencia en la carga de fisuración.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a: LADICIM, el Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad de Cantabria, por poner a disposición de los autores las instalaciones utilizadas en esta investigación, así como a la Universidad Politécnica de Barcelona por la realización de los ensayos. A SODERCAN, ArcelorMittal por facilitar las fibras y a BASF por facilitar el aditivo para fabricar el hormigón armado. Los autores agradecen el apoyo del programa de becas postdoctorales "Augusto González Linares" de la Universidad de Cantabria y al programa de "Doctorado industrial" del Gobierno de Cantabria.

Referencias

- [1] N. Tomic, S. Aidarov, A. De la Fuente, Systematic Review on the Creep of Fiber-Reinforced Concrete, Materials (Basel). 13 (2020) 5098. <https://doi.org/10.3390/ma13225098>.
- [2] A.M. Brandt, Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, Compos. Struct. 86 (2008)

- 3–9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.
- [3] M. Pająk, T. Ponikiewski, Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers, *Constr. Build. Mater.* 47 (2013) 397–408.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.072>.
- [4] R.P. Dhakal, Post-peak response analysis of SFRC columns including spalling and buckling, *Struct. Eng. Mech.* 22 (2006) 311–330.
<https://doi.org/10.12989/sem.2006.22.3.311>.
- [5] L.R. Betterman, C. Ouyang, S.P. Shah, Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar, *Adv. Cem. Based Mater.* 2 (1995) 53–61.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1065-7355\(95\)90025-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/1065-7355(95)90025-X).
- [6] K. Holschemacher, T. Müller, Y. Ribakov, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, *Mater. Des.* 31 (2010) 2604–2615.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.025>.
- [7] J. Blyszko, Comparative Analysis of Creep in Standard and Fibre Reinforced Concretes under different Load Conditions, *Procedia Eng.* 193 (2017) 478–485.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.240>.
- [8] J. Sainz-Aja, L. Gonzalez, C. Thomas, J. Rico, J. Polanco, I. Carrascal, J. Setién, Effect of Steel Fibre Reinforcement on Flexural Fatigue Behaviour of Notched Structural Concrete, *Mater. (Basel, Switzerland)*. 14 (2021).
<https://doi.org/10.3390/ma14195854>.
- [9] W.-K. Chin, H.-T. Liu, Y.-D. Lee, Effects of fiber length and orientation distribution on the elastic modulus of short fiber reinforced thermoplastics, *Polym. Compos.* 9 (1988) 27–35.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.750090105>.
- [10] M. Haghgoo, R. Ansari, M.K. Hassanzadeh-Aghdam, Prediction of electrical conductivity of carbon fiber-carbon nanotube-reinforced polymer hybrid composites, *Compos. Part B Eng.* 167 (2019) 728–735.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.046>.
- [11] R. Byron Pipes, R.L. McCullough, D.G. Taggart, Behavior of discontinuous fiber composites: Fiber orientation, *Polym. Compos.* 3 (1982) 34–39.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pc.750030107>.
- [12] Y. Zhao, J. Bi, Z. Wang, L. Huo, J. Guan, Y. Zhao, Y. Sun, Numerical simulation of the casting process of steel fiber reinforced self-compacting concrete: Influence of material and casting parameters on fiber orientation and distribution, *Constr. Build. Mater.* 312 (2021) 125337.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125337>.
- [13] S.T. Kang, B.Y. Lee, J.-K. Kim, Y.Y. Kim, The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2450–2457.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.057>.
- [14] L. Segura-Castillo, S. Cavalaro, C. Goodier, A. Aguado, S. Austin, Fibre distribution and tensile response anisotropy in sprayed fibre reinforced concrete, *Mater. Struct.* 51 (2018).
<https://doi.org/10.1617/s11527-018-1156-5>.
- [15] T. Zhang, Y. Zhang, H. Zhu, Z. Yan, Characterizing the thermal properties of hybrid polypropylene-steel fiber reinforced concrete under heat exposure: Insights into fiber geometry and orientation distribution, *Compos. Struct.* 275 (2021) 114457.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114457>.

- [16] A. Blanco, P. Pujadas, A. de la Fuente, S.H.P. Cavalaro, A. Aguado, Assessment of the fibre orientation factor in SFRC slabs, *Compos. Part B Eng.* 68 (2015) 343–354.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.001>.
- [17] P. Martinelli, M. Colombo, P. Pujadas, A. de la Fuente, S. Cavalaro, M. di Prisco, Characterization tests for predicting the mechanical performance of SFRC floors: identification of fibre distribution and orientation effects, *Mater. Struct.* 54 (2021) 3.
<https://doi.org/10.1617/s11527-020-01593-7>.
- [18] F. Laranjeira, S. Grünewald, J. Walraven, C. Blom, C. Molins, A. Aguado, Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete, *Mater. Struct.* 44 (2011) 1093–1111.
<https://doi.org/10.1617/s11527-010-9686-5>.
- [19] D. Dupont, L. Vandewalle, Distribution of steel fibres in rectangular sections, *Cem. Concr. Compos.* 27 (2005) 391–398.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.03.005>.
- [20] S. Cavalaro, R. López Carreño, J. Torrents, A. Aguado, P. Juan-García, Assessment of fibre content and 3D profile in cylindrical SFRC specimens, *Mater. Struct.* 49 (2016).
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0521-2>.
- [21] L. González, Á. Gaute, J. Rico, C. Thomas, Effect of Fibre Reinforcement on Creep in Early Age Concrete, *Appl. Sci.* 12 (2022).
<https://doi.org/10.3390/app12010257>.
- [22] CEN, EN 83507 Concrete with fibres. Testing in compression, (2004).
- [23] AENOR, UNE-EN 14651:2007. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual). UNE-EN 14651:2007+A1, (n.d.).