

Determinación del coeficiente de orientación para elementos de hormigón reforzados con fibras de poliolefina sometidos a fractura en modo mixto.

Determination of the orientation coefficient for concrete elements reinforced with polyolefin fibers subjected to mixed mode fracture.

Wladimir Ramírez¹; Marco Alberti²; Álvaro Picazo³; Jaime Gálvez⁴

¹Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica/Departamento de Ingeniería Civil, Ambato – Ecuador, wj.ramirez@uta.edu.ec

² Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos/Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Madrid – España, marco.garcia@upm.es

³ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Edificación/Departamento de Tecnología de la Edificación, Madrid – España, a.picazo@upm.es

⁴ Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos/Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Madrid – España, jaime.galvez@upm.es

DOI: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1800>

Resumen

Durante los últimos 60 años la utilización de hormigones reforzados con fibras (HRF) ha tenido una constante evolución. Esta técnica permite la reducción del armado tradicional mediante barras de acero en el diseño estructural de obras civiles y de edificación. Las fibras empleadas desde el principio del uso de esta técnica han sido las de acero, pero en estos últimos años otras fibras sintéticas se han abierto paso en los HRF. Así las macro fibras de poliolefina han

demostrado cumplir con los requerimientos necesarios para ser consideradas aptas en el diseño estructural. Pero este avance tecnológico de las fibras de poliolefina debe venir apoyado con el conocimiento profundo de sus características y la forma como estas se distribuyen dentro de los elementos estructurales. Por tal motivo, en el presente estudio se analiza la distribución de las fibras a través del coeficiente de orientación para elementos de hormigón reforzados con fibras de poliolefina (HRFP) sometidos a ensayos de fractura a modo mixto, los resultados indican que este tiende a disminuir con relación a un plano vertical.

Palabras clave | *Fractura en Modo Mixto, coeficiente de orientación, hormigón reforzado con fibras, ductilidad.*

Abstract

During the last 60 years the use of concrete reinforced with fibers (HRF) has had a constant evolution. This technique allows the reduction of the traditional reinforcement by means of steel bars in the structural design of civil works and buildings. The fibers used from the beginning of the use of this technique have been those of steel, but in recent years other synthetic fibers have made their way into HRF. Thus, polyolefin macro fibers have been shown to meet the necessary requirements to be considered suitable in structural design. But this technological advance of polyolefin fibers must be supported by a deep knowledge of their characteristics and the way in which they are distributed within the structural elements. For this reason, in the present study the distribution of the fibers is analyzed through the orientation coefficient for concrete elements reinforced with polyolefin fibers (HRFP) subjected to mixed mode fracture tests, the results indicate that this tends to decrease relative to a vertical plane.

Keywords: | *Mixed Mode Fracture, orientation coefficient, fiber-reinforced concrete, ductility*

1. Introducción

El refuerzo mediante barras de acero es la técnica más empleada para mejorar las características resistentes a flexión y tracción del hormigón. La adición de barras de acero complementa el buen comportamiento a compresión del hormigón y dota a esa unión, definida como hormigón armado, de una ductilidad que le habilita para ser empleado en la construcción de estructuras civiles y de edificación. Otra técnica que permite mejorar las cualidades del hormigón es la adición de fibras aleatoriamente dispuestas en su masa, formando el hormigón reforzado con fibras (HRF) (Zheng & Feldman, 1995). Para el empleo de esta técnica, desde mediados del siglo pasado, se han venido empleando fibras de acero que han dado como resultado realizaciones prefabricadas, pavimentos (Serna et al., 2009) (Zollo, 1997), revestimientos de túneles (Ghasemi et al., 2018) (Behfarnia & Behravan, 2014) y pasarelas peatonales (Lopez et al., 2014). En los últimos años el avance de la industria química ha permitido el desarrollo de macro fibras poliméricas, químicamente estables, como elemento de refuerzo en el hormigón. De esta manera se constituye el hormigón reforzado con fibras de poliolefina (HRFP) que mejora el comportamiento a tracción, flexión capacidad de deformación y tenacidad del hormigón (Alberti et al., 2015) (Zheng & Feldman, 1995) (Christ et al., 2019), dotándole de un carácter dúctil que permite ser empleado en el diseño estructural, a la vez que se elimina algún inconveniente de las fibras de acero (Sorelli et al., n.d.) (Coelho do Amaral Júnior et al., 2017) (Carmona Malatesta & Cabrera Contreras, 2009).

De igual forma las fibras poliméricas aportan beneficios, en relación con las fibras de acero, como pueden ser la reducción de peso de la estructura y la menor afección a la maquinaria empleada para el amasado y puesta en obra (Yin et al., 2015) (Sorensen et al., 2014) (G et al., 2017).

Diversos factores influyen en el comportamiento del HRF: el material, la forma de las fibras, la dosificación y su orientación en el elemento estructural (Martinie

et al., 2015) (Sarmiento et al., n.d.) (Andries et al., 2015) (Yoo et al., 2016) (Marcos García Alberty, 2015) (Aguilar et al., 2021) (Zerbino, n.d.).

En este trabajo se evalúan diferentes tipos de HRFP sometidos a ensayos de flexión en tres puntos modificados para producir fractura por combinación de esfuerzos de corte y tracción (Modo mixto). Se ha empleado un hormigón fluido con una cuantía de fibras de poliolefina de 3, 6 y 10 kg/m³ en probetas prismáticas de 600x150x150 mm³, un hormigón fluido sin fibras como control y un hormigón autocompactante con 10 kg/m³ de fibras de poliolefina con tres tamaños diferentes. Los resultados obtenidos muestran como varía el coeficiente de orientación en la sección transversal de la probeta .

2. Metodología

Se desarrolló una investigación experimental a partir de la elaboración de probetas prismáticas con hormigón fluido y hormigón autocompactante, cuyas dimensiones se indican en la Tabla 1, en la dosificación se usaron diferentes cantidades de fibra de poliolefina entre 3 y 10 Kg/m³ para las probetas de hormigón fluido, mientras que para las probetas de hormigón autocompactante la dosificación se mantuvo constante en 10 Kg/m³. Sobre las probetas se realizaron ensayos de flexión modificados para reproducir la fractura por modo mixto y posteriormente a través de un conteo de fibras se analizó la distribución de estas, para tres planos: el plano de fractura por modo mixto, un plano vertical sobre la entalla de la probeta y un plano vertical de toda la sección que cruza por la entalla.

Tabla 1.

Características de las probetas realizadas en la campaña experimental

Hormigón	Dimensiones (mm)			Número de Probetas	Dosificación (kg/m ³)	Longitud de Fibra(mm)	Denominación
	Longitud	Ancho	Altura				
Fluido	600	150	150	2	-	-	HF0
Fluido	600	150	150	1	3	60	HF3
Fluido	600	150	150	2	6	60	HF6
Fluido	600	150	150	2	10	60	HF10
Autocompactante	340	50	75	3	10	48	WP
Autocompactante	675	50	150	5	10	48	WM
Autocompactante	1350	50	300	4	10	48	WG

2.1 Materiales, dosificación y características

Para la fabricación de las probetas de hormigón fluido y autocompactante se usó cemento tipo EN 197-1 CEM I 52.5 R-SR 5, áridos silíceos formados por gravillas y gravas con tamaños de 4 a 8 mm y 4 a 12 mm. Además, se usó arena con un tamaño entre 0 y 2 mm. El tamaño máximo del agregado fue de 12.7 mm. Como adición se usó filler calizo con densidad 2700 kg/m³ y superficie específica 400-450 m²/kg. El contenido de carbonato de calcio del filler calizo fue mayor del 98% con menos del 0.05 % retenido en el tamiz de 45 um. Para lograr la consistencia adecuada se empleó Sika Viscocrete 5720, un superplastificante a base de policarboxilatos con un contenido sólido del 36% y 1090 Kg/m³ de densidad. Se usaron fibras rectas de poliolefina con longitudes de 60 y 48 mm para hormigón fluido y autocompactante respectivamente. La dosificación de estos hormigones se muestra en la Tabla 2 y las características de las fibras en la Tabla 3.

Tabla 2.*Dosificación Hormigón Fluido y Autocompactante*

	HF0	HF3	HF6	HF10	WP-WM-WG
Agua (Kg/m ³)	187,50	187,50	187,50	187,50	187,50
Cemento (Kg/m ³)	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00
Filler Calizo (Kg/m ³)	100,00	100,00	100,00	100,00	200,00
Arena (Kg/m ³)	916,00	916,00	916,00	916,00	917,70
Grava (Kg/m ³)	300,00	300,00	300,00	300,00	367,10
Gravilla (Kg/m ³)	450,00	450,00	450,00	450,00	244,70
Fibras de poliolefina Vf (Kg/m ³)	-	3,00	6,00	10,00	10,00
Superplastificante 0,75-1,25 % peso del cemento (Kg/m ³)	2,80	2,80	2,80	2,80	4,70
Relación a/c	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Nota. Dosificación tomada de (Marcos García Alberty, 2015)

Tabla 3.*Propiedades de fibras usadas en hormigón fluido y autocompactante*

Tipo de fibra	Fibras de poliolefina
Longitud (mm)	48-60
Forma de fibra	Recta
Densidad (g/cm ³)	0,91
Diámetro equivalente (mm)	0,903
Resistencia a tracción (MPa)	>500
Módulo de elasticidad (GPa)	>9
Fibras por Kg	27000
Estructura de la superficie	Rugosa

Para conseguir una adecuada compactación, el hormigón fluido fue vibrado en bandeja vibrante a una frecuencia de 3000 rpm durante un tiempo de 10 segundos. Las características del hormigón autocompactante en estado fresco fueron verificadas mediante el ensayo de escurrimiento (AENOR, 2011a) y del embudo en V (AENOR, 2011b). Los resultados de dichos ensayos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Resultados ensayos extensión de flujo y embudo en V

Ensayo	Parámetro	H. Autocompactante
UNE-EN 12350-8	T500 (s) df (mm)	6 570
UNE-EN 12350-9	Tv	20

Todas las probetas se mantuvieron en cámara húmeda hasta el momento de su ensayo.

La granulometría de la grava y arena, así como la resistencia cilíndrica a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón fluido y autocompactante, han sido determinadas en investigaciones anteriores (Marcos García Alberty, 2015)

2.2 Conteo de Fibras

Las propiedades mecánicas de los elementos de HRF dependen en gran medida de la orientación y disposición de las fibras en el elemento estructural.

Los esfuerzos de corte dentro del flujo de hormigón hacen que la fibra vaya rotando y cambiando de posiciones, orientándose con la dirección del flujo de vertido (Martinie & Roussel, 2011). La orientación de la fibra es sensible a los esfuerzos del flujo en el fluido y a las condiciones de confinamiento del fluido debido a la fricción que se desarrolla en las paredes (Boulekbache et al., 2010). De todos los posibles factores que afectan a la disposición de las fibras, los que mayor influencia tienen en la posición final de las fibras son: la forma del vaciado del hormigón, el proceso de compactación y el efecto pared (Dupont & Vandewalle, 2005) (Martinie & Roussel, 2011) (Martinie et al., 2015).

Conocer la distribución y el número de fibras que hay en una determinada sección es muy importante, ya que la respuesta del material ante esfuerzos de

tracción está gobernada por el factor de orientación cuyo valor numérico a partir de ensayos se ha establecido entre $\theta=0,5$ y 0.7 (Marcos García Alberty, 2015) (Sarmiento et al., n.d.) (Andries et al., 2015) (Zerbino, n.d.).

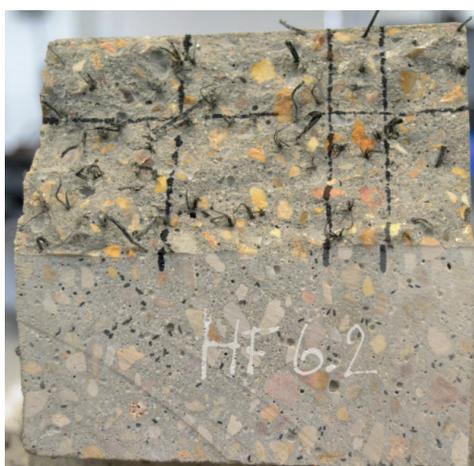
El número de fibras que se pueden localizar en un plano de fractura y que contribuyen a disminuir el efecto de propagación de grietas en la sección o llamado coeficiente de orientación (Krenchel, 1975) (Martinie et al., 2015), representa la relación entre el número real de fibras que se encuentran en la sección (n) y el número teórico de fibras para la misma (th), según la Ecuación (1).

$$\theta = \frac{n}{th} \quad (1)$$

Una forma práctica de determinar el número real de fibras de un plano de fractura consiste en realizar una malla que divida al plano de fractura en varias partes de menor tamaño y contar el número de fibras en cada parte (Gettu et al., 2005). En la Figura 1 se puede observar una probeta tipo HF con la malla dibujada sobre el plano de fractura.

Figura 1.

Malla para el conteo de fibras dibujada sobre una probeta tipo HF



El número teórico de fibras se calcula según se indica en la ecuación (2) , donde A_c es la superficie de fractura, V_f es la relación entre el volumen de fibras en la probeta y el volumen de la probeta y A_f es el área de la sección transversal de una fibra.

$$n = \frac{A_c \cdot V_f}{A_f} \quad (2)$$

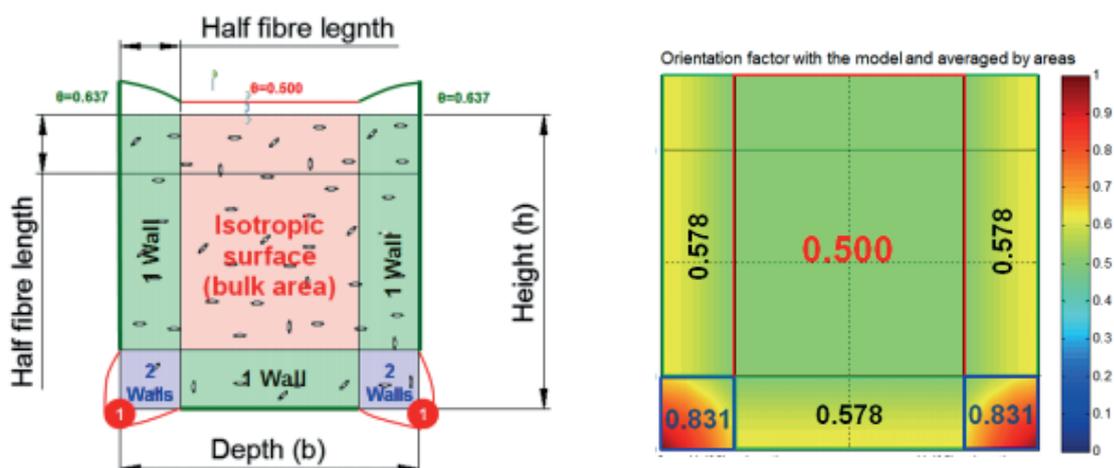
$$V_f = \frac{\text{Volumen de fibras}}{\text{Volumen de probeta}} \quad (3)$$

Otros autores reportan la creación de un modelo matemático a través del cual se pueden determinar los valores del coeficiente de orientación para elementos tipo viga hechos de

hormigón autocompactante, se puede identificar claramente tres zonas en la sección trasversal (Marcos García Alberty, 2015)

Figura 2.

Valores del coeficiente de orientación



Nota: Tomado de (Marcos García Alberty, 2015)

Las zonas con coeficiente θ_2 corresponden al área afectada por el efecto pared. En la zona θ_1 el hormigón puede desplazarse con mayor facilidad debido a que se desliza sobre otras partículas de la misma masa y la zona θ_3 es el área donde existe una doble interacción del efecto pared.

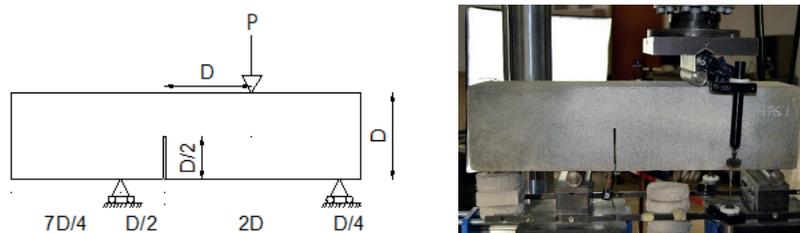
La zona de efecto pared es aquella franja donde hay una distribución de fibras diferente a la zona central de la sección transversal del elemento. Esto se debe al rozamiento que existe entre el flujo y las paredes del encofrado. El ancho de la franja se acota como una longitud igual a la mitad de la longitud de las fibras (Dupont & Vandewalle, 2005).

2.3 Ensayos en Modo III

Para someter las probetas a un esfuerzo de tracción y cortante en Modo mixto se realizaron ensayos de flexión en tres puntos con distribución asimétrica tanto del punto de aplicación de la carga como de los apoyos. Todas las distancias para la realización de los ensayos se encuentran parametrizadas con relación a la altura de las probetas, según se puede ver en la Figura 3 (Gálvez et al., n.d.).

Figura 3.

Disposición de ensayos a Modo mixto



En todas las probetas se realizó una entalla, de altura igual a la mitad de la altura de la probeta y anchura de 4mm (Gálvez et al., n.d.) (Cendón et al., 2000). La entalla se realizó con una máquina de corte.

Para la correcta colocación de la probeta sobre los apoyos y la correcta aplicación de la carga se utilizó un nivel láser. Los ensayos se realizaron en una máquina Instron® 8803 con una capacidad máxima de 500kN y células de carga Dynacell™. La velocidad de aplicación de la carga durante el ensayo fue de 0.0425 mm/min hasta los 0.6 mm de flecha y 0.17 mm/min para valores

superiores de flecha. La abertura de la entalla fue medida mediante un extensómetro tipo CMOD (crack mouth open displacement) y la flecha que se produjo en la viga fue medida mediante dos extensómetros tipo LVDT (linear variable displacement transducer) situados a cada lado de la probeta.

3. Resultados experimentales

Conteo de fibras

El objetivo del conteo de fibras es determinar el coeficiente de orientación en la superficie de fractura, en el plano vertical de la entalla y en la sección transversal completa. Para contar las fibras se han subdividido ambas superficies en regiones más pequeñas donde se marcan las zonas de efecto pared, como se muestra en la Figura 1.

Las fibras presentaron tres tipologías: rota, deslizada y mal situada. El fallo por rotura indica que la fibra falló por tracción produciéndose la rotura de la fibra. El fallo por deslizamiento implica que la fibra no tiene la suficiente longitud de adherencia con la matriz de hormigón siendo extraída por completo. Las fibras mal situadas o mal ubicadas son aquellas que se disponen de forma paralela al plano a analizar, sea este el de fractura o el plano vertical y su colaboración en el proceso de fractura es despreciable.

Para el cálculo del coeficiente de orientación, debido a que la superficie de fractura es de forma irregular, se ha considerado un plano de fractura formado por la compensación de áreas de la superficie.

El coeficiente de orientación se calculó para las tres zonas de cada probeta, para representar el coeficiente del área total se hizo un cálculo ponderado en función del área de cada zona. En el caso de hormigón fluido la Figura 4 (a) muestra el coeficiente de orientación sobre la entalla, la Figura 4 (b) en el plano de fractura, mientras que la Figura 4 (c) muestra el coeficiente de orientación para toda la sección vertical que cruza por la entalla de igual manera en la Figura 5 para el caso de hormigón autocompactante.

Figura 4.

(a) Coeficiente de orientación plano vertical; (b) coeficiente de orientación plano de fractura para hormigón fluido; (c) Coeficiente de orientación sección vertical completa para hormigón fluido

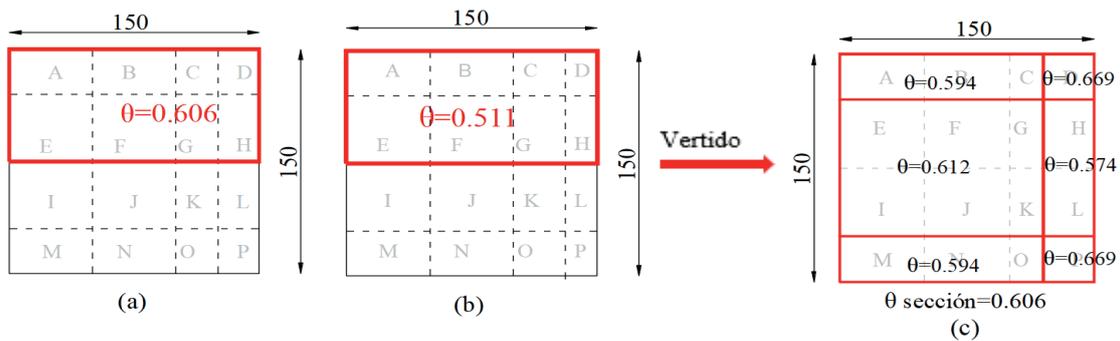
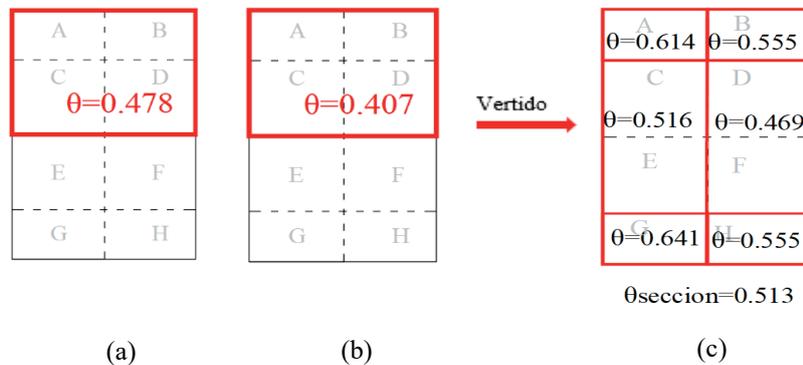


Figura 5

(a) Coeficiente de orientación plano vertical; (b) coeficiente de orientación plano de fractura para hormigón autocompactante; (c) Coeficiente de orientación sección vertical completa para hormigón autocompactante



4. Comparación y discusión

Si observamos la Figuras 4,5,6 de hormigón fluido y autocompactante, se identifica que existe una disminución del coeficiente de orientación para el plano de fractura con relación al plano vertical, el coeficiente de orientación en el primer caso disminuye un 16% y en el segundo 15 % con relación al plano vertical que

crucza por la entalla (Figura 4). De acuerdo con el modelo propuesto por (Marcos García Alberty, 2015) las fibras en el hormigón tienden a ubicarse en posición horizontal por acción del flujo, de aquí se deduce que teóricamente el coeficiente de orientación varía entre cero y uno, uno cuando el plano de fractura es vertical y cero cuando el plano de fractura es horizontal. Cualquier otro plano de fractura que se encuentre inclinado tendrá un coeficiente de orientación menor a 1 y este disminuirá conforme aumente el ángulo de inclinación con respecto al plano vertical.

Las Figuras 4 y 5 muestran el coeficiente de orientación calculado para un plano vertical de la sección completa, en las probetas de hormigón fluido $\theta = 0.606$ y en las de hormigón autocompactante $\theta = 0.513$, si hacemos el promedio de ambos valores encontramos que $\theta = 0.560$ valor similar al propuesto por (Marcos García Alberty, 2015) (Andries et al., 2015) (Zerbino, n.d.) . La disminución del coeficiente para las probetas de hormigón autocompactante puede estar influenciado por un cambio en las propiedades del flujo debido al menor espesor de estas.

La Figura 4 indica que el coeficiente de orientación para la sección vertical completa en zona influenciada por un doble efecto pared vale 0.669 mientras que para la zona de simple efecto pared vale 0.574 y 0.594, disminuye hasta un 14% es decir se puede notar que en la zona de doble efecto pared las fibras se ubican de mejor manera, el valor promedio entre las dos zonas es 0.61 valor similar a lo propuesto por (Sarmiento et al., n.d.).

Las probetas de hormigón autocompactante realizadas con una misma dosificación, muestran que la cantidad de fibras aumenta con el tamaño de la probeta, como se indica en la Figura 7, donde el número de fibras/mm² para probetas pequeñas es 0.0065 y para probetas grandes 0.0076, es decir, aumenta un 17 %, por otra parte la distribución de las fibras también mejora con el tamaño de la probeta donde el coeficiente de orientación del plano de fractura en probetas pequeñas es 0.361 y en probetas grandes 0.472, se incrementa un 31% (ver Figura 7).

Figura 6

Coefficiente de orientación en probetas de hormigón fluido y autocompactante

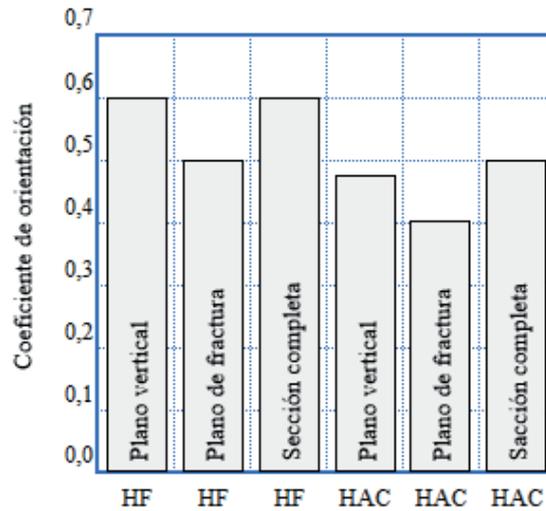
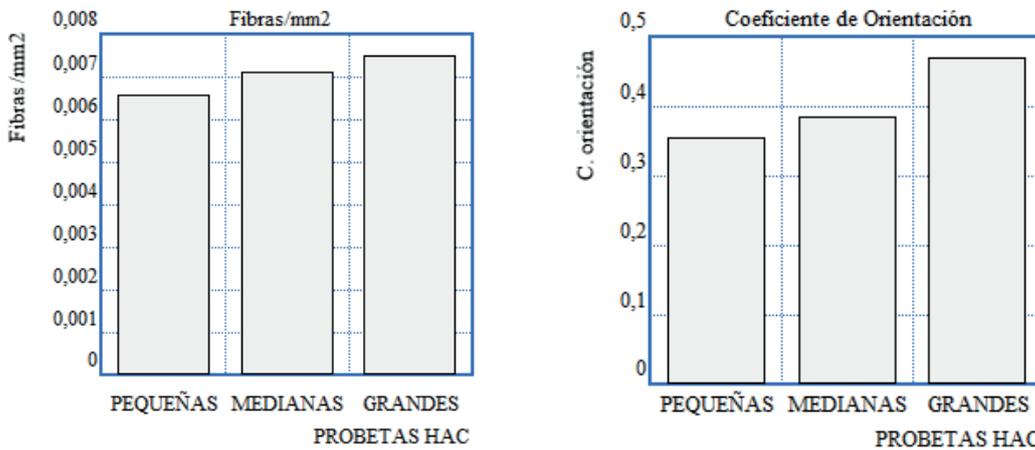


Figura 7

Cantidad de fibras/mm²-tamaño de probetas y coeficiente de orientación-tamaño de probetas para hormigón autocompactante en el plano de fractura



El coeficiente de orientación para la sección completa en probetas pequeñas es 0.485 y en probetas grandes 0.545, aumenta un 12 %. Estas variaciones nos indican la existencia de un fenómeno reológico relacionado con el tamaño de las probetas y el flujo del hormigón, porque al ser elementos delgados, durante el vertido del hormigón las fibras experimentan la mayoría de sus movimientos en un solo plano, el mismo que se encuentra limitado por la altura de la probeta.

Razón por la cual, en probetas grandes al existir una mayor altura, las líneas de flujo del hormigón recorren una mayor distancia hacia los costados de la probeta y provoca que las fibras ocupen una mejor posición con respecto a las probetas pequeñas, resultados similares fueron obtenidos por (Andries et al., n.d.) donde para vigas de 2 m de longitud se demuestra que el coeficiente de orientación crece conforme se aleja la distancia al punto de vertido.

5. Conclusiones

Se comparó el cálculo del coeficiente de orientación para un plano vertical con el modelo propuesto por otros autores y existen diferencias numéricas que podrían deberse a la relación entre el ancho de la probeta y la altura de esta, influenciado por las propiedades reológicas del flujo de hormigón.

El coeficiente de orientación y la cantidad de fibras por superficie tienden a aumentar conforme aumenta el tamaño de la probeta, probablemente debido a un fenómeno reológico que provoca una mejor distribución y orientación de las fibras conforme aumenta el recorrido de las líneas de flujo.

El hormigón autocompactante elaborado con 10 Kg/m³ de fibra de poliolefina presentó una adecuada trabajabilidad, esta característica se refleja en los ensayos de extensión de flujo y embudo en V.

El ensayo modificado de flexión en tres puntos resultó adecuado para reproducir la condición de fractura en modo mixto.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al personal que forma parte del Laboratorio De Materiales De Construcción de la Universidad Politécnica de Madrid por facilitar sus instalaciones para el desarrollo de la presente investigación.

7. Referencias

AENOR. (2011a). *UNE-EN 12350-8. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.*

AENOR. (2011b). *UNE-EN-12350-9 Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V.*

Aguilar, J. V., Juárez-Alvarado, C. A., Mendoza-Rangel, J. M., & Terán-Torres, B. T. (2021). Effect of the notch-to-depth ratio on the post-cracking behavior of steel-fiber-reinforced concrete. *Materials*, 14(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14020445>

Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2015). Comparison between polyolefin fibre reinforced vibrated conventional concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 85, 182–194. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.03.007>

Andries, J., Itterbeeck, P., Vandewalle, L., & van Gysel, A. (2015, July). *Influence of concrete flow on spatial distribution and orientation of fibres in steel fibre reinforced self-compacting concrete.*

Andries, J., Itterbeeck, P. van, ... L. V. symposium, & 2015, undefined. (n.d.). Influence of concrete flow on spatial distribution and orientation of fibres in steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Researchgate.Net*. Retrieved July 19, 2021, from https://www.researchgate.net/profile/Joren-Andries/publication/323486427_Influence_of_concrete_flow_on_spatial_distribution_and_orientation_of_fibres_in_steel_fibre_reinforced_self-compacting_concrete/links/5a9815c745851535bcdfad62/Influence-of-concrete-flow-on-spatial-distribution-and-orientation-of-fibres-in-steel-fibre-reinforced-self-compacting-concrete.pdf

Behfarnia, K., & Behravan, A. (2014). Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels. *Materials & Design*, 55, 274–279. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.09.075>

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2010). Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1664–1671. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.02.025>

Carmona Malatesta, S., & Cabrera Contreras, M. (2009). Comportamiento al corte de hormigones reforzado con fibras de acero. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(1), 74–94. <https://doi.org/10.4067/s0718-50732009000100004>

Cendón, D., Gálvez, J., Elices, M., of, J. P.-I. journal, & 2000, undefined. (2000). Modelling the fracture of concrete under mixed loading. *Springer*, 103(3), 293–310. <https://doi.org/10.1023/A:1007687025575>

Christ, R., Pacheco, F., Ehrenbring, H., Quinino, U., Mancio, M., Muñoz, Y., & Tutikian, B. (2019). Study of mechanical behavior of ultra - High performance concrete (UHPC) reinforced with hybrid fibers and with reduced cement consumption | Estudio del comportamiento mecánico del hormigón de ultraaltas prestaciones (UHPC) reforzado con fibras híbridas y. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(2), 159–168. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732019000200159>

Coelho do Amaral Júnior, J., Caroline Ferreira Silva, L., & Guadagnin Moravia, W. (2017). *Experimental analyses of polymeric fiber addition on concrete mechanical properties*. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0112>

Dupont, D., & Vandewalle, L. (2005). Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites*, 27(3), 391–398. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2004.03.005>

G, A. M., Alejandro, E., C, G. J., & Luis, P. (2017). Structural Cast-in-Place Application of Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete in a Water Pipeline Supporting Elements. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 8(4), 05017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000274](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000274)

Gálvez, J., Cendón, D., Planas, J., ... G. G.-P. of, & 1998, undefined. (n.d.). Fracture of concrete under mixed loading-experimental results and numerical prediction. *Framcos.Org*. Retrieved July 14, 2021, from <http://www.framcos.org/FraMCoS-3/1-7-1.pdf>

Gettu, R., Gardner, D. R., Saldívar, H., & Barragán, B. E. (2005). Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens. *Materials and Structures*, 38(1), 31–37. <https://doi.org/10.1007/BF02480572>

Ghasemi, M., Ghasemi, M. R., & Mousavi, S. R. (2018). Investigating the effects of maximum aggregate size on self-compacting steel fiber reinforced concrete fracture parameters. *Construction and Building Materials*, 162, 674–682. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.141>

Krenchel, H. (1975). Fibre spacing and specific fibre surface. *Fibre Reinforced Cement and Concrete*, 1975, 69–79.

Lopez, J. A., Serna, P., Camacho, E., Coll, H., & Navarro-Gregori, J. (2014). First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction. *Structural Engineering International*, 24(1), 101–104. <https://doi.org/10.2749/101686614X13830788505793>

Marcos García Alberty. (2015). *Polyolefin fibre-reinforced concrete: from material behaviour to numerical and design considerations*.

Martinie, L., Lataste, J.-F., & Roussel, N. (2015). Fiber orientation during casting of UHPFRC: electrical resistivity measurements, image analysis and numerical simulations. *Materials and Structures*, 48(4), 947–957. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0205-3>

Martinie, L., & Roussel, N. (2011). Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 993–1000. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.05.008>

Sarmiento, E., Zirgulis, G., ... S. S.-B. R., & 2012, undefined. (n.d.). Influence of concrete flow on fibre distribution, orientation and mechanical properties of fibre reinforced concrete. *Rilem.Net*. Retrieved July 23, 2021, from https://www.rilem.net/gene/main.php?base=500218&id_publication=419&id_papier=8659

Serna, P., Arango, S., Ribeiro, T., Núñez, A. M., & Garcia-Taengua, E. (2009). Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain. *Materials and Structures*, 42(9), 1233. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9540-9>

Sorelli, L., Meda, A., Journal, G. P.-A. M., & 2006, undefined. (n.d.). Steel fiber concrete slabs on ground: a structural matter. *Gci.Ulaval.Ca*. Retrieved July 13, 2021, from <https://www.gci.ulaval.ca/fileadmin/gci/documents/4.pdf>

Sorensen, C., Berge, E., & Nikolaisen, E. B. (2014). Investigation of Fiber Distribution in Concrete Batches Discharged from Ready-Mix Truck. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(4), 279–287. <https://doi.org/10.1007/s40069-014-0083-2>

Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 180–188. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.05.105>

Yoo, D. Y., Banthia, N., Yang, J. M., & Yoon, Y. S. (2016). Size effect in normal- and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 121, 676–685. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.040>

Zerbino, G. M. (n.d.). *RESPUESTA POST FISURACIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRAS*.

Zheng, Z., & Feldman, D. (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science*, 20(2), 185–210.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0079-6700\(94\)00030-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0079-6700(94)00030-6)

Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107–122.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-7)