

EFECTO DE LA VELOCIDAD Y LA INCLINACIÓN EN ENSAYOS DE ARRANCAMIENTO DE FIBRAS LISAS Y CONFORMADAS

M. Tarifa^{1*}, E. Poveda², V.M.C.F. Cunha³, J.A.O. Barros³

¹E.T.S.I. Aeronáutica y del Espacio, Universidad Politécnica de Madrid, Pza. del Cardenal Cisneros 3, 28040 Madrid, Tfno: 910 675 939 *Correo-e: manuel.tarifa@upm.es

²E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P., UCLM, Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real

³ISISE, Institute of Science and Innovation for Bio-Sustainability (IB-S), Department of Civil Engineering, University of Minho, Guimarães, Portugal

RESUMEN

En el presente artículo se recopilan los resultados de una reciente campaña experimental sobre el efecto de la velocidad de sollicitación y del ángulo de inclinación, en ensayos de arrancamiento de fibras de acero de una matriz de hormigón. Para ello, se obtuvieron probetas de placas fabricadas con hormigón auto-compactante de 86 MPa de resistencia. En el programa experimental se emplearon fibras de acero de extremos conformados de nueva generación, sección circular, con 60 mm de longitud y una relación de aspecto de 80. Los ensayos se llevaron a cabo con fibras de extremos conformados y fibras lisas, obteniendo estas últimas mediante el corte del gancho de las primeras. Para ambos tipos, la longitud de fibra embebida en el hormigón fue de 20 mm, estudiando la influencia de la inclinación de la fibra para valores de 0°, 30° y 60°. Las fibras lisas se obtuvieron cortando el extremo conformado de las anteriores. Los ensayos se realizaron a tres velocidades de sollicitación 0.01, 0.1 y 1 mm/s. Como resultado, se obtuvo que las fibras más inclinadas incrementaron la carga necesaria para arrancarlas de la matriz de hormigón en todos los casos, aunque de manera más pronunciada en las fibras lisas. Además, el incremento en la velocidad de sollicitación hizo que la carga máxima en el ensayo se incrementara para el caso de las fibras lisas, mientras que permaneció prácticamente estable para las fibras conformadas.

PALABRAS CLAVE: Fibras de extremos conformados, fibras lisas, hormigón, ángulo de inclinación, velocidad de sollicitación.

ABSTRACT

This paper summarizes the results obtained in a recent experimental campaign on the effect of the loading pullout rate and the inclination angle of the steel fiber pullout test. For that purpose, specimens were obtained from a self-compacting concrete with a compressive strength of 86 MPa. In the experimental program hooked-end steel fibres of new generation, of circular cross section, length of 60 mm and aspect ratio of 80, were used. Tests were executed with both hooked-end and smooth fibers, being these last ones obtained from the first ones by cutting the hooked-end. For both type of fibers, their embedment length into concrete was 20 mm, and the influence of fiber inclination angle was investigated by adopting values of 0°, 30° and 60°. The tests were performed at displacement rates of 0.01, 0.1 and 1 mm/s. As a result, the peak pullout load increased with the inclination angle, in particular for the smooth series. Furthermore, higher displacement rates produced higher peak forces for the pullout of the smooth fibers, while the peak remained almost stable for hook-end fibers.

KEYWORDS: Hooked-end fibers, smooth fibers, concrete, inclination angle, loading pullout rate.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón reforzado con fibras, HRF, es un material en el que las fibras se encuentran aleatoriamente distribuidas en una matriz de hormigón. Estas fibras se unen a la matriz de hormigón mediante una interfaz, por tanto el comportamiento de este material está muy influenciado por el comportamiento de la interfaz entre la fibra y la matriz, así como por los mecanismos micromecánicos de refuerzo de fibra que se movilizan.

El ensayo de arrancamiento permite caracterizar las propiedades adherentes de la intercara fibra matriz. Éste consiste en la extracción de una sola fibra embebida en la

matriz de hormigón para obtener diferentes parámetros mecánicos, como la absorción de energía, que es el área delimitada por la curva carga desplazamiento o la resistencia de la adherencia entre la fibra y la matriz [1]. Es sabido que la introducción de fibras en matrices cementíceas incrementa la absorción de energía o la tenacidad y que este incremento es mayor en ensayos dinámicos o de impacto.

Aunque existen abundantes estudios sobre el comportamiento del ensayo de arrancamiento a velocidades estáticas [2–4], y algunos dinámicos [5–7], el efecto de la velocidad de sollicitación sobre diferentes tipos de fibras y a diferentes ángulos de inclinación es un tema que aún

está por investigar. Kim, Tawil y Naaman [8] estudiaron el efecto de la velocidad a 0.018, 18 y 1800 mm/s en fibras onduladas y con extremos conformados en gancho, concluyendo que la fibra ondulada presentaba mayor influencia de la velocidad que la fibra de extremos conformados. Abu *et al.* [9] estudiaron dos velocidades para hormigón de ultra altas prestaciones en diferentes matrices, concluyendo que la resistencia de la matriz mejoraba el comportamiento al arrancamiento en las fibras deformadas.

Bhutta *et al.* [10] estudiaron el efecto de la velocidad en diferentes tipos de fibras: lisas, de extremos conformados en gancho y onduladas, así como en diferentes matrices, sin embargo las fibras que comparaban tenían diferente diámetro entre sí y sus resultados estaban centrados principalmente en el comportamiento de las matrices que estudiaban. Xu *et al.* [11] realizaron un estudio semejante en hormigón de ultra altas prestaciones, concluyendo que la fibra que experimentaba mayor sensibilidad era la que ellos denominaron medio extremos conformados con gancho. Respecto a la influencia del ángulo en la velocidad de sollicitación, solo estudiaron un tipo de fibra (la lisa), en tres ángulos próximos (0° , 20° , 45°) y a dos velocidades. Ellos detectaron que el ángulo de 20° era el más sensible a la velocidad.

Al no existir mucha más información al respecto, esta investigación estudia el efecto de la velocidad de sollicitación, desde una cuasi-estática de 0.01mm/s, hasta dos dinámicas de 0.1 mm/s y 1 mm/s, en tres ángulos diferentes (0° , 30° , 60°) y en dos tipos de fibras. Las fibras eran geoméricamente iguales, salvo que un tipo era fibra lisa y el otro de extremos conformados en gancho de tipo 3D.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este apartado se describen los materiales utilizados y el procedimiento experimental seguido en la investigación.

2.1. Materiales y probetas

Las probetas se obtuvieron de una sola amasada de hormigón auto-compactante. Esta matriz de hormigón se fabricó con árido granítico de 20 mm de tamaño máximo, cemento CEM I 42.5 R, filler calizo y superplastificante, resultando una relación agua - cemento, a/c, de 0.2. Las proporciones de la mezcla, expresadas en peso, fueron 1: 0.69: 2.18: 1.67: 0.17: 0.017 (cemento: filler: arena: árido grueso: agua: superplastificante). Se realizaron ensayos en fresco sobre la matriz de hormigón, obteniendo un T500 de 4.3 segundos y un diámetro de la torta de 77 cm, características propias de un hormigón auto-compactante. La resistencia a compresión de la matriz de hormigón a los 30 días, medida en 3 cubos de 150 mm de lado, fue de 85.9 MPa, con un coeficiente de variación del 1.2 %.

El hormigón auto-compactante se empleó para fabricar

una losa de dimensiones $900 \times 1050 \text{ mm}^2$ y un espesor de 60 mm, con fibras individuales embebidas 20 mm en la matriz. Para conseguir esta losa, se diseñó un molde de madera fenólica que evitara la absorción de agua de la mezcla, totalmente desmontable en su base, de manera que entre los elementos que la componían, se pudieran colocar las fibras con toda precisión, ver Fig. 1. Una vez posicionadas y fijadas las fibras al molde, la losa se hormigonó y se dejó curar durante 3 días en el ambiente del laboratorio, con una temperatura de 26.3°C , tapada con un plástico, Fig. 2 a).

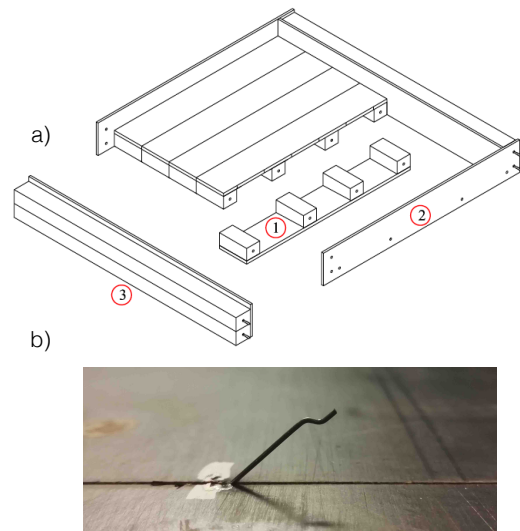


Figura 1: a) Molde, b) Posicionado de las fibras.

Pasados los 3 días, la losa se desmoldó y se dividió en 10 bandas de 900 mm de longitud cada una, con 10 fibras embebidas por banda y una separación de 90 mm entre una fibra y la siguiente, ver Fig. 2 b).



Figura 2: a) Molde con losa hormigonada; b) Fibras embebidas en la losa.

Para esta investigación se emplearon fibras de acero de extremos conformados de nueva generación, sección circular, 60 mm de longitud y una relación de aspecto de 80, ver Fig. 1 b). Se embebieron fibras de extremos conformados y fibras lisas, obteniendo estas últimas mediante el corte del gancho de las primeras. Para ambos tipos, la longitud de fibra embebida en el hormigón fue de 20 mm. La resistencia a tracción de las fibras era de 1225 MPa.

Se embebieron un total de 56 fibras, 24 lisas y 30 conformadas. Además, las fibras se fijaron en el molde de manera que quedaran embebidas con una inclinación de 0°, 30° ó 60°, destinando entre 8 y 10 fibras para cada combinación de fibra lisa o conformada e inclinación determinada.

2.2. Ensayos de arrancamiento

Para este investigación, se realizaron ensayos individuales de arrancamiento de fibras de acero lisas y conformadas en 3D. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de Estructuras, LEST, de la Universidad de Miño, en su campus de Guimarães (Portugal). Para ello se empleó un actuador de 50 kN de capacidad de carga y 200 mm de desplazamiento máximo del pistón, equipado con una célula de carga de la marca AEP-Tranducers de 50 kN y una resolución del 0.05 %. Las probetas en forma de banda longitudinal de la losa inicial, que contenían las fibras embebidas, se colocaron y fijaron sobre una bancada, centrando cada una de ellas perfectamente bajo el actuador antes de su ensayo. Al actuador se le colocó una mordaza instrumentada para agarrar firmemente la fibra a ensayar. La instrumentación de la mordaza consistía en dos sensores de desplazamiento de tipo LVDT, que medían la distancia entre la mordaza y la superficie del hormigón durante el ensayo, y por lo tanto el deslizamiento o extracción de la fibra de la matriz de hormigón, ver Fig. 3.



Figura 3: Ensayo de arrancamiento.

Para esta investigación, además del ensayo de fibras lisas y conformadas embebidas con distintos ángulos de inclinación, se añadió un parámetro de velocidad de arrancamiento de la fibra, determinado por la velocidad de avance del actuador. Así, las combinaciones tipo de fibra – ángulo de inclinación se ensayaron a velocidades desde

cuasi-estática, 0.01 mm/s, hasta velocidades dinámicas de 0.1 mm/s y 1 mm/s. Todas las configuraciones ensayadas y el número de repeticiones para cada una de ellas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Configuración y número de ensayos de arrancamiento realizados.

Veloc. (mm/s)	Fibras lisas			Fibras 3D		
	0°	30°	60°	0°	30°	60°
0.01*	2	2	3	6	6	6
0.1	4	4	5	5	5	5
1	4	4	5	5	5	5

* Nótese en la Tabla 1, que la configuración de ensayo correspondiente a la velocidad de arrancamiento cuasi-estática de 0.01 mm/s, tanto para las fibras lisas como para las de extremos conformados en 3D, se tomaron de los resultados de Cunha en [2].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos de los ensayos de arrancamiento realizados con fibras lisas y conformadas en 3D, con distintos ángulos de inclinación y a distinta velocidad de sollicitación.

La Fig. 4 muestra las curvas *Fuerza de arrancamiento vs. Deslizamiento* de todos los ensayos para la configuración correspondiente a fibras conformadas, inclinadas 0° y extraídas de la matriz de hormigón a una velocidad de 1 mm/s. En ella podemos comprobar la poca dispersión existente entre los ensayos con la misma configuración.

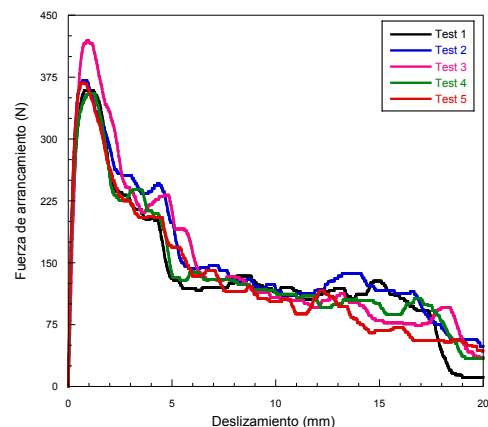


Figura 4: Ensayo de arrancamiento de fibras 3D, inclinadas 0° a un 1 mm/s.

Los ensayos se recopilaban calculando las curvas medias para cada configuración descrita en la Tabla 1. Así, las Figs. 5 y 6 contienen las curvas medias de las fibras lisas y conformadas respectivamente. Para cada tipo de fibra, las curvas se dividieron en tres gráficos, según el ángulo de inclinación, conteniendo cada uno de ellos las tres velocidades de arrancamiento por inclinación.

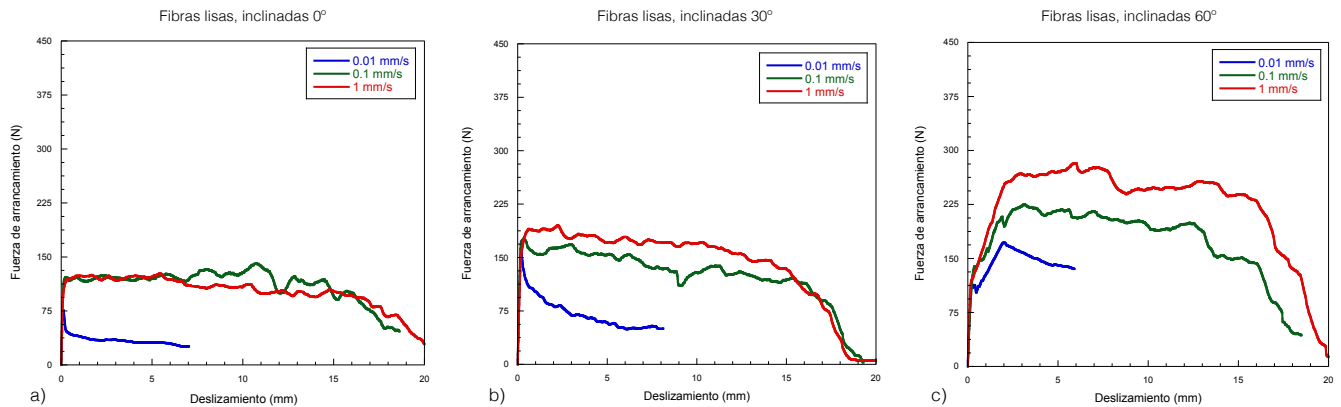


Figura 5: Curvas medias de ensayos de arrancamiento de fibras lisas.

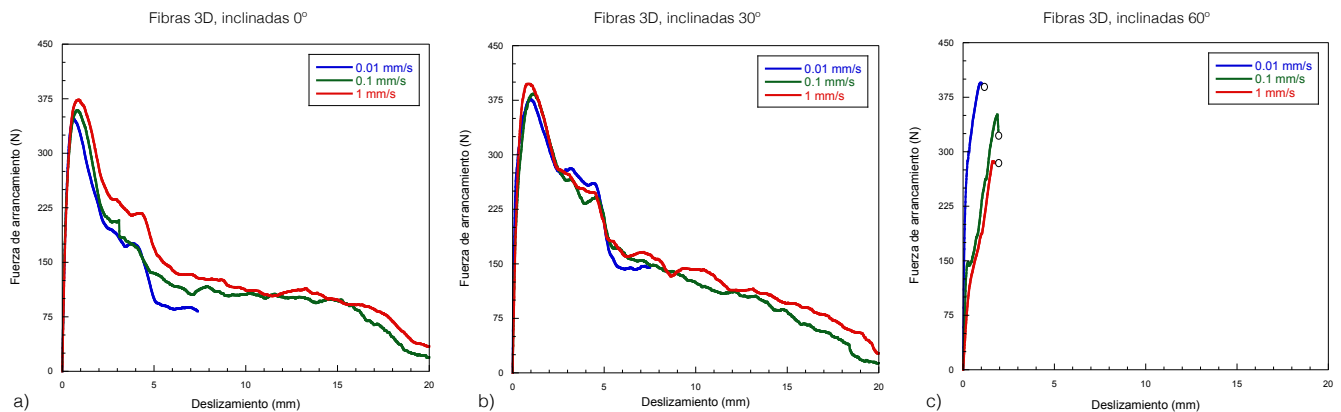


Figura 6: Curvas medias de ensayos de arrancamiento de fibras conformadas en gancho de tipo 3D.

Si comparamos ambas figuras, Figs. 5 y 6, se observa claramente como la terminación en gancho de las fibras conformadas, Fig. 6, proporcionan un anclaje muy superior al de las fibras lisas, y por lo tanto la fuerza máxima necesaria para extraerlas es superior. Además, la forma de las curvas es distinta en ambos casos. Así, en el caso de las fibras lisas, Fig. 5, la curva crece hasta definir un pico de carga, para luego decrecer lentamente. Esto se debe a que existen unas fuerzas adherentes en la intercara fibra – matriz de hormigón, y una vez vencidas actúan fuerzas de fricción que se oponen a la extracción de la fibra. Sin embargo, las curvas correspondientes a las fibras conformadas, Fig. 6, definen un pico máximo de carga y, a continuación, otro de valor inferior. El primero de ellos se corresponde con la deformación plástica durante la extracción de la primera parte del gancho, mientras que el segundo pico lo hace con la deformación de la segunda curvatura, ver geometría del gancho de la fibra conformada en 3D en la Fig. 1 b). En estas fibras, los fenómenos de fricción siguen existiendo, pero se ven superados por la contribución del anclaje mecánico que producen los extremos conformados.

Si ahora nos fijamos en el efecto que produce la inclinación de las fibras, comprobamos que para las fibras lisas, Fig. 5, su incremento provoca un claro ascenso de la fuerza necesaria para arrancarla de la matriz de hormigón, llegando a ser necesaria el doble de fuerza para arrancar las fibras inclinadas 60°, Fig. 5 c), que para hacerlo con las inclinadas 0°, Fig. 5 a). Un comportamiento similar presentan las fibras conformadas en 3D, Fig. 6, pero en este caso el incremento de fuerza con la inclinación es mucho menor. Cabe destacar que las fibras inclinadas 60°, representadas en la Fig. 6 c), se rompieron antes de lograr su completa extracción de la matriz de hormigón. Además, el incremento de la velocidad de sollicitación provocó su rotura a cargas cada vez más bajas, debido al aumento de la tensión en el punto de salida de la fibra por efectos dinámicos.

Observando el efecto de la velocidad de sollicitación de los ensayos, en el caso de las fibras lisas, Fig. 5, se comprueba que velocidades de sollicitación mayores produjeron incrementos de la fuerza de arrancamiento. Este efecto es más pronunciado para inclinaciones de fibra superiores. Por otro lado, para las fibras conformadas, Fig. 6,

el efecto de la velocidad de sollicitación del ensayo fue muy leve, prácticamente estable. Estos resultados nos hacen pensar que las fuerzas adherentes en la intercara fibra – matriz y las fuerzas de fricción son sensibles a la velocidad de extracción de la fibra, pero el anclaje que produce en gancho no lo es, por lo menos en este rango de velocidades de arrancamiento. Así, la predominancia del anclaje que produce el gancho de las fibras conformadas, oculta el efecto de la velocidad de sollicitación en los ensayos de fibras 3D.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación se estudió el efecto de la inclinación de la fibra y la velocidad de sollicitación en ensayos individuales de arrancamiento sobre fibras lisas y conformadas en gancho de tipo 3D. De los resultados obtenidos se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- La fuerza necesaria para extraer las fibras conformadas en 3D resultó ser muy superior a la necesaria para extraer las fibras lisas. Esto se debe al anclaje que proporciona el gancho de la fibra conformada.
- La forma de las curvas indica que el comportamiento de ambos tipos de fibra, lisas y 3D, es muy diferente. En el primer caso la curva incrementa su valor en carga hasta un máximo, para decrecer lentamente. Esto se debe a la fuerza adherente fibra – matriz de hormigón y a las fuerzas de fricción una vez vencida la primera. Sin embargo, en las fibras 3D encontramos un comportamiento de pico debido a la predominancia de la fuerza de anclaje que proporciona el gancho en la matriz de hormigón.
- Mayores inclinaciones de las fibras y velocidades de sollicitación del ensayo produjeron un incremento considerable de la fuerza de arrancamiento en las fibras lisas. Sin embargo, en las fibras en 3D el efecto fue leve debido a la predominancia de la contribución del anclaje mecánico que producen los extremos conformados.
- Todas las fibras conformadas, inclinadas 60°, se rompieron durante el ensayo. Además, el incremento de velocidad de sollicitación provocó su rotura a cargas cada vez más bajas. Esto se debe al aumento de tensión en el punto de salida de la fibra por efectos dinámicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las ayudas recibidas del Campus de Excelencia CYTEMA, a través de la beca Post-doc CYTEMA-Net (011200CE12), y del Dep. de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos de la UCLM. Además, agradecen al Dep. de Ingeniería Civil y al Laboratorio de Estructuras (LEST) de la Universidad de Miño por permitir el uso de sus instalaciones para esta

investigación, y el apoyo del FCT a través del proyecto PTDC/ECM-EST/2635/2014. Asimismo agradecen a la empresa Bekaert el suministro de sus fibras.

REFERENCIAS

- [1] Pompo, A., Stupak, P.R., Nicolais, L. and Marchese, B. (1996), Analysis of steel fibre pull-out from a cement matrix using video photography. *Cement and Concrete Composites*, 18(1):3–8.
- [2] Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O. and Sena-Cruz, J.M. (2010), Pullout behaviour of Steel Fibres in Self Compacting Concrete, *ASCE Journal of Materials in Civil Construction*, 22(1):1-9.
- [3] Cunha, V.M.C.F., Barros, J.A.O. and Sena-Cruz, J.M. (2011), An integrated approach for modelling the tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 41:64–76.
- [4] Alwan, J.M., Naaman, A.E. and Guerrero, P. (1999), Effect of mechanical clamping on the pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices. *Concrete Science and Engineering*, 1:15-25.
- [5] Gokoz, U.N. and Naaman, A.E. (1981), Effect of strain-rate on the pull-out behaviour of fibres in mortar. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3:187–202.
- [6] Bantia, N. and Trottier, J.F. (1991), Deformed steel fiber, cementitious matrix bond under impact. *Cement and Concrete Research*, 1:158–168.
- [7] Bindiganavile, V. and Bantia, N. (2005), Impact response of the fiber-matrix bond in concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 5:924–933.
- [8] Kim, D.J., El-Tawil, S. and Naaman, A.E. (2008), Loading Rate effect on pullout behavior of deformed steel fibers. *ACI Materials Journal*, 6:576–584.
- [9] Abu-Lebdeh, T., Hamoush, S. and Zornig, B. (2010) Rate effect on pullout behavior of steel fibers embedded in very-high strength concrete. *American J. of Engineering and Applied Sciences*, 2:454–463.
- [10] Bhutta, A., Farooq, M., Borges, P.H.R. and Bantia, N. (2018), Influence of fiber inclination angle on bond-slip behavior of different alkali-activated composites under dynamic and quasi-static loadings. *Cement and Concrete Research*, 107:236–246.
- [11] Xu, M., Hallinan, B. and Wille, K. (2016), Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 70:98–109.