

ID: XXXVIIIJSIE-07-001

ENSAYO DE ARRANCAMIENTO DE FIBRAS DE PLÁSTICO RECICLADO: UNA DISCUSIÓN DE ANTECEDENTES

PULL-OUT TEST OF RECYCLED PLASTIC FIBERS: A BACKGROUND DISCUSSION

Juan Pablo Ojeda (P) (1), Irma Mercante (2), Fernanda de Borbón (3)

(1) Ing., becario doctoral CONICET, Universidad Nacional de Cuyo, Fac. de Ingeniería, IMA, CEIRS, Argentina.

(2) Dra. Ing., docente investigadora, Universidad Nacional de Cuyo, Fac. de Ingeniería, IMA, CEIRS, Argentina.

(3) Dra. Ing., inv. adjunta de CONICET, Universidad Nacional de Cuyo, Fac. de Ingeniería, IMERIS, Argentina.

Dirección para correspondencia: juan.pablo.ojeda@ingenieria.uncuyo.edu.ar; (P) Presentador

Área Temática: Materiales y Durabilidad.

Resumen

El hormigón reforzado con fibras es un material de creciente interés para la industria de la construcción y para la comunidad científica. En distintos lugares del mundo se encuentra bajo estudio la posibilidad de utilizar macrofibras de plástico reciclado a partir de residuos debido al posible beneficio ambiental implicado. Uno de los ensayos básicos para caracterizar el comportamiento de las macrofibras es el de arrancamiento o *pull-out*. Este ensayo se utiliza a los fines de comparar la respuesta de fibras con distintos parámetros (material, geometría del eje, conformación superficial, longitud) y de modelar la respuesta micromecánica del problema en la interfaz fibra-matriz. El objetivo de este trabajo es discutir la metodología aplicada y los resultados obtenidos en ensayos de arrancamiento de macrofibras plásticas que se reportan en la literatura científica. Para esto se realizó una búsqueda bibliográfica en español y en inglés identificando trabajos publicados en los que se realizó el ensayo de arrancamiento de fibras de plástico. Se obtuvieron datos sobre las características geométricas de las fibras, la resistencia de la matriz, los parámetros de ensayo, la resistencia máxima y residual de arrancamiento y los modos de falla. Como resultado, se presenta una comparación entre los datos mencionados y una discusión sobre la variabilidad en los métodos de ensayo y las deficiencias detectadas en los reportes. Se concluye que es necesario utilizar una metodología estandarizada de ensayo de arrancamiento para lograr avances sostenidos en el tema.

Palabras clave: fibras, hormigón, plástico, revisión

Abstract

Fiber reinforced concrete is a material of growing interest for the construction industry and the scientific community. In different parts of the world, using recycled plastic macrofibers from waste is under study due to the possible environmental benefit involved. One of the basic tests to characterize the behavior of macrofibers is the pull-out test. It is used to compare the response of fibers with different parameters (material, axis geometry, conformation, length) and to model the micromechanical response at the fiber-matrix interface. The objective of this work is to discuss the methodology and the results obtained in plastic macrofiber pull-out tests reported in literature. To achieve this, a bibliographic search was carried out in Spanish and English, identifying published works in which the plastic fiber pull-out test was carried out. Data on geometric characteristics of the fibers, strength of the matrix, test parameters, maximum and residual pull-out strength and failure modes were obtained. As result, a comparison and a discussion about the variability in test methods are presented, as well as the deficiencies detected in reports. It is concluded that it is necessary to use a standardized methodology to achieve sustained progress on the subject.

Keywords: fibers, concrete, plastic, review.



1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más usados en la industria de la construcción, por lo que las estrategias de reducción de sus impactos ambientales son de gran importancia a escala global (Liew, Sojobi y Zhang, 2017; Merli et al., 2019; Ahmed et al., 2021). Una alternativa bajo estudio consiste en utilizar fibras recicladas para obtener hormigón reforzado con fibras (HRF).

El HRF presenta ventajas de tipo tecnológicas: posee mayor ductilidad y resistencia a la tracción y a la abrasión, a la vez que se reduce la fisuración por contracción y se mejora el comportamiento frente a acciones dinámicas. Además, el uso de fibras recicladas agrega beneficios ambientales por la reducción de residuos dispuestos en vertedero y la conservación de recursos (Wang, Wu y Li, 2000; Khalel et al., 2021; Ahmed et al., 2021).

Existen varios tipos de fibras de refuerzo. Las más estudiadas en la literatura científica y más utilizadas en la industria de la construcción son las metálicas (Merli et al., 2019), aunque cada vez más se estudian las sintéticas de plástico (Yin et al., 2015; Gu y Ozbakkalogluy, 2016) y las naturales (Ruano et al., 2020). Para facilitar la preselección de fibras, Shafei et al. (2021) elaboraron una tabla resumen en base a sus aplicaciones, limitaciones, costo, disponibilidad, durabilidad en ambientes alcalinos y resistencias mecánicas. En cuanto al tipo de trabajo publicado, Merli et al. (2019) observaron que la mayoría de las publicaciones correspondían a estudios experimentales sobre propiedades mecánicas y de durabilidad, siendo menos comunes las modelaciones numéricas, las evaluaciones ambientales y las revisiones bibliográficas.

Para conocer la respuesta micromecánica del HRF se utiliza el ensayo de arrancamiento, también conocido como ensayo de adherencia o, por sus nombres en inglés, *pull-out* y *debonding* (Teklal et al., 2018). Las fibras poseen distintos parámetros que modifican el comportamiento mecánico del HRF: el tipo de material, la geometría de su eje, su relación de aspecto geométrico y su conformación superficial (Ahmed et al., 2021).

Se conocen diversos mecanismos de falla del HRF (Zollo, 1997). En particular, para el ensayo de arrancamiento, interesan la fractura de la fibra en tracción, el deslizamiento por pérdida de adherencia y la degradación de la matriz. Inicialmente, la resistencia de la fibra embebida está dada por la adherencia con la matriz, y a medida que la fibra se deforma y la tensión crece, se degrada la interfaz y la resistencia remanente o residual se debe a la fricción ante el deslizamiento. En el caso de fibras con ganchos, con texturas o con geometrías de eje conformado, se produce un aporte de resistencia adicional por otros mecanismos (Isla Calderón et al., 2015). En su revisión, Yin et al. (2015) consideraron dos antecedentes experimentales, concluyendo que las fibras de eje recto tuvieron menor resistencia que las fibras con gancho y onduladas. Luego, Teklal et al. (2018), revisaron los modelos analíticos existentes de arrancamiento de fibras, analizando la adherencia fibra-matriz y los distintos ensayos experimentales, concluyendo que su comprensión supone analizar un complejo problema mecánico de tensiones.

El objetivo de este trabajo es discutir la metodología aplicada para llevar a cabo los ensayos de arrancamiento de macrofibras plásticas que se reportan en la literatura científica, así como analizar los efectos que los parámetros de las fibras y el ensayo podrían tener sobre los resultados.



2. METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda bibliográfica en español y en inglés utilizando los siguientes términos: fibra, plástico, reciclado, hormigón, HRF, ensayo, arrancamiento, adherencia; en ambos idiomas, en singular y plural, y combinados adecuadamente. Además, se revisaron las referencias de los trabajos hallados y las revisiones anteriores, sin limitación temporal de búsqueda.

En los trabajos hallados se compararon las metodologías de ensayo utilizadas, buscando similitudes y diferencias. A continuación, se recopiló las características geométricas de las fibras, el tipo de plástico, la resistencia de la matriz y de arrancamiento, los parámetros de ensayo y los modos de falla. Con estos datos se realizaron análisis de estadística descriptiva, considerando como casos individuales de análisis a las fibras de distinto tipo (material, longitud, eje o textura), independientemente del número de probetas gemelas ensayadas. La longitud, la relación de aspecto geométrico y la sección transversal de las fibras se calcularon como un promedio entre las determinaciones individuales. Finalmente, se discutieron las variaciones encontradas y sus posibles implicancias.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron 10 artículos con ensayos experimentales de arrancamiento de fibras plásticas en matrices cementicias, tanto de plástico virgen como reciclado. Su evolución temporal se grafica en la Fig. 1. Principalmente, las fibras recicladas fueron de PET, mientras que las de plástico virgen fueron de PP. En algunos casos, no se explicitó el material de las fibras.

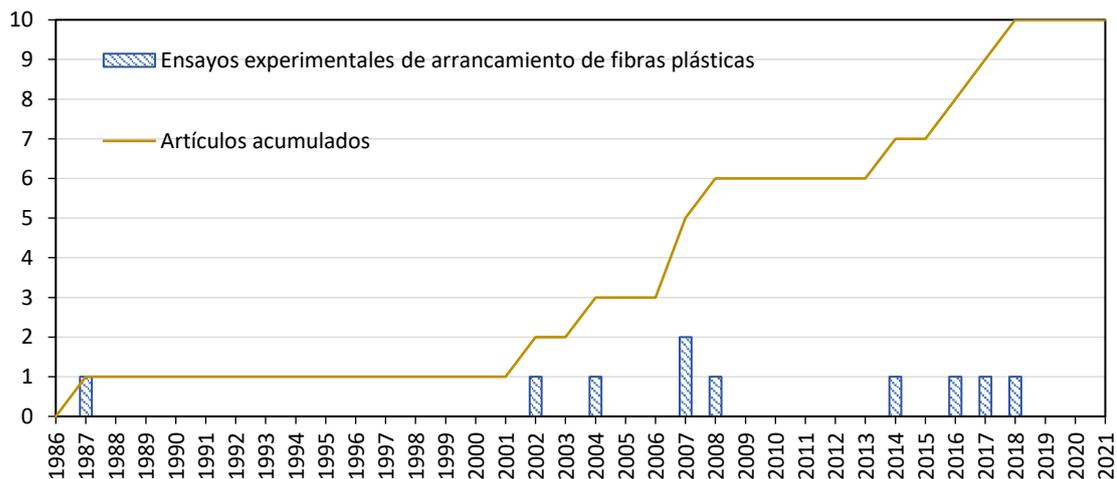


Figura 1. Serie temporal de artículos individuales y acumulados considerados en este trabajo

La Fig. 2 presenta gráficos de cajas y bigotes de las propiedades geométricas de las fibras de los estudios considerados. Los valores extremos que se observan en los gráficos de longitud y relación de aspecto geométrico corresponden a las fibras estudiadas por Wang, Li y Backer (1987).

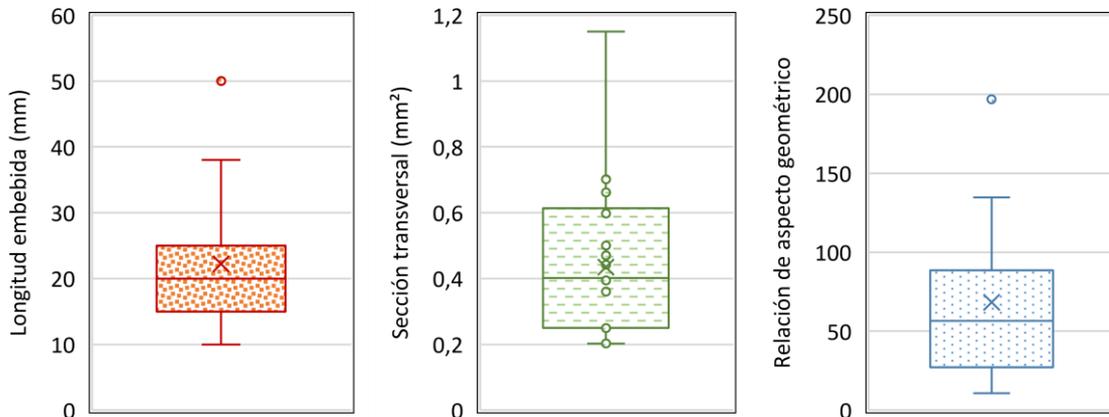


Figura 2. Gráficos de caja de las características geométricas de las fibras

Solamente en dos casos se informó la resistencia a compresión de la matriz. En Borg, Baldacchino y Ferrara (2016) se obtuvo 30 MPa y en Khalid et al. (2018) 34 MPa. A veces, solo se indicó la dosificación del mortero, como en Kim et al. (2008). Es de interés notar cómo Congro et al. (2021) utilizaron redes neuronales artificiales para predecir la resistencia residual a flexión del hormigón reforzado a partir de solo 3 parámetros: la relación de aspecto de la fibra, la resistencia a compresión de la matriz y el contenido volumétrico de fibras. Esto pone en evidencia la importancia del reporte de la resistencia a compresión de la matriz.

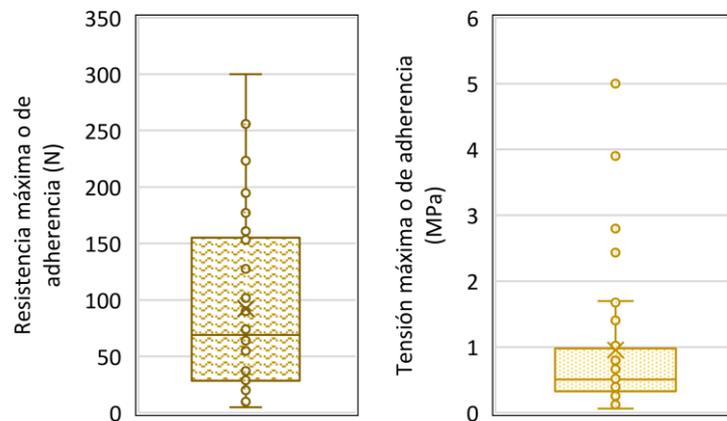


Figura 3. Gráficos de caja de la resistencia de adherencia y la tensión de adherencia

En la literatura consultada, los resultados de ensayo se reportaron a través de gráficos de carga-desplazamiento (Kim et al., 2008; Borg, Baldacchino y Ferrara, 2016; Singh, Shukla y Brown, 2016; Khalid et al., 2017 y Wang, Li y Backer, 1987), expresando los valores numéricos de carga (Attiogbe et al., 2014) o tensión (Ochi, Okubo y Fukui, 2007) y a través de la energía absorbida en el arrancamiento (Oh, Kim y Choi, 2007). En la Fig. 3 se presentan los gráficos de caja de la resistencia y la tensión máxima o de adherencia. Los valores extremos superiores de tensión corresponden a Kim et al. (2008) para sus fibras anulares y onduladas, y a Ochi, Okubo y Fukui (2007) para sus fibras indentadas. Por otra parte, la carga residual es variable y se puede obtener de los gráficos de algunos trabajos.



En la Fig. 4 se grafican curvas típicas para fibras de eje recto de distintas longitudes (Wang, Li y Backer, 1987; Borg, Baldacchino y Ferrara, 2016; Singh, Shukla y Brown, 2016; Khalid et al., 2017; Khalid et al. 2018), eje ondulado o rizado (Kim et al., 2008; Borg, Baldacchino y Ferrara, 2016) y con texturas (Kim et al., 2008; Singh, Shukla y Brown, 2016). Allí se observa que las formas típicas se relacionan con los modos de falla de las fibras y sus parámetros. La rigidez de arrancamiento inicial fue muy similar en todos los casos. Las fibras con textura superficial fueron las más resistentes, mientras que las rizadas tuvieron un incremento seguido de la caída total de la resistencia, probablemente, por la fractura de la fibra en tracción.

En las fibras rectas más cortas se observó una caída tras el pico de resistencia, con un valor residual por fricción, mientras que en las fibras rectas más largas la resistencia se mantuvo en forma más estable luego del pico. Wang, Li y Backer (1987) observaron que las indentaciones de la matriz rallaron la superficie de las fibras rectas, provocando descamación y aumentando la presión lateral y la resistencia por fricción frente a la extracción. Además, encontraron diferencias en la resistencia en función del tipo de plástico utilizado, siendo mayor en el PP que en el nylon.

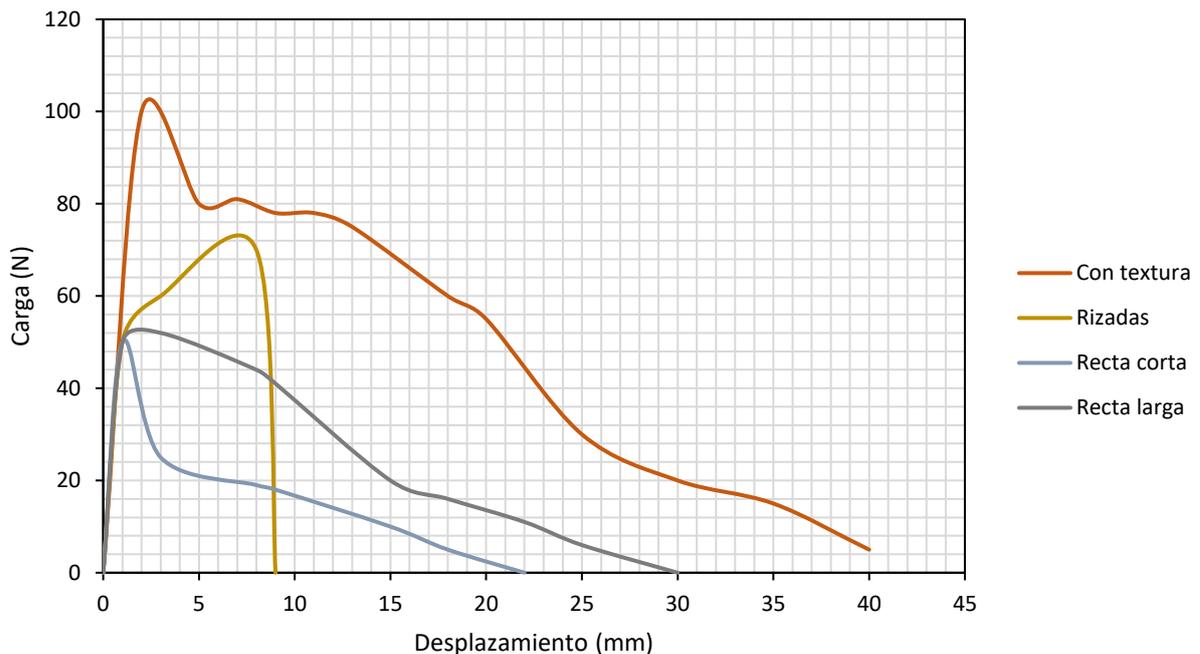
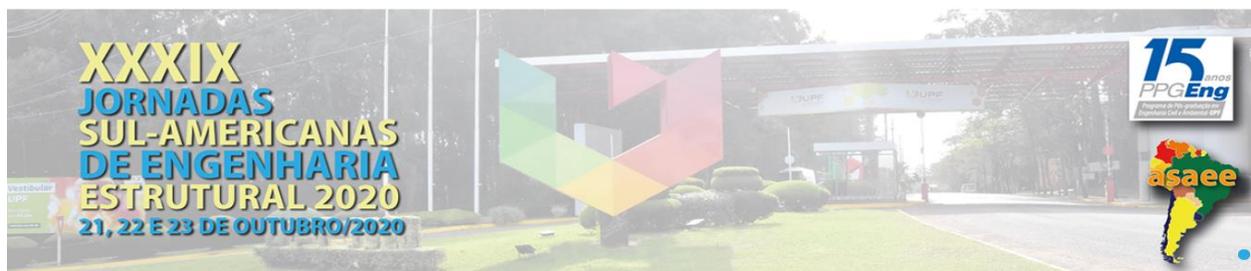


Figura 4. Curvas típicas de carga-desplazamiento

Como señalan Aiello et al. (2009) y Teklal et al. (2018), no hay un solo método para el ensayo de arrancamiento, por lo que distintos investigadores lo ejecutan de diferentes maneras. Los artículos estudiados en este trabajo no usaron normas específicas para el ensayo de arrancamiento. La Fig. 5 presenta las probetas y formas de sujeción implementadas en cada publicación. Se identificó mucha variabilidad en los métodos de ensayo de arrancamiento de fibras. Se usaron probetas cilíndricas (Borg, Baldacchino y Ferrara, 2016; Ochi, Okubo y Fukui, 2007; Singh, Shukla y Brown, 2016), cúbicas (Khalid et al., 2017; Khalid et al., 2018; Attiogbe et al., 2014), prismáticas (Wang, Li y Backer, 1987) y tipo Dumbbell (Kim et al., 2008; Oh et al., 2002; Oh, Kim y Choi, 2007).



Como parámetro de control del ensayo la mayoría de los autores utilizó el desplazamiento. Kim et al. (2008) usaron velocidad de desplazamiento constante de 0,5 mm/min o 0,0083 mm/s, Singh, Shukla y Brown (2004) de 0,2 mm/s, Khalid et al. (2017) de 2,5 mm/min o 0,0417 mm/s, Khalid et al. (2018) de 0,02 mm/s y Wang, Li y Backer (1987) de 12,7 mm/min o 0,2117 mm/s. En cambio, Borg, Baldacchino y Ferrara (2016) controlaron el ensayo por incremento de carga constante de 2 N/s. En otros casos no se informó el método de control.

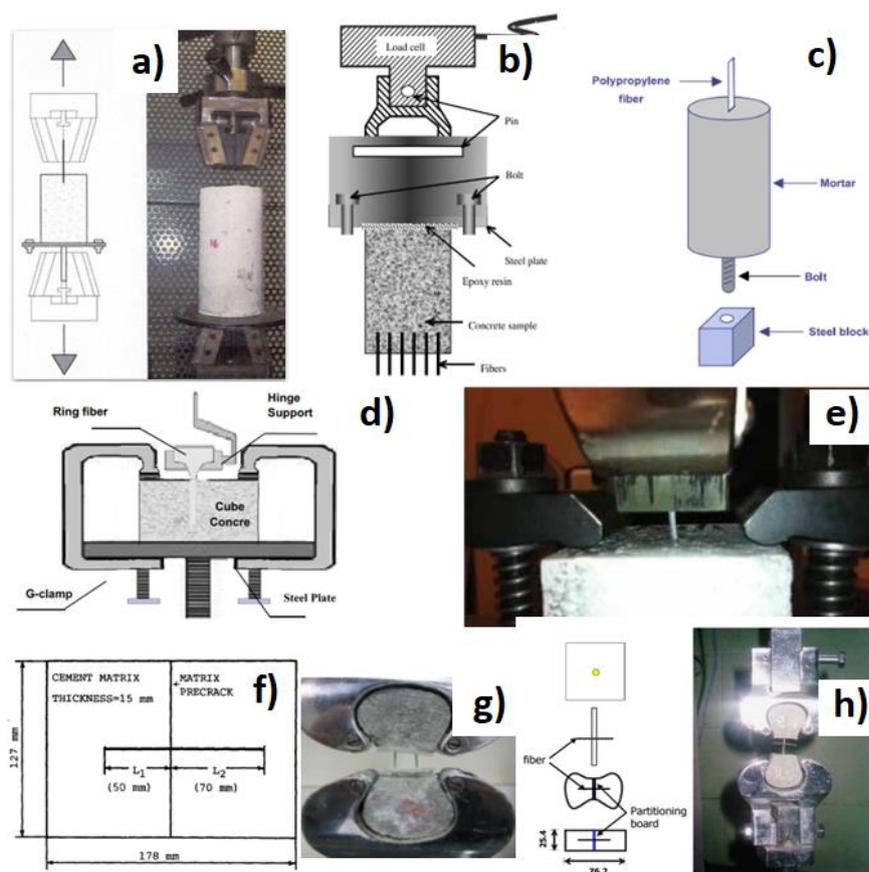


Figura 5. Probetas utilizadas y formas de sujeción para el ensayo de arrancamiento en a) Borg, Baldacchino y Ferrara (2016), b) Ochi, Okubo y Fukui (2007), c) Singh, Shukla y Brown (2016), d) Khalid et al. (2017) y Khalid et al. (2018), e) Attiogbe et al. (2014), f) Wang, Li y Backer (1987), g) Kim et al. (2008), h) Oh et al. (2002) y Oh, Kim y Choi (2007)

Además, se identificaron variados métodos de sujeción. Borg, Baldacchino y Ferrara (2016) y Ochi, Okubo y Fukui (2007) usaron pegamento, mientras que Singh, Shukla y Brown (2016) emplearon empernado. Wang, Li y Backer (1987), Kim et al. (2008), Oh et al. (2002) y Oh, Kim y Choi (2007) amordazaron directamente las probetas, y Khalid et al. (2017), Khalid et al. (2018) y Attiogbe et al. (2014) utilizaron abrazaderas. En Borg, Baldacchino y Ferrara (2016), Ochi, Okubo y Fukui (2007), Singh, Shukla y Brown (2016), Khalid et al. (2017) y Khalid et al. (2018), Attiogbe et al. (2014) se usó amordazamiento directo de la fibra, mientras que en Wang, Li y Backer (1987), Kim et al. (2008), Oh et al. (2002) y Oh, Kim y Choi (2007) la fibra quedó completamente embebida y se materializó una fisura central en el espécimen.



Trabajos futuros podrían estudiar y comparar en forma experimental, analítica y numérica las metodologías existentes, a fin de analizar si la forma de la probeta y el método de sujeción generan diferencias en las tensiones internas de los especímenes. Estas tensiones influirían en el grado de confinamiento de la matriz en torno a la fibra y podrían generar variaciones en la resistencia por fricción. Tal como señalaron Teklal et al. (2018), el ensayo de arrancamiento supone un complejo estado de tensiones, al que se suma la gran cantidad de metodologías en uso.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se estudiaron los antecedentes bibliográficos del ensayo de arrancamiento de fibras plásticas en matrices cementicias. Se realizaron análisis estadísticos y comparaciones de las curvas típicas de carga-desplazamiento para distintos tipos de fibras y sus modos de falla. Además, se compararon las metodologías de ensayo halladas, encontrando diferentes tipos de probetas, métodos de sujeción y parámetros de control. Se concluye que estas variaciones dificultan la comparación directa y la replicabilidad de los experimentos, constituyendo un obstáculo para el avance sostenido en el tema. Como recomendación para trabajos futuros, se sugiere ampliar el reporte de los materiales y de la metodología a emplear.

AGRADECIMIENTOS

A la Agencia I+D+i del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, República Argentina, por el financiamiento otorgado para la ejecución del PICT 2018-01517.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Hilal, N., Mohammed, A. A., y Sherwani, A. F. H. (2021). Use of recycled fibers in concrete composites: A systematic comprehensive review. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108769.
- Aiello, M. A., Leuzzi, F., Centonze, G., y Maffezzoli, A. (2009). Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management*, 29(6), 1960-1970.
- Attigobe, E. K., Schaef, S., Kerobo, C. O., Vojtko, D., y Nmai, C. K. (2014). A new fiber for enhanced crack control. *Concrete International*, 36, 35-39.
- Borg, R. P., Baldacchino, O., y Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29-47.
- Congro, M., Monteiro, V. M. de A., Brandão, A. L. T., dos Santos, B. F., Roehl, D., y Silva, F. de A. (2021). Prediction of the residual flexural strength of fiber reinforced concrete using artificial neural networks. *Construction and Building Materials*, 303, 124502.
- Gu, L., y Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42.
- Isla Calderón, F. A., Luccioni, B. M., Isas Pedraza, D. R., y Sfer, D. (2015). Arrancamiento de fibras de acero de matriz de Hormigón. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, 12(3), 40-65.
- Khalel, H., Khan, M., Starr, A., Khan, K. A., y Muhammad, A. (2021). Performance of engineered fibre reinforced concrete (EFRC) under different load regimes: A review. *Construction and Building Materials*, 306, 124692.



Khalid, F. S., Juki, M. I., Othman, N., y Ibrahim, M. H. W. (2017). Pull-out strength of polyethylene terephthalate bottle fibre in concrete matrix. *Malaysian Construction Research Journal*, 21(1), 75-85.

Khalid, F. S., Irwan, J. M., Ibrahim, M. W., Othman, N., y Shahidan, S. (2018). Splitting tensile and pullout behavior of synthetic wastes as fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 171, 54-64.

Kim, J. H. J., Park, C. G., Lee, S. W., Lee, S. W., y Won, J. P. (2008). Effects of the geometry of recycled PET fiber reinforcement on shrinkage cracking of cement-based composites. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), 442-450.

Liew, K. M., Sojobi, A. O., y Zhang, L. W. (2017). Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, 156, 1063-1095.

Merli, R., Preziosi, M., Acampora, A., Lucchetti, M. C., y Petrucci, E. (2019). Recycled Fibers in Reinforced Concrete: a systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 119207.

Ochi, T., Okubo, S., y Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448-455.

Oh, B. H., Kim, J. C., Park, D. G., y Won, J. P. (2002) Realistic Prediction of Post-Cracking Behaviour in Synthetic Fiber Reinforced Concrete Beams. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 14(6), 900-909.

Oh, B. H., Kim, J. C., y Choi, Y. C. (2007). Fracture behavior of concrete members reinforced with structural synthetic fibers. *Engineering fracture mechanics*, 74(1-2), 243-257.

Ruano, G., Bellomo, F., López, G., Bertuzzi, A., Nallim, L., & Oller, S. (2020). Mechanical behaviour of cementitious composites reinforced with bagasse and hemp fibers. *Construction and Building Materials*, 240, 117856.

Shafei, B., Kazemian, M., Dopko, M., y Najimi, M. (2021). State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 14, 409.

Singh, S., Shukla, A., y Brown, R. (2004). Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. *Cement and concrete research*, 34(10), 1919-1925.

Teklal, F., Djebbar, A., Allaoui, S., Hivet, G., Joliff, Y., y Kacimi, B. (2018). A review of analytical models to describe pull-out behavior–Fiber/matrix adhesion. *Composite Structures*, 201, 791-815.

Wang, Y., Li, V. C., & Backer, S. (1987). Analysis of synthetic fiber pull-out from a cement matrix. *Materials Research Society*, 114(1), 159-165.

Wang, Y., Wu, H. C., y Li, V. C. (2000). Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12(4), 314-319.

Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., y Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibres in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 180–188.

Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107-122.