

Hormigones reforzados con macrofibras poliméricas

R. Zerbino^{a*}

^aConsejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, CP 1900, La Plata, Argentina. zerbino@ing.unlp.edu.ar

Recibido: 7 de junio de 2024

Aceptado: 26 de julio de 2024

RESUMEN

El desarrollo de macrofibras poliméricas representa un notable avance en el uso del hormigón reforzado con fibras. En varias aplicaciones estas fibras pueden competir y ofrecer ventajas con respecto a las fibras de acero. Se ofrecen en el mercado diversas macrofibras poliméricas, pero existen marcadas diferencias entre las mismas no solo en tipo de material, geometría y textura, sino más importante aún, en sus efectos sobre el hormigón fresco y endurecido. Este trabajo aborda esta temática mostrando el criterio actual a utilizar para seleccionar la fibra y dosis adecuadas para una dada aplicación, que se basa en la evaluación de la capacidad residual de un hormigón con fibras. Luego se muestran ensayos de arrancamiento de fibras individuales embebidas en una matriz de mortero indicativos de las diferencias mencionadas. Finalmente se presentan resultados de ensayos de impacto que evidencian otro de los beneficios que pueden brindar las macrofibras poliméricas.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, macrofibras poliméricas, capacidad residual, adherencia fibra-matriz, resistencia al impacto

ABSTRACT

The development of polymeric macrofibers has led to great advances in the use of fiber-reinforced concrete. In several applications these fibers can compete with advantages over steel fibers. However, diverse polymeric macrofibers are offered on the market, and there are marked differences between them not only in type of material, geometry and texture, but more importantly, in their effects on fresh and hardened concrete. This paper addresses this issue by showing the current criteria to be used to select the appropriate fiber and dosage for a given application, which is based on the evaluation of the performance of concrete with fibers. Pull-out tests of individual fibers embedded in a mortar matrix are then shown indicative of the aforementioned differences. Finally, results from impact tests are presented that show another of the benefits that polymeric macrofibers can provide.

KEYWORDS: Fiber reinforced concrete, polymeric macrofibers, residual capacity, fiber-matrix bond, impact strength

*Autor de correspondencia

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Zerbino, R. (2024). Hormigones reforzados con macrofibras poliméricas. *Revista Hormigón*, 66, 5–17. <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s27189058/z7ed5tj9k>

1. Introducción

El desarrollo de macrofibras poliméricas ha representado un notable avance para las aplicaciones del Hormigón Reforzado con Fibras (HRF), el cual se extiende a morteros y otros materiales con cemento portland. Durante las últimas dos décadas surgieron las inicialmente denominadas fibras sintéticas estructurales, hoy conocidas como macrofibras sintéticas, las cuales, además de proveer algunos beneficios en estado fresco, brindan al hormigón capacidad de control de fisuras y, en el caso de que estas se produzcan, la aptitud para transferir esfuerzos y conferir capacidad portante al hormigón endurecido.

Las fibras sintéticas, o poliméricas como se mencionarán en adelante, se destacan por su excelente resistencia a la humedad, a los ácidos y a los álcalis, y se encuentran contempladas por las normas EN 14889-2 [1] y ASTM D7508/D7508M-20 [2]. Según su diámetro se las diferencia entre micro y macrofibras.

Se denominan microfibras a aquellas que poseen diámetros menores a 0,3 mm y, en general, se incorporan en dosis menores al 0,2 % en volumen, siendo las dosis típicas del orden de 0,6 kg/m³; se utilizan para brindar cohesión al hormigón fresco y prevenir la fisuración por contracción plástica, pero no son aptas para conferir capacidad estructural al hormigón endurecido, como reemplazar armaduras para control de la fisuración por efectos térmicos o la debida a la contracción por secado. Las microfibras también se emplean para evitar desprendimientos explosivos en un hormigón expuesto a alta temperatura como, por ejemplo, en el caso de incendios donde resultan más efectivas en hormigones de baja porosidad siendo el contenido recomendado del orden de 2 kg/m³.

Las macrofibras poliméricas, sobre las que se centra este artículo, se incorporan generalmente a razón de 0,2 % a 1 % en volumen, variando las dosis entre 2 y 8 kg/m³ (en casos excepcionales hasta 12 kg/m³),

según la aplicación. Originalmente se empleaban dosis del 0,5 % en volumen, pero se han utilizado en mayor cantidad en especial cuando son combinadas con armadura convencional para, por ejemplo, controlar la fisuración por contracción o contribuir a la resistencia al corte disminuyendo en forma parcial o total las armaduras convencionales. Las macrofibras poliméricas deben proveer capacidad residual al hormigón endurecido, esto es, una vez iniciada la fisura deben ser capaces de contenerla al transferir cargas a través de la superficie de fractura, manteniendo la integridad del elemento estructural. Cabe indicar que si dicha capacidad de transferir cargas en el material compuesto (el HRF) en estado fisurado es mayor a la carga de fisuración puede aumentar la capacidad portante dando lugar a lo que se conoce como comportamiento tipo endurecimiento, y si es menor a aquella las fibras irán progresivamente fallando por adherencia o cortándose dando lugar a lo que se denomina una respuesta tipo ablandamiento, dependiendo esto también del tipo de sollicitación [3].

Las macrofibras poliméricas han demostrado que pueden brindar interesantes ventajas como un menor desgaste de equipos en hormigón proyectado o mejoras en la durabilidad en ambientes agresivos. Estas fibras se utilizan mucho en pisos industriales y pavimentos donde confieren estabilidad y cohesión a las mezclas y beneficios en estado endurecido como un menor alabeo de las losas, reducciones en el espesor e incrementos significativos en el espaciamiento entre juntas en comparación con las losas de hormigón simple. Es interesante notar que también se han empleado para sobrellevar cargas extremas, trabajos recientes [4] consignan una excelente respuesta frente a impactos repetidos de Hormigones Reforzados con Fibras Poliméricas (HRFP). Una preocupación o cuestionamiento que se hacía a las macrofibras poliméricas era si las cargas permanentes (fluencia lenta, creep) podrían dar lugar a una baja en la performance del HRFP en estado fisurado, teniendo en cuenta la deformabilidad de los

filamentos y que podrían ser afectados por la temperatura. Sin embargo, luego de una amplia discusión y años de estudio a nivel internacional se ha concluido que esta situación prácticamente no se da en las condiciones estructurales donde se usan los HRF, que solo en muy contados casos la fluencia en estado fisurado necesita ser tenida en cuenta [5] y, en caso de dudas, existen métodos para valorar la susceptibilidad frente a las cargas permanentes de un HRF estado fisurado [6].

Las macrofibras sintéticas más usuales se obtienen en base a polipropileno estirado, proceso que se hace para incrementar el módulo de elasticidad del filamento, lo que es indispensable para que la fibra confiera luego capacidad estructural. Originalmente se fabricaron fibras tipo monofilamento de sección uniforme, más adelante se desarrollaron procesos de fibrilación y filamentos con secciones variables y texturas apropiadas para mejorar la adherencia. También se han fabricado macrofibras a partir de otros polímeros, las hay de polivinilo alcohol, poliéster y poliolefinas, entre otras; asimismo, además de mejoras en la conformación superficial se exploraron otros caminos como la introducción de nanopartículas en la superficie de las fibras para mejorar la adherencia o el desarrollo de fibras bi-componentes [7-10]. En consecuencia, una singularidad que encuentra un usuario en el caso de las macrofibras poliméricas es la enorme variedad de alternativas. Además de notables diferencias en el material que compone el filamento, varían el aspecto visual, la textura y geometría e, incluso, hay productos que combinan distintas fibras poliméricas. Las diferencias en dimensiones y conformación de la sección, o en las dosis que se pueden incorporar y principalmente en los efectos sobre las propiedades del hormigón fresco y endurecido, pueden ser muy marcadas.

Llegado al punto de la decisión técnico-económica sobre la elección del tipo y dosis de fibras para la aplicación de un HRF se surgen, entonces, varios interrogantes que

han motivado de algún modo la formulación de este artículo, a modo de reflexión. Cuestiones tales como ¿Qué fibras utilizar desde el punto de vista de la performance y diseño, y en qué cantidad? ¿Cómo distinguir lo que brinda una u otra fibra? ¿Cómo analizar la respuesta del HRF que muestra un ensayo normalizado y cuál es el significado de los parámetros calculados como resultados?

2. Elección del tipo y contenido de fibras

La aptitud, la respuesta o performance de una fibra para una dada aplicación, esto incluye el tipo y la dosis de esa fibra, se debe valorar sobre el material compuesto, en este caso el HRF, de este modo se verifican el logro de propiedades adecuadas en estado fresco y la tenacidad y/o capacidad residual deseada en estado endurecido.

Las normas EN 14651 [11] y ASTM C1609 [12], que se basan en la realización de un ensayo de flexión, constituyen las principales alternativas de valoración de la resistencia y tenacidad de un HRF. Ambas permiten obtener parámetros de diseño y, en este sentido, constituyen herramientas para comparar la contribución de distintos tipos y contenidos de fibras. La forma de las curvas carga (o tensión nominal) – deformación (flecha o apertura de fisura) luego de la aparición de la primera fisura es claramente indicativa del aporte realizado por las fibras. En la Figura 1 se aprecian las configuraciones de carga de ambas normas.

El ensayo según la norma EN 14651 [11] se realiza sobre prismas de sección cuadrada de 150 mm de arista, que poseen una entalladura de 25 mm de profundidad en el centro de la cara traccionada, a los que se aplica una carga central sobre una luz entre apoyos igual a 500 mm. Para obtener una respuesta estable durante la aparición de la primera fisura, se utiliza un sistema de control por lazo cerrado de la velocidad de



Figura 1. Ensayos de flexión sobre prismas de HRF, configuración según normas ASTM C1609 (izquierda) y EN 14651 (derecha).

deformación, el cual se puede realizar a través de las medidas de la flecha (δ) o a partir de las correspondientes a la apertura de la boca de fisura (CMOD). La CMOD no está afectada por deformaciones espurias en los apoyos y por eso permite prescindir del marco de carga empleado para medir la flecha, lo que simplifica el ensayo. Como resultados de ensayo se obtienen la tensión de primera fisura (f_L , o límite de proporcionalidad) y cuatro tensiones residuales ($f_{R,i}$) correspondientes a distintos desplazamientos ($\delta_{R,1} = 0,46$ mm o $CMOD_1 = 0,5$ mm, $\delta_{R,2} = 1,31$ mm o $CMOD_2 = 1,5$ mm, $\delta_{R,3} = 2,15$ mm o $CMOD_3 = 2,5$ mm y $\delta_{R,4} = 3,0$ mm o $CMOD_4 = 3,5$ mm). La tensión residual, que implican un grado de rotación, es la tensión en la fibra inferior calculada a partir de la carga que soporta la probeta al alcanzar los citados desplazamientos considerando la sección nominal (como si no existiera fisura). En base a los resultados de esta norma el fib Model Code [6] establece clases de HRF, que son aplicables a fibras de diferentes materiales; se utilizan las tensiones residuales f_{R1} y f_{R3} , las que son representativas del estado límite de servicio y del estado límite último respectivamente.

Es interesante destacar que el concepto de resistencia residual fue adoptado en la norma ASTM C1609 [12], la cual también utiliza prismas de sección cuadrada de 150 mm de lado, pero aplicando cargas en cuatro puntos con una luz entre apoyos de 450 mm.

El ensayo se realiza con control de flecha por lazo cerrado, y a partir de las cargas correspondientes a flechas iguales a 1/600 y 1/150 de la luz de ensayo se calculan las tensiones residuales f_{600} y f_{150} . También se determinan la tensión de primera fisura y, para casos donde se produzca un aumento de la carga por sobre el primer pico, la tensión máxima (f_{max}). A la vez, considerando el área bajo la curva hasta un desplazamiento igual a 3 mm, se puede obtener una resistencia equivalente, similar a la de la norma japonesa JCI-SF4 [13], este parámetro se denomina $R_{T,150}$ y equivale al valor $R_{e,3}$ que algunas guías aplican para el diseño de pisos industriales [14]. La norma ASTM C1609 también admite el uso de prismas de 100 mm x 100 mm de sección ensayados sobre una luz igual a 300 mm.

Sea cual fuere el método elegido, la forma de las curvas carga – flecha (o CMOD) brinda una clara información acerca de las bondades de cada tipo y contenido de fibras. La respuesta típica observada en HRF es un decrecimiento rápido de la carga luego del primero pico, seguida por una capacidad residual relativamente constante para dosis bajas de fibras o un aumento de la carga para mayores contenidos, en ambos casos la capacidad de carga se mantiene hasta grandes desplazamientos. Cuando las fibras poliméricas no son estructuralmente efectivas se produce un rápido descenso en la resistencia post-fisuración. Por el contrario,

incorporando dosis elevadas (mayores a 10 kg/m^3) de algunas macrofibras poliméricas muy eficientes se han incluso observado respuestas tipo endurecimiento. Como muestra de la variabilidad esperable, en la Figura 2 se presentan curvas tensión – flecha

en flexión de varias mezclas elaboradas a partir de un mismo hormigón de base incorporando distintas dosis de tres fibras poliméricas diferentes (A, B, C), en el caso de la fibra C el gráfico también incluye la curva del hormigón sin fibras como referencia [3].

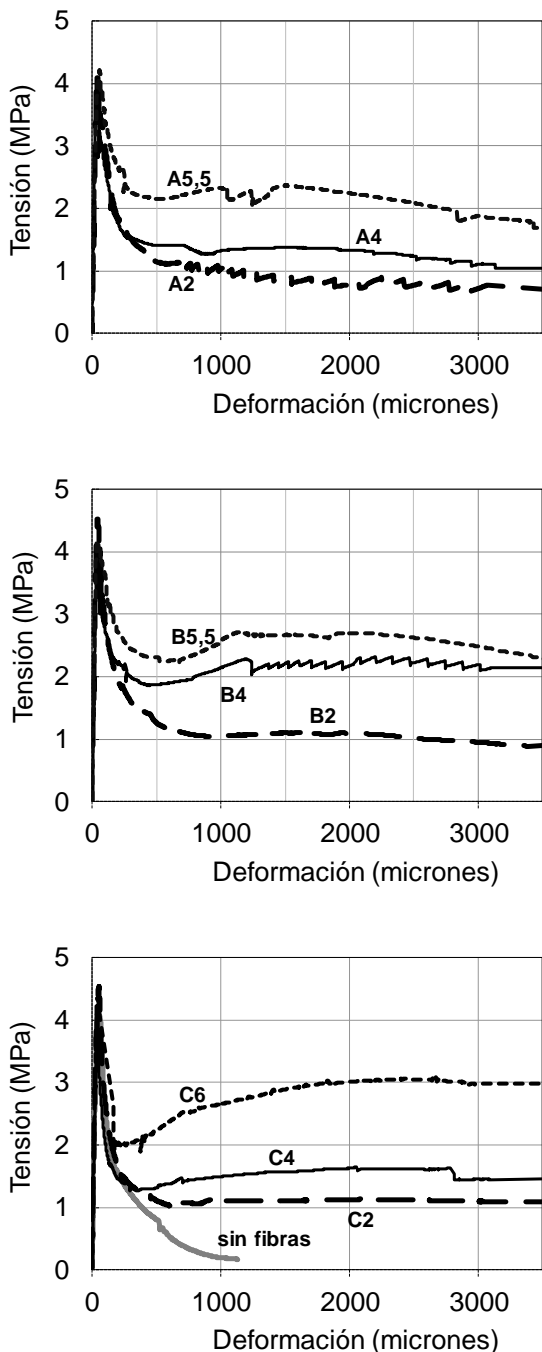


Figura 2. Curvas tensión –flecha en ensayos de flexión, realizados según norma ASTM C1609, sobre HRF que incorporan distintas macrofibras poliméricas (los números indican las dosis kg/m^3).

Los ensayos de flexión son los requeridos para la obtención de los parámetros de diseño, pero es interesante mencionar que para cada tipo de HRF se pueden obtener muy buenas correlaciones con algunos métodos más sencillos como el Barcelona test [15] o el Ensayo Montevideo [16], en este sentido, estos ensayos constituyen herramientas recomendables para implementar el control de calidad en obra. Cabe agregar, no obstante, que en aplicaciones de HRF como estabilizado de rocas y taludes, revestimientos de túneles y otras obras de minería, se prefieren los ensayos sobre paneles al considerar que representan mejor las condiciones de carga; entre ellos se destacan el ensayo sobre paneles redondos con carga en tres puntos que indica la norma ASTM C1550 [17] y el ensayo sobre paneles cuadrados con carga central de la norma BS EN14488-5 [18], en estos casos los criterios de aceptación se basan en medidas de la energía acumulada durante el ensayo considerando el área bajo la curva carga-desplazamiento. De todos modos, cualquiera sea la opción elegida, cabe reiterar el concepto inicial: la performance de una dada fibra se debe valorar a partir de la respuesta observada en el hormigón.

3. Sobre la adherencia fibra – matriz

La adherencia fibra - matriz es el principal mecanismo de transferencia de cargas a través de una fisura. Las fibras en sí mismas, los filamentos, pueden ser muy distintas entre sí, cuando se las fabrica se optimiza su geometría considerando la aplicación, el tamaño de agregado y los niveles de resistencia de las matrices en las cuales van a estar embebidas. Aunque permitan comparar las respuestas de los filamentos, los

ensayos de arrancamiento no son suficientes para definir en forma absoluta la performance del HRFP.

Para dar una magnitud de la importancia de la adherencia, cabe mencionar que se han desarrollado modelos del comportamiento del HRF en base a las medidas obtenidas en ensayos de adherencia fibra – matriz, a partir de los mismo se puede apreciar, por ejemplo, la influencia de la orientación de las fibras en la tenacidad del HRF [19]. Otro elemento a considerar es que, tanto para las fibras poliméricas como para las elaboradas a partir de otros materiales, la performance puede variar conforme el tipo de matriz. Por ejemplo, la capacidad residual observada en un hormigón con resistencia a compresión entre 20 MPa y 50 MPa, puede cambiar si las mismas fibras se incorporan en matrices de alta (60 MPa a 100 MPa) o muy alta resistencia (>100 MPa). De hecho, hay fibras especialmente formuladas para matrices de alta resistencia. Las macrofibras poliméricas han mostrado menor variación de la adherencia al crecer la resistencia de la matriz que la observada con otras fibras [20, 21] De igual modo, no son iguales las fibras destinadas a un hormigón proyectado donde los áridos son pequeños que las que se emplean en pavimentos o en la fabricación de segmentos premoldeados para túneles.

En el estudio citado [20] donde, ante la variedad de macrofibras poliméricas, se evaluó la adherencia fibra – matriz mediante un ensayo de arrancamiento a fin de compararlas, se observó que pueden obtenerse respuestas muy diferentes. Mientras algunas fibras tendían a cortarse al llegar a la carga pico, otras se arrancaban en forma progresiva de la matriz. Se puede asumir como ideal que cuando media fibra esta embebida en el mortero, el filamento comience a deslizar o a cortarse más o menos en forma simultánea ante la aplicación de un esfuerzo de tracción. La Figura 3 muestra respuestas típicas observadas en cinco macrofibras poliméricas comerciales de amplio uso; las macrofibras M1 y M5 tuvieron

una resistencia al arrancamiento notablemente menor y luego de un corto período de incremento de carga las curvas se tornaron prácticamente horizontales, estas fibras tenían comparativamente superficies más lisas y menor rigidez; en el caso de M2, un filamento de sección irregular y con relieve superficial, la capacidad de carga fue mayor y tuvo un post-pico con oscilaciones durante el descenso de la carga; por último las macrofibras M3 y M4 alcanzaron las mayores cargas de arrancamiento pero se observó un descenso abrupto luego del valor máximo indicando que el nivel de tensión estaba próximo a la rotura de la fibra. No obstante, si bien con este ensayo se podrían comparar fibras fabricadas con materiales y geometrías relativamente similares, apreciar efectos de las condiciones de extrusión, o cambios en la textura y forma, la respuesta al arrancamiento de fibras aisladas no permite asegurar que una fibra resulte mejor que otra. Las fibras pueden modificar en distinta medida la trabajabilidad del hormigón fresco o tener diferencias en la facilidad de dispersión dentro del hormigón, aspecto que pueden limitar las dosis a incorporar. Para comparar las bondades de distintas fibras hay que elaborar el HRF y evaluar su capacidad residual en estado endurecido como se indicara en el apartado anterior. Como ejemplo, la Figura 3 incluye curvas tensión – apertura de fisura (EN 14651) de tres HRFP que incorporan la misma dosis de M2, M4 o M5, a pesar de que esas fibras habían presentado notables diferencias en las curvas carga-arrancamiento; no se observan mayores cambios en la resistencia residual. Las fotos muestran los extremos de las fibras M2, M4 y M5 en su estado original y luego del ensayo de arrancamiento, evidenciando la deformación del filamento producto del proceso de arrancamiento.

4. Sobre la respuesta de HRFP frente a distintos tipos de cargas

La respuesta en estado fresco y endurecido de un hormigón puede variar notablemente al

incorporar diferentes macrofibras poliméricas. El usuario debe tener en cuenta esto al momento de la elección. La capacidad residual del HRF también varía substancialmente con el tipo de sollicitación siendo las fibras especialmente beneficiosas a medida que aumenta el grado de redundancia estructural del elemento a construir. Muchas macrofibras poliméricas han demostrado una excelente capacidad para sobrellevar sollicitaciones de impacto.

Entre las aplicaciones relevantes del HRF se destaca la construcción de losas sobre suelo, ya que el aporte de las fibras crece a medida que aumenta el grado de redundancia estructural de los elementos [3]. Por tal motivo un HRF que posee una respuesta tipo ablandamiento (descenso de la capacidad residual después de la primera fisura) en tracción directa puede tener una respuesta con endurecimiento (aumento de la capacidad residual luego del primer pico) en flexión, así como un HRF con respuesta tipo ablandamiento en flexión puede tener una respuesta con endurecimiento en ensayos de paneles o losas. Esto, que, por supuesto depende del tipo de fibra y del nivel de resistencia, también se verifica en HRF.

Si bien la caracterización del HRF se basa en la mayoría de los casos en la determinación de parámetros a partir de ensayos de flexión, en general en prismas, el tipo de sollicitación a la que está expuesto un elemento estructural implica mayores o menores beneficios en el empleo de HRF. Solo a modo de ejemplo, las fibras resultan altamente eficientes para sobrellevar esfuerzos de corte y por ello una de las principales aplicaciones del HRF combinado con armadura convencional es la sustitución total o parcial de la armadura de corte.

Los desarrollos sobre uso de HRF a fines del siglo XX se realizaron principalmente utilizando fibras de acero, el empleo de macrofibras poliméricas data de las últimas décadas. A la vez, la mayoría de las aplicaciones que dieron lugar a los criterios de cálculo de HRF han estado relacionados con

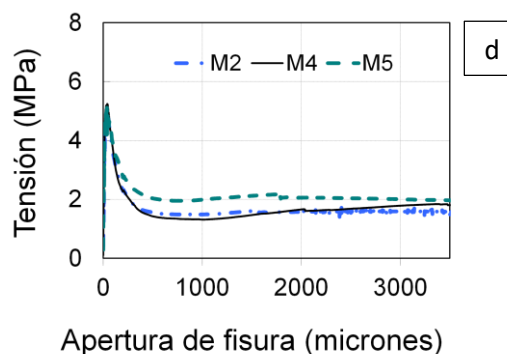
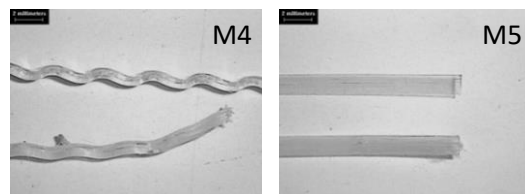
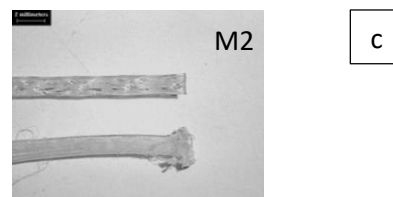
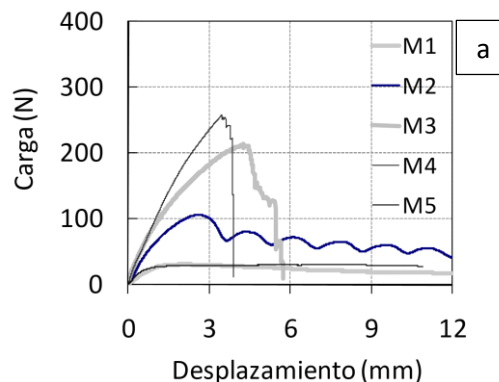


Figura 3. a y b: Ensayos de arrancamiento de macrofibras sintéticas embebidas en una misma matriz. c: Vista de las fibras en su estado original y luego del ensayo de arrancamiento. d: Curvas tensión apertura de fisura de HRF M2, M4 y M5 incorporadas en igual dosis.

cargas estáticas y, aunque no existen dudas que una de las principales ventajas del HRF es el aumento en tenacidad y que el material ha demostrado excelentes respuestas frente a impactos o explosiones, los criterios de diseño ante estas complejas sollicitaciones son de tipo empírico. En este apartado se presentan resultados de varios estudios sobre HRF que demuestran que pueden existir notables diferencias en las respuestas para distintas macrofibras poliméricas, tanto bajo sollicitaciones estáticas como de impacto, y permiten observar las excelentes respuestas de algunos HRF frente a estas últimas.

Para evaluar la resistencia al impacto se utilizó el Ensayo de Impactos Crecientes (GIL test), desarrollado en el LEMIT, que consiste en la caída libre de un proyectil al centro de un prisma de 150 mm x 150 mm x 300 mm, que posee una entalla de 25 mm de profundidad en el centro de la cara traccionada, siendo la luz entre apoyos de 240 mm. El ensayo consta de dos fases, en la primera se calcula la energía acumulada hasta la aparición de la primera fisura (E_C) y en la segunda se valora la velocidad de crecimiento de la fisura (V_C) y la energía acumulada durante su propagación para obtener, adicionada a E_C , la energía total (E_T), finalizando el ensayo cuando el ancho de fisura (COD) resulta mayor o igual a 3 mm. Mayores detalles de la metodología, incluyendo la forma de aplicación de las

cargas y de medición del crecimiento de fisura aparecen en [22].

Se realizaron HRF con siete fibras distintas, todas ellas comercializadas, variando su longitud (entre 48 mm y 54 mm), su textura superficial y la forma de su sección. Las mezclas se identifican como Pn-x donde n indica la dosis incorporada (en kg/m^3) y x la fibra (a, b, c, d, e, f, g). La Figura 4 muestra para cada HRF las curvas tensión – CMOD en flexión siguiendo la norma EN14651 y las curvas energía acumulada – ancho de fisura obtenidas mediante el GIL test. La Tabla 1 incluye los valores medios de resistencia a compresión (f_c), tensión de primera fisura (f_L) y tensiones residuales (f_{R1} y f_{R3}) en flexión y las relaciones entre dichos parámetros, junto con la energía de fisuración, la velocidad de crecimiento de fisura y la energía total resultantes del ensayo de impacto.

Del análisis de la tabla y de las curvas de la Figura 4 surge con claridad la enorme variabilidad en la respuesta de distintos HRF incluso para niveles de resistencia y contenidos de fibras del mismo orden. Pero, además, es importante notar que la performance que se infiere del comportamiento bajo cargas estáticas puede ser bastante diferente a la obtenida bajo cargas de impacto; esto puede extenderse a otras sollicitaciones dinámicas en especial si se recuerda que una de las principales

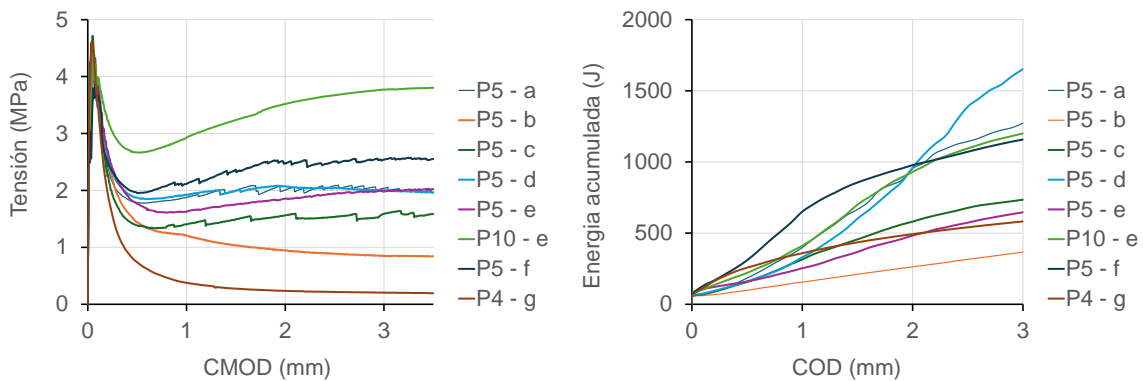


Figura 4. Curvas tensión – apertura de la boca fisura (CMOD) en ensayos de flexión (izquierda) y energía acumulada – ancho de fisura (COD) bajo impactos repetidos.

Tabla 1. Resultados de ensayos estáticos y de impactos repetidos sobre HRFP.

Fibras	Compresión		Flexión (EN 14651)		f_{R1}/f_L	f_{R3}/f_{R1}	f_L/f_c	Impactos repetidos (GIL)		
	f_c (MPa)	f_L (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R3} (MPa)				E_c (J)	E_T (J)	V_c (mm/J)
P5-a	45,5	4,18	1,78	2,08	0,43	1,17	0,09	78	1304	2
P5-b	45,0	4,61	1,44	0,89	0,31	0,62	0,10	70	379	10
P5-c	48,0	4,85	1,38	1,53	0,28	1,11	0,10	74	756	4
P5-d	46,0	4,27	1,87	2,05	0,44	1,10	0,09	77	1680	2
P5-e	47,3	4,50	1,80	1,90	0,40	1,06	0,10	95	684	5
P10-e	46,3	4,40	2,70	3,80	0,61	1,41	0,10	102	1285	2
P5-f	50,0	5,09	1,96	2,50	0,39	1,28	0,10	110	1217	8
P4-g	55,7	4,81	0,74	0,22	0,15	0,30	0,09	75	114	127

ventajas que confieren las fibras al hormigón es el aumento de su capacidad para sobrellevar acciones extremas. Por lo expuesto es de interés realizar a continuación un breve análisis de la relación entre los parámetros calculados a partir de los ensayos estáticos y de los de impacto.

La Tabla 1 muestra que no existen mayores cambios en la relación entre las resistencias a flexión y a compresión de los distintos HRFP, esto es, la misma depende fundamentalmente de las características de la matriz (y por supuesto del tipo de ensayo).

En la Figura 5 se representa la variación de la Energía de fisuración (E_c) y de la Energía total (E_T) con la resistencia a flexión y compresión; las mezclas se agrupan en función del contenido de fibras. Se observa que mientras el tipo y dosis de fibra polimérica no provoca mayores cambios en la E_c , E_T puede variar notablemente durante la aplicación de los impactos. Si ahora se representan los resultados de impacto en función de las resistencias residuales obtenidas en el ensayo de flexión, parámetros que se emplean habitualmente para el diseño estructural, el panorama es bastante similar, para distintas fibras hay poca influencia en E_c y grandes variaciones E_T y se percibe además

una ligera tendencia a crecer E_T a medida que crecen las resistencias residuales.

La tendencia es un poco más notoria al representar la velocidad de crecimiento de la fisura (V_c) en función de las tensiones residuales tal como surge de la Figura 6. Resulta muy interesante observar al graficar entre si los parámetros de impacto que se vinculan con el crecimiento de la fisura durante el periodo post- fisuración, una buena correlación entre E_c y V_c , Además, quizás más importante aún desde el punto de vista del desarrollo de criterios de diseño frente a impactos, es que la relación f_{R3}/f_{R1} empleada en el *fib* Model Code 2010 para clasificar HRF a partir de su performance, se vincula directa y sensiblemente con dichos parámetros de impacto. En este sentido, si bien resultan notorias las diferencias que pueden existir entre diversos HRFP, aparece una herramienta útil para estimar la respuesta al impacto que se vincula con parámetros obtenidos durante la caracterización estática. Es fácil justificar que al crecer la relación f_{R3}/f_{R1} el material muestre mayor capacidad para limitar la velocidad de crecimiento del daño ocasionado por los impactos. Será recomendable verificar si tal vinculación varía entre matrices con distinta resistencia o tamaño de agregados.

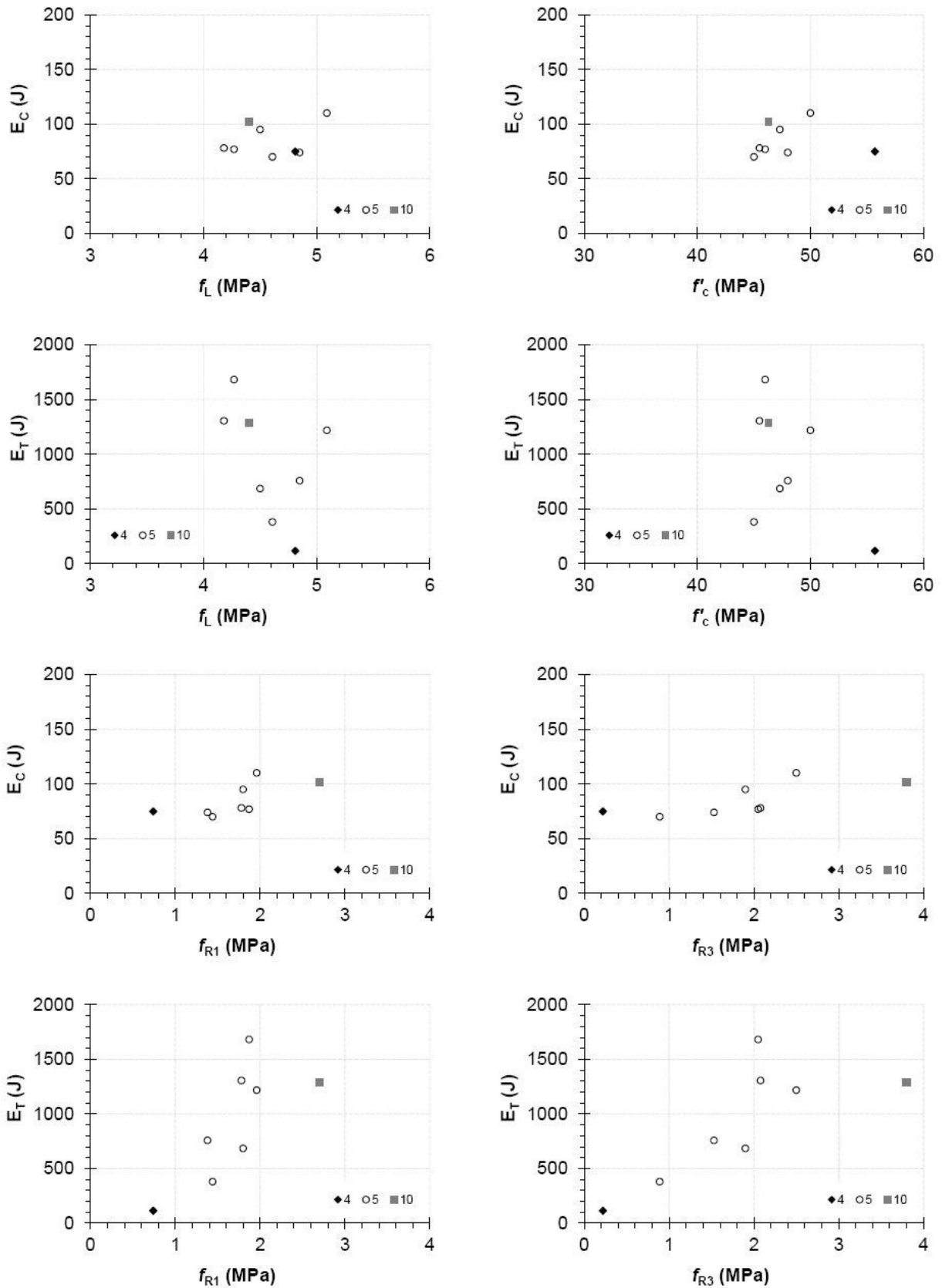


Figura 5. Variación de la energía de fisuración y de la energía total medidas en ensayos de impacto en función de la resistencia a compresión (f'_c), la tensión de primera fisura (f_L) y las tensiones residuales f_{R1} y f_{R3} .

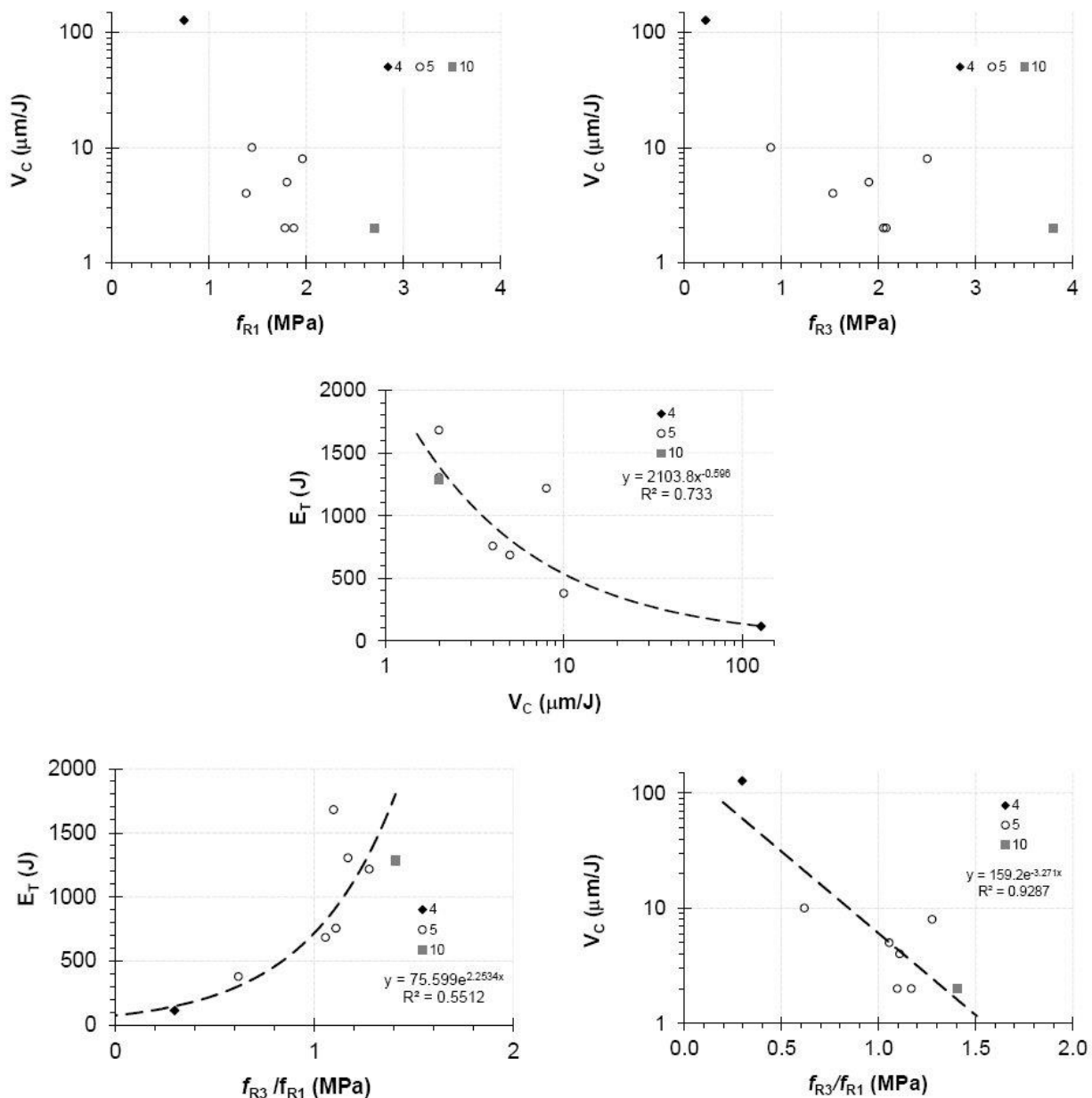


Figura 6. Variación de la velocidad de crecimiento de fisura (V_c) ante impactos repetidos en función de las tensiones residuales f_{R1} y f_{R3} , medidas en ensayos de flexión estática.

5. Consideraciones finales

Este trabajo busca favorecer un mejor y mayor uso del Hormigón Reforzado con Fibras Poliméricas (HRFP), en la convicción que representa un importante avance para la industria de la construcción. Su empleo en aplicaciones como losas sobre suelo, revestimientos de túneles, estabilizado de rocas, entre otras, contribuye a la realización de obras más sustentables. Fue motivado por

frecuentes consultas y dudas que aparecen al momento de evaluar la alternativa de uso de estas fibras ante las numerosas variantes disponibles. Aunque seguramente quede mucho por agregar, se puntualizan a modo de consideraciones finales los siguientes conceptos:

La elección del tipo y dosis de fibra no se puede realizar considerando únicamente las características del filamento (fibra individual)

sino que es indispensable valorar la respuesta del compuesto (HRFP), tanto en estado fresco como endurecido. En este último caso se realiza principalmente bajo solicitaciones de flexión, existiendo diversos métodos a tal efecto, a partir de los cuales se suelen obtener resistencias residuales que cuantifican la contribución de las fibras en estado fisurado. La mezcla debe tener en términos generales, no estrictamente, características similares a las previstas para la aplicación a realizar, principalmente en lo relacionado con el nivel de resistencia y el tamaño máximo de agregado.

El principal mecanismo de falla de las fibras se vincula con su adherencia a la matriz de mortero y se puede visualizar en ensayos de arrancamiento. No obstante, si bien estos ensayos pueden permitir valorar algunos aspectos entre fibras similares, no pueden extrapolarse al HRFP.

La contribución de las fibras depende marcadamente del tipo de solicitación, incluso para cargas estáticas, la capacidad residual varía notoriamente entre ensayos de tracción directa, flexión en vigas o en diferentes configuraciones de cargas en losas, siendo mayor la efectividad de las fibras cuanto mayor grado de redundancia estructural poseen los elementos a construir.

Las fibras contribuyen en gran medida a la resistencia frente a impactos y otros tipos de cargas extremas. Sus beneficios dependen principalmente del tipo de fibras utilizadas, pero también varían conforme el nivel de resistencia y la forma y tamaño del agregado grueso empleado. En ocasiones se verificaron mejoras muy notorias utilizando HRFP, en especial para grandes aperturas de fisura.

No es de esperar que existan relaciones directas entre los resultados de ensayos de resistencia estática y los de impacto. La resistencia a primera fisura no depende substancialmente de la capacidad residual del HRF; tampoco se encontraron claras vinculaciones con los parámetros post-

fisuración. No obstante, y a pesar de las grandes diferencias entre los HRFP estudiados, se observó que existe una fuerte correlación entre la velocidad de crecimiento de fisuras o la energía total acumulada durante el ensayo de impacto, y la relación de resistencias residuales f_{R3}/f_{R1} obtenidas en flexión estática, más allá de la fibra y dosis incorporada.

Fuentes de financiamiento

Este trabajo contó con la financiación del proyecto PIP112-20150100139 del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Contribución de autoría

R. Zerbino: conceptualización, redacción-revisión-edición.

Declaración de conflictos de interés

El autor declara que no existe algún conflicto de interés.

Referencias

- [1] British Standards. (2006). *BS EN 14889-2. Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definitions, specifications and conformity.*
- [2] American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM D7508/D7508M-20. Standard specification for polyolefin chopped strands for use in concrete.*
- [3] Zerbino, R. (2022). *Hormigón reforzado con fibras* (2da ed.). Ed. AATH, Serie Hormigones Especiales.
- [4] Vivas, J. C., Zerbino, R., Torrijos, M. C., y Giaccio, G. (2020). Effect of the fibre type on concrete impact resistance, *Constr. Build. Mater.*, 264, 120–200. <https://doi.org/gmth>
- [5] Llano-Torre, A., y Serna, P. (Eds.). (2021). *Round-Robin test on creep behaviour in cracked sections of FRC: Experimental*

- program, results and database analysis - State-of-the-art report of the RILEM TC 261-CCF*. Springer.
- [6] Féd Int du Béton. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn.
- [7] Kaufmann, J., Lubben, J., y Schwitter, E. (2007). Mechanical reinforcement of concrete with bi-component fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(9), 1975–1984. <https://doi.org/cwts9r>
- [8] Boshoff, W. P., Mechtcherine, V., y van Zijl, G. P. A. G. (2009). Characterising the time-dependant behaviour on the single fibre level of SHCC: Part 1: Mechanism of fibre pull-out creep. *Cement and Concrete Research*, 39(9), 779–786. <https://doi.org/b284fx>
- [9] Tagnit-Hamou, A., Vanhove, Y., y Petrov, N. (2005). Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 364–370. <https://doi.org/cww82r>
- [10] Rathod, J. D., y Patodi, S. C. (2010). Interface tailoring of polyester-type fiber in engineered cementitious composite matrix against pullout. *ACI Materials Journal*, 107(2), 114–122. <https://doi.org/m98j>
- [11] Technical Committee CEN/TC 229 (2005). *EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) Method*.
- [12] American Society for Testing and Materials. (2010). *ASTM C1609/C1609M Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading)*.
- [13] Japan Society of Civil Engineers (1984). III-2. Method of tests for steel fiber reinforced concrete (JSCE-SF1 a JSCE-SF4). En: *Concrete Library International*, N° 3 (pp. 45-61). Japan Society of Civil Engineers.
- [14] Pombo, R., y Zerbino, R. (2022). *Hormigón para pisos industriales* (1ra ed.). Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- [15] Carmona, S., Aguado, A., y Molins, C. (2013). Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test. *Construction and Building Materials*, 48, 592–600. <https://doi.org/m98k>
- [16] Segura-Castillo, L., Monte, R., Galobardes, I., y de Figueiredo, A. D. (2024). Determination of tensile residual strength of fibre reinforced concrete by a robust and simple test. *Materials and Structures*, 57, 112. <https://doi.org/m98m>
- [17] American Society for Testing and Materials. (2012). *ASTM C 1550 Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete (using centrally loaded round panel)*.
- [18] BS EN14488-5:2006 (2006) Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens.
- [19] British Standards. (2006). *BS EN 14488-5 Testing sprayed concrete. Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens*.
- [20] Luccioni, B., Ruano, G., Isla, F., Zerbino, R., y Giaccio, G. (2012). A simple approach to model SFRC. *Construction and Building Materials*, 37, 111–124.
- [21] Bossio, M. E., Giaccio, G., Torrijos, M. C., y Zerbino, R. (2012). Evaluación de la resistencia al arrancamiento de macrofibras sintéticas. En J. D. Sota, N. F. Ortega, y J. M. Moro (Eds.), *V Congreso Internacional y 19ª Reunión Técnica "Ing. Oscar R. Batic" de la AATH* (487–494). Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- [22] Sandbakk, S., Døssland, A. L., y Kanstad, T. (2007). Pull-out testing of different fibre types. En Nordic Concrete Federation (Ed.), *Workshop proceeding no. 6: Fibre Reinforced Concrete* (pp. 23–32). Nordic Concrete Federation.
- [23] Vivas, J. C., Zerbino, R., Torrijos, M. C., y Giaccio, G. (2021). A test procedure for evaluating the impact behaviour of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 54, 208. <https://doi.org/m98n>