

Comportamiento en fractura del hormigón reforzado con fibras de poliolefina sometido a elevada temperatura

Pablo Mazón^a, Álvaro Picazo^b, Alejandro Enfedaque^c, Jaime C. Gálvez^{*,d}, Marcos G. Alberti^e.

^a Ingeniero Mecánico. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Doctorando. pablo.mazon.ortiz@upm.es

^b Doctor. Departamento de Tecnología de la Edificación. E.T.S. de Edificación, Universidad Politécnica de Madrid. Profesor titular de universidad. a.picazo@upm.es

^c Doctor. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Catedrático de universidad. alejandro.enfedaque@upm.es

^d Doctor. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Catedrático de universidad. jaime.galvez@upm.es

^e Doctor. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S. de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. Profesor titular de universidad. marcos.garcia@upm.es

RESUMEN

Esta investigación se ha centrado en analizar el comportamiento en fractura en flexión del (HRFP) a temperaturas de 20, 165 y 200°C. Para llevar a cabo este estudio se diseñó un aislamiento térmico de las probetas que minimizase la pérdida de temperatura durante los ensayos. Una vez finalizados los ensayos, se llevó a cabo un minucioso análisis de las superficies de fractura que incluyó un análisis de la distribución de las fibras que probó que las fibras de poliolefina reducen el riesgo de desconchado del hormigón y que, a medida que aumenta la temperatura, la capacidad portante residual del HRFP se ve reducida hasta alcanzar un comportamiento análogo al del hormigón en masa ensayado a la misma temperatura.

ABSTRACT

This research has focused on analyzing the flexural behavior of polyolefin fiber reinforced concrete (HRFP) at temperatures of 20, 165, and 200°C. To conduct this study, it was necessary to design a test with thermal insulation of the specimens, minimizing heat loss during the tests. Once the tests were completed, and after a thorough analysis of the fracture surfaces, the results obtained showed that the polyolefin fibers reduce the risk of spalling of the concrete and that, as the temperature increases, the residual load-bearing capacity of the HRFP is affected until it reaches a similarity with the behavior of unreinforced concrete at the maximum temperature studied.

PALABRAS CLAVE: Alta temperatura, fractura, fibras de poliolefina, hormigón reforzado con fibras.

KEYWORDS: high temperature, flexural fracture, polyolefin fibers, fiber-reinforced concrete.

1. Introducción

El hormigón, material de construcción por excelencia, ha evolucionado considerablemente

en los últimos años [1]. La elección del tipo de hormigón, entre una amplia gama de opciones,

se determina por factores como la estructura a construir, el presupuesto, la durabilidad y el ciclo de vida [2]. Innovaciones como el hormigón autocompactante y el reforzado con fibras han revolucionado el diseño estructural [3,4].

Una de las principales ventajas del hormigón en la construcción es su excelente comportamiento ante el fuego, superando a materiales como el acero y la madera. Los avances en este campo, impulsados por la industria nuclear en los años 70, han permitido un mejor entendimiento de su comportamiento a altas temperaturas. [5–7]. La baja resistencia a tracción del hormigón hace indispensable su refuerzo con acero. Sin embargo, el comportamiento de ambos materiales puede verse afectado por las altas temperaturas, lo que exige un diseño estructural detallado que considere la interacción entre ambos elementos y garantice la seguridad de la construcción. [8].

El aumento de temperatura dentro del hormigón genera una presión interna significativa debido a la evaporación del agua, la deshidratación y los gradientes térmicos. Esta presión puede provocar el fenómeno conocido como 'spalling', que se manifiesta en la fragmentación y desprendimiento del hormigón[8,9].

Dentro de los tipos de hormigones disponibles en la actualidad la normativa [10] contempla el uso de hormigones reforzados con fibras (HRF) que se caracterizan por la inclusión de fibras cortas y dispersas en su masa, lo que les confiere una mayor resistencia a tracción y flexión, propiedades fundamentales en la el comportamiento estructural.

La fabricación de hormigones reforzados con fibras (HRF) considera la posibilidad de añadir fibras de muy diferentes tipos, entre las que destacan las de acero, poliolefinas y vidrio resistentes a los álcalis cada una aportando propiedades específicas al material [11].

La incorporación de fibras estructurales al hormigón aumenta su capacidad de deformación, reduce la propagación de fisuras y

mejora su comportamiento ante cargas cíclicas. Sin embargo, la influencia de las altas temperaturas aún presentan interrogantes que requieren ser estudiados. [12,13].

El uso de macro fibras poliméricas es cada vez más común por sus buenas propiedades mecánicas y los tratamientos superficiales que mejoran la adherencia, potenciando así los mecanismos de absorción de energía en el material compuesto. Estos aspectos permiten obtener resultados análogos a los mostrados por las fibras de acero y, además, tienen la ventaja de ser químicamente estables en una gran variedad de entornos y multitud de sustancias agresivas [5,12].

Los estudios han demostrado que las fibras de poliolefina alcanzan las resistencias requeridas para reemplazar, parcial o totalmente, al acero de refuerzo en elementos estructurales, ofreciendo así una solución innovadora en el diseño de estructuras [4, 8, 11].

A continuación se presenta una investigación experimental sobre el comportamiento en fractura a flexotracción de un hormigón autocompactante con fibras de poliolefina sometido a elevadas temperaturas.

2. Campaña experimental

Se llevó a cabo una campaña experimental en la que se empleó un hormigón autocompactante con un contenido de fibra de poliolefina de 10 kg/m³. Tras realizar ensayos en estado fresco y caracterización mecánica, se procedió a evaluar el comportamiento en fractura a flexión del material a diferentes temperaturas, hasta alcanzar los 200°C, siguiendo la normativa UNE EN: 14651:2007. [14].

2.1 Dosificación y caracterización en estado fresco

El hormigón que se utilizó en la presente campaña experimental, denominado P10, es el mismo desarrollado y utilizado en [11] con 3

modificaciones, el superplastificante de alto rendimiento Sika Viscocrete – 20 HE, la dosificación y tipo de fibras de poliolefina. En la Tabla 1 se pueden observar las características de las fibras empleadas.

Tabla 1: Propiedades de SikaFiber® Force-48.

Propiedades	Valor
Densidad (kg/cm ³)	0.901
Diámetro equivalente (mm)	0.84
Longitud (mm)	48
Punto de fusión (°C)	164
Resistencia a tracción (MPa)	465
Módulo de Elasticidad (GPa)	7.5

En la Tabla 2 se presenta la dosificación utilizada [15]. Las probetas fueron hormigonadas a temperatura de laboratorio, empleando una hormigonera de eje vertical de 100 litros de capacidad.

Tabla 2: Dosificación de hormigón P10 por m³.

Agua (kg/m ³)	187.5
Cemento (kg/m ³)	375.0
Filler calizo (kg/m ³)	200.0
Arena (kg/m ³)	918.0
Grava (kg/m ³)	367.0
Gravilla (kg/m ³)	245.0
Fibra de poliolefina(kg/m ³)	10.0
Superplastificante (1,35% w.c.)	5.1
Relación (a/c)	0.5

Para caracterizar el hormigón en estado fresco se realizó un ensayo de escurrimiento según lo establecido en la norma UNE-EN: 12350-8 [16] los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados de hormigón estado fresco.

Parámetro medido	P10
T_{50} (s)	6
df (mm)	590

A pesar de la incorporación de 10 kg/m³ de fibras de poliolefina los resultados obtenidos cumplen con los requisitos de autocompactibilidad que se mencionan en [16]. La Figura 1 muestra una distribución homogénea de las fibras y una forma casi circular

de la torta, características típicas de un hormigón autocompactante.



Figura 1: Aspecto visual de ensayo escurrimiento P10.

Se fabricaron probetas cilíndricas de 300mm de alto y 150mm de diámetro para caracterizar las propiedades mecánicas del material. Se hormigonaron probetas prismáticas de (150x150x600) mm. Con el fin de registrar la temperatura interna del hormigón durante el proceso de curado, se embebió un termopar tipo K a una profundidad de 115 mm en cada probeta, cuya ubicación se detalla en la Figura 2.

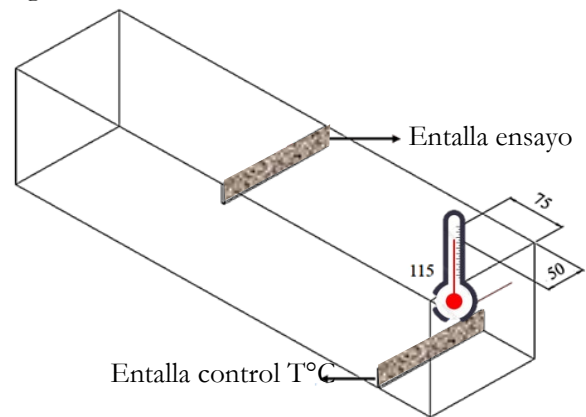


Figura 2: Posición de termopar en probeta (600x150x150) m³.

A las 24 del hormigonado se desmoldaron las probetas y fueron trasladadas a una cámara de curado donde se mantuvieron en condiciones de temperatura y humedad relativa controlada ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $>95\%$ HR, respectivamente).

2.2 Caracterización de las propiedades mecánicas

Con las probetas cilíndricas se determinó la resistencia a compresión a 28 días siguiendo la norma UNE- EN 12390-3[17], dando como resultado 61.44 (0.01) MPa .Las resistencias a compresión son muy similares, indicando una baja dispersión de los resultados.

2.3 Metodología de los ensayos a altas temperaturas.

Los ensayos de fractura a flexotracción [14] para probetas prismáticas (150x150x600) mm³ tienen habitualmente una duración aproximada de una hora cuando se realizan en hormigones reforzados con fibras que poseen capacidad estructural. Debido a esto, hay que minimizar la pérdida de calor por convección durante el ensayo.

Para el calentamiento de las probetas, se empleó un horno de mufla Hobersal XB7/115, capaz de alcanzar temperaturas de hasta 1150°C, mediante el software iTools, se programó un perfil de calentamiento específico para cada ensayo. Un termopar conectado a un equipo de adquisición de datos HBM, y utilizando el software Catman Easy, permitió registrar la temperatura de las probetas en todo momento. Se probaron diferentes sistemas para el control de la pérdida de temperatura.

Tabla 4: Resultados ensayos de enfriamiento

°C	Tiempo de enfriamiento (min)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
220	6	11	8	12	4	21	26
210	13	25	14	23	37	39	42
200	19	35	20	31	59	58	57
190	25	45	25	40	80	79	73
180	30	56	31	50	101	102	90
170	36	68	37	60	124	128	109

Los resultados de los ensayos de enfriamiento de la tabla 4, indican que la combinación de lana de roca y dos capas de manta térmica (P5) ofrece el mejor rendimiento

en términos de aislamiento térmico. Sin embargo, la exposición prolongada a altas temperaturas provoca la degradación de la manta térmica, lo que dificulta su manipulación. Por otro lado, los aislamientos realizados con lana de roca cubriendo el 75% de la superficie de la probeta (P6 y P7) proporcionan resultados comparables y permiten un manejo adecuado de las probetas después del ensayo. La velocidad de enfriamiento se redujo significativamente, pasando de 1.6°C/min sin aislamiento a 0.46°C/min con el aislamiento P6.

2.4 Ensayos de fractura.

De acuerdo con la norma UNE-EN 14651:2007 [14], se llevaron a cabo ensayos de flexión en probetas prismáticas tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas. Para las probetas sometidas a calentamiento, se realizó una entalla adicional, tal como se muestra en la Figura 2, con el fin de monitorear la temperatura en la zona del ligamento. Esta entalla se rellenó con lana mineral de roca para minimizar las pérdidas de calor. Posteriormente, las probetas se aislaron con lana de roca y se equiparon con asas de sujeción. Tras un período de calentamiento de 24 horas, se procedió a realizar los ensayos de flexión siguiendo el procedimiento establecido en la norma [14].

Para determinar la evolución de la fisura y la deformación global de la probeta durante el ensayo, se empleó un extensómetro tipo clip (CMOD) para medir la apertura de la entalla y dos transductores de desplazamiento lineal variable (LVDT) colocados verticalmente a ambos lados de la probeta, como se ve en la Figura 3.



Figura 3: Montaje para ensayo a flexión a tres puntos de acuerdo con UNE-EN 14651, a elevada temperatura.

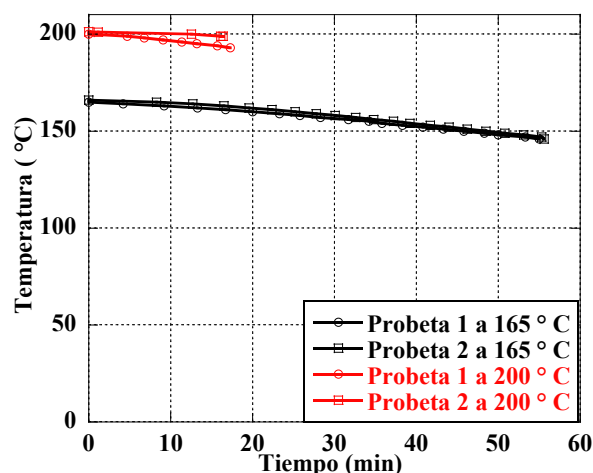


Figura 4: Variación de la temperatura en el hormigón durante el ensayo.

3. Resultados y discusión

3.1 Evolución de la temperatura

El análisis de las curvas de temperatura presentadas en la Figura 4 revela que durante los ensayos realizados a 165°C y 200°C se mantuvieron condiciones térmicas relativamente estables. No obstante, se observó una reducción considerable en la duración de los ensayos a medida que aumentaba la temperatura. Este fenómeno puede atribuirse a la degradación de las fibras de poliolefina a altas temperaturas. De hecho, los ensayos realizados a 200°C fueron aproximadamente tres veces más cortos que aquellos llevados a cabo a 165°C. Estos resultados sugieren que la degradación de las fibras no es un proceso lineal, sino que se acelera significativamente a partir de una cierta temperatura.

Al analizar los datos de los ensayos, se observa que las probetas ensayadas a 165°C experimentaron una disminución de temperatura de 19°C en un período de 55 minutos. Por otro lado, las probetas ensayadas a 200°C presentaron una bajada de temperatura más pronunciada, con valores de 7°C y 3°C para las probetas 1 y 2 respectivamente como se puede ver en la figura 4. Esta diferencia en el comportamiento térmico puede explicarse por la ausencia de fibras en las probetas ensayadas a 200°C. Dado que las fibras de poliolefina se funden a aproximadamente 165°C, los mecanismos de absorción de energía asociados al refuerzo proporcionado por las fibras disminuyen a medida que la temperatura aumenta, lo que resulta en una pérdida de resistencia más rápida.

3.2 Resultados de los ensayos de fractura

La Figura 5 presenta las curvas fuerza-flecha obtenidas para las probetas ensayadas a diferentes temperaturas. Se observa una marcada influencia de la temperatura en el comportamiento mecánico del material. La capacidad de absorción de energía, representada por el área bajo la curva, disminuye considerablemente al aumentar la temperatura de 165°C a 200°C. Es importante destacar que esta disminución no es lineal, lo que sugiere que

hay interacción entre la temperatura y los mecanismos de deformación del material.

A 200°C la capacidad resistente de las fibras ha desaparecido casi en su totalidad. Los resultados obtenidos para el hormigón P10 a 165°C indican que, si bien conserva algunas de sus características originales, se reduce la carga máxima alcanzada y la resistencia residual. Además, la capacidad de recarga del material se ve comprometida.

Para cuantificar estos efectos, se ha calculado la energía de fractura en N/m hasta una apertura de fisura de 6 mm, dando como resultados 3752 (0.1) a temperatura ambiente, 1630 (0.07) a 165°C y 168 (0.15) a 200°C.

Al alcanzar los 165°C, se observa una reducción de al menos el 50% en este parámetro. A temperaturas superiores a los 200°C, la capacidad de absorción de energía se vuelve prácticamente nula, comportándose de manera similar a un hormigón sin refuerzo.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de temperatura, se realizó un análisis siguiendo la norma UNE 14651 [14]. Este análisis incluyó el cálculo de parámetros característicos como la carga máxima, la capacidad de carga post-fisuración y las resistencias a diferentes aberturas de fisura.

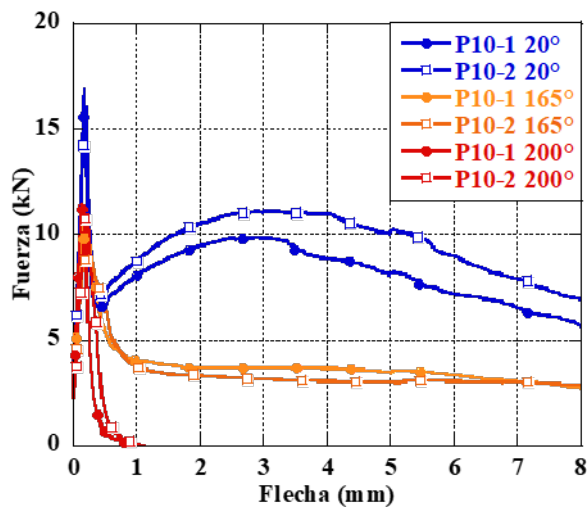


Figura 5: Curvas Fuerza- flecha ensayos de fractura a diferentes temperaturas.

Siguiendo lo establecido en el Anejo 7 del Código Estructural [10], se han calculado los valores f_{R1} y f_{R3} para evaluar la capacidad de las fibras de contribuir a la resistencia del hormigón.

Los resultados obtenidos, presentados en la Tabla 5, muestran si las fibras cumplen con los requisitos necesarios para ser consideradas como refuerzo.

Tabla 5: Resistencias medias ensayo de fractura.

	P 10 (20°C)	P 10 (165°C)	P 10 (200°C)
f_{LOP} (MPa)	5.02	3.01	3.14
$f_{R,1}$ (MPa)	2.13	1.83	-
$f_{R,3}$ (MPa)	3.22	1.08	-

Los resultados obtenidos demuestran que las fibras de poliolefina desempeñan un papel fundamental en la capacidad de carga de las probetas ensayadas a temperatura ambiente. Al absorber la energía liberada por la fisuración del hormigón, las fibras contribuyen a evitar un colapso prematuro. Sin embargo, a 165°C, se observa una disminución considerable en la resistencia, lo que sugiere una degradación de las propiedades mecánicas de las fibras debido al efecto de la temperatura.

4. Conclusiones

Se ha llevado a cabo una serie de pruebas experimentales en un hormigón autocompactante reforzado con fibras de poliolefina, sometiendo a las muestras a distintas temperaturas: ambiente (20°C) y elevadas (165°C y 200°C)

Las probetas expuestas a 165°C evidenciaron una disminución moderada en las propiedades conferidas por las fibras, manifestándose en una menor capacidad de absorción de energía, una reducción en la carga máxima y una disminución de la carga residual.

A 200°C, el hormigón pierde por completo su capacidad de resistir cargas, lo que imposibilita la determinación del parámetro f_{R1} .

Las fibras experimentan una degradación tan severa que pierden por completo su función estructural, haciendo que el material se comporte como un hormigón convencional sin refuerzo.

La marcada diferencia en el comportamiento del material entre 165°C y 200°C indica que las fibras de poliolefina probablemente se fundieron a la temperatura más alta. En consecuencia, el material P10 perdió sus propiedades de refuerzo, comportándose de manera similar a un hormigón convencional sin adiciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero prestado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España a través del Proyecto PID2019-108978RB-C31. También agradecen la contribución de Sika SAU a través de la Cátedra Universidad-Empresa "Cátedra Sika-UPM".

Referencias

- [1] L. Maia, J. Figueiras, Early-age creep deformation of a high strength self-compacting concrete, *Constr Build Mater* 34 (2012) 602–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.083>.
- [2] A. Pierre-Claude, Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, 55, (2000) 1349-1359, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3).
- [3] P.R. Kalyana Chakravarthy, K. Namratha, Strength and durability properties of high strength self-compacting concrete, *Mater Today Proc* 69 (2022) 896–900. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.365>.
- [4] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, Estudio del comportamiento mecánico y en fractura de un hormigón autocompactante con fibras de poliolefina, *Anales de Mecánica de Fractura*, 1, (2013), 73-78. ISSN 0213-3725.
- [5] F.B. Varona, F.J. Baeza, D. Bru, S. Ivorra, Evolution of the bond strength between reinforcing steel and fibre reinforced concrete after high temperature exposure, *Constr Build Mater* 176 (2018) 359–370. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.065>.
- [6] F.B. Varona, F.J. Baeza, D. Bru, S. Ivorra, Influence of high temperature on the mechanical properties of hybrid fibre reinforced normal and high strength concrete, *Constr Build Mater* 159 (2018) 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.129>.
- [7] D. Foti, Prestressed slab beams subjected to high temperatures, *Compos B Eng* 58 (2014) 242–250. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.10.083>.
- [8] M.G. Alberti, J.C. Gálvez, A. Enfedaque, R. Castellanos, Influence of high temperature on the fracture properties of polyolefin fibre reinforced concrete, *Materials* 14 (2021) 1–21. <https://doi.org/10.3390/ma14030601>.
- [9] G.F. Peng, W.W. Yang, J. Zhao, Y.F. Liu, S.H. Bian, L.H. Zhao, Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cem Concr Res* 36 (2006) 723–727. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.014>.
- [10] Ministerio de Fomento, Código Estructural, 2021.
- [11] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, On the mechanical properties and

fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete, *Constr Build Mater* 55 (2014) 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024>.

- [12] J. Gálvez, M. Alberti, A. Enfedaque, Á. Picazo, *Fundamentos de hormigón reforzado con fibras*, García-Maroto Editores, Madrid, 2019.
- [13] B. Persson, Fire resistance of self-compacting concrete, SCC, *Mat. Struct.* 37, 575–584 (2004). <https://doi.org/10.1007/BF02483286>.
- [14] European Committee for Standardization, Test Method for Metallic Fiber Concrete. Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual), EN14651:2007+A1, 2007.
- [15] M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez, On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete, *Constr Build Mater* 55 (2014) 274–288. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.024>.
- [16] European Committee for Standardization, Testing Fresh Concrete. Part 8: Self-Compacting Concrete. Slump-Flow Test, EN12350-8, 2010.
- [17] European Committee for Standardization, Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens, EN12390-3, 2020.