

Desarrollo de la resistencia a flexión de hormigones reforzados con fibras

Evolution of the flexural strength of fibre reinforced concrete

Laura González Suárez ^a, Carlos Thomas García ^a, Jokin Rico Arenal ^b, Jesús Setién Marquínez ^a, Juan Antonio Polanco Madrazo ^a, Francisco Ballester Muñoz ^c, María N. Sánchez Pallarés ^d

^aLADICIM (Laboratorio de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av. Los Castros 44, Santander, 39005, España

^bINGECID S.L. (Ingeniería de la Construcción, Investigación y Desarrollo de Proyectos), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av./Los Castros 44, 39005, Santander, España

^cGITECO (Grupo de Ingeniería de la Edificación), Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av./Los Castros 44, 39005, Santander, España

^dgGravity Engineering (Servicio de Materiales y Firmes), Avda. Camino de Santiago 50. 28050 Madrid

RESUMEN

La aplicación de los hormigones reforzados con fibras como sustitución total o parcial de la armadura, cada vez más ayuda a reducir costes, tiempo de ejecución, pesos y espesores de las capas de hormigón en multitud de aplicaciones. Se ha realizado un estudio en el que se han determinado las principales características físico-mecánicas de un hormigón con fines estructurales, reforzado con fibras metálicas, fabricado en laboratorio, haciendo especial hincapié en su resistencia a flexión y comparándola con la resistencia a compresión, consiguiendo ajustar la evolución de ambas resistencias a una ecuación logarítmica, observando que siguen la misma tendencia.

ABSTRACT

The application of fibre reinforced concrete as a total or partial replacement of the reinforcement in some applications helps to reduce costs, execution times, weights and thicknesses of the concrete layers. A study has been carried out within a research project in which the physical-mechanical characteristics in the laboratory have been determined, with special emphasis on their flexural strength, comparing that with the compressive strength, adjusting the evolution of both resistances to a logarithmic equation, observing that they follow the same trend.

PALABRAS CLAVE: hormigón, fibras, armadura, torres eólicas.

KEYWORDS: concrete, fibres, reinforcement, wind towers.

1. Introducción

El hormigón reforzado con fibras (HRF), entendido como un hormigón que incluye en su composición fibras cortas y discretas,

distribuidas aleatoria y homogeneamente en su masa, constituye una de las innovaciones más relevantes en el campo de los hormigones

especiales [1]. En los últimos 40 años, ha aumentado rápidamente el desarrollo y aceptación de refuerzos con fibras para la mejora de las propiedades del hormigón, incrementándose su uso en determinadas industrias, investigación y desarrollo. Así mismo, numerosos tipos de fibras se han adaptado con éxito a las diferentes aplicaciones del hormigón [2].

Las fibras artificiales que se utilizan hoy en día están inspiradas en las antiguas técnicas con aplicación de fibras naturales (paja, astilla, cola de caballo, pelo de cabra, pluma, etc.) [3]. Dichas fibras artificiales se están utilizando actualmente para reemplazar a los materiales metálicos convencionales en una amplia gama de industrias, las cuales requieren materiales estructurales con alta resistencia, rigidez y propiedades mecánicas. Las fibras también ofrecen varias ventajas, como una mejor tolerancia al daño ante el crecimiento de fisuras por diferentes procesos y daños por impacto. Algunos de los materiales utilizados en la fabricación de fibras en el sector de la construcción son la fibra de vidrio, fibra de carbono y el acero [4].

En cuanto a la forma de las fibras metálicas, las fibras con ganchos finales (Hooked), como Holschemacher et al. [5] han demostrado ser eficaces. Otros estudios [6,7] que recomiendan ese tipo de geometría ya que consiguen una mayor adherencia entre la fibra y la matriz, han registrado resistencias de unión 3 y 7 veces más altas en la tipología Hooked que en las tipologías corrugadas y rectas respectivamente.

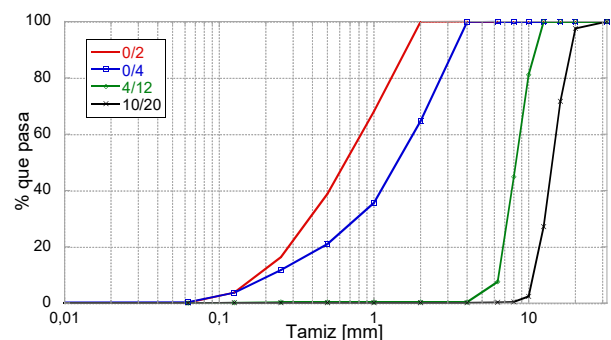
Una de las ventajas de la incorporación de fibras metálicas se produce en el control de la fisuración [8–10], consiguiendo un aumento significativo en la capacidad de absorción de energía del hormigón llega incluso a duplicarse el valor de este parámetro en el hormigón con fibras respecto al hormigón en masa, provocando que en la rotura final la probeta de hormigón con fibras no provoque la

fragmentación, a diferencia del hormigón sin fibras [8,11].

Las fibras aportan al hormigón una resistencia residual a flexotracción, siendo diversos los autores que han cuantificado estas características [6,10–17].

2. Materiales y metodología

Se ha realizado un hormigón reforzado con fibras metálicas, utilizando 4 tamaños de árido calizo. Una grava de 20 mm de tamaño máximo, una gravilla y 2 arenas, así como cemento tipo I, 52,5N con una dosificación de 390 kg/m³ y aditivo superplastificante MasterEase 5025, de BASF, que mantiene la trabajabilidad y mejora la consistencia del hormigón con fibras. La curva granulométrica de los áridos empleados se muestra en la Figura 1. La relación agua/cemento fue de 0,42. El hormigón se fabricó con una cantidad de 35 kg/m³ de fibras metálicas tipo *Hooked*, de 60 mm de longitud y 0,90 mm de diámetro.



intemperie han sido a temperatura media de 12,8°C, variando de 10,1 a 15,1°C, con una humedad máxima de 86,94% y una mínima de 82,12%.

Las probetas fueron ensayadas a 3 edades distintas: 10 horas, 7 días y 28 días, tanto a compresión como a tracción por flexión. Para el curado de las primeras (10 horas), se introdujeron las mismas en una bañera, controlando la temperatura del agua, haciendo que en todo momento ésta fuera la misma que la temperatura del bloque con el objetivo de simular el curado a la temperatura real. Para registrar la temperatura de curado del hormigón y activar las resistencias que calientan el agua, se utilizó un equipo de control diferencial HMI, también denominado CHARI (Control de Hormigón de Alta Resistencia Inicial), cedido por Dragados. En paralelo, las probetas ensayadas a 7 y 28 días fueron curadas en cámara de humedad, bajo condiciones de humedad y temperatura controladas ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $95 \pm 5\%$ humedad).

El objetivo de ensayar las probetas a una edad de 10 horas fue el de medir las resistencias en el momento en el que pueden desarrollarse las mismas en obra.

2.3. Resistencia a compresión

Para la determinación de la resistencia a compresión se siguió la norma UNE 83507:2004. “Hormigones con fibras. Rotura por compresión” [18], aplicándose una carga a una velocidad constante, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta fuera de $0,5 \pm 0,2$ MPa/s.

2.4. Resistencia residual a tracción por flexión

Para la determinación de la resistencia a la tracción por flexión se ha utilizado lo establecido en la norma UNE-EN 14651:2007 [19]. Se han ensayado un total de 9 probetas a tracción por

flexión, ensayando 3 a cada edad (10 horas, 7 y 28 días).

2.3.1. Preparación de las probetas

Para la preparación de las probetas, previamente a la ejecución del ensayo, se realizó una entalla de 5 mm de anchura en cada una de ellas, utilizando una sierra de disco para realizar el corte por vía húmeda, siendo el radio interior del fondo de la entalla de 2,5 mm y la altura de la misma 25 mm.

Para la medición del desplazamiento del borde de fisura (entalla) se colocó un sensor LVDT (Figura 2) con el que se midió el desplazamiento vertical del borde de fisura. La probeta fue apoyada en la cara inferior sobre dos apoyos cilíndricos de 30 mm de radio situados a una distancia de 50 mm de los extremos, siendo la distancia entre apoyos de 500 mm. En el centro de la cara superior de la probeta se coloca un tercer cilindro de apoyo (Figura 3).



Figura 2. Detalle de la colocación del LVDT.



Figura 3. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo.

2.3.2. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión

Para aplicar la fuerza necesaria para el ensayo se utilizó una máquina servohidráulica Instron de capacidad máxima 250 kN.

Se determinó el CMOD (desplazamiento del borde de la fisura), estableciendo una relación con la flecha registrada por el LVDT (ρ), según la ecuación (1)

$$CMOD = \frac{\rho - 0,04}{0,85} \quad (1)$$

El ensayo finaliza cuando el valor del CMOD es igual a o superior a 4 mm, trazando el diagrama carga-CMOD. Se ha calculado la resistencia residual a tracción por flexión $f_{R,3}$, correspondiente al $CMOD_3$, que es la asociada a una apertura de fisura de 2,5 mm, dada por la expresión (2), donde F_3 se obtiene del diagrama carga-CMOD.

$$f_{R,3} = \frac{3 \cdot F_3 \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2)$$

Siendo:

- l: longitud del vano = 500 mm
- b: anchura de la probeta = 150 mm
- h_{sp} : distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta, en mm.

3. Resultados y análisis

Se han calculado las resistencias residuales a flexotracción para una misma apertura de fisura ($f_{R,3}$, $CMOD=2,5$ mm) así como las resistencias a compresión para edades cortas: 10 horas, 7 días y 28 días. En la Figura 4 y en la Figura 5 se muestran dos probetas tras ser ensayadas a compresión y a tracción por flexión, respectivamente.



Figura 4. Probeta ensayada a compresión.



Figura 5. Grieta tras el ensayo a tracción por flexión.

En la Figura 6 se muestra una de las gráficas Fuerza-CMOD que se obtuvieron, donde se obtiene la fuerza (F_3) que corresponde al $CMOD_3=2,5$ mm para el cálculo del $f_{R,3}$, utilizando la ecuación (2).

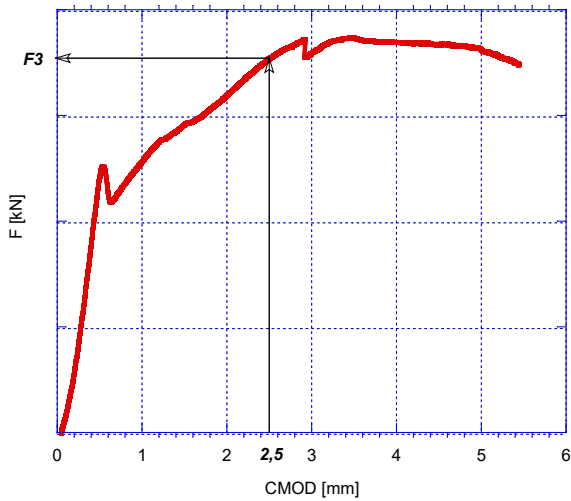


Figura 6. Diagrama Fuerza- CMOD.

En la Figura 7 puede observarse la evolución de la resistencia a compresión con la edad. En las edades cortas hay una mayor evolución de la resistencia a compresión, siendo este crecimiento 15,5 veces mayor durante los primeros 7 días, comparándolo con la evolución de 7 a 28 días.

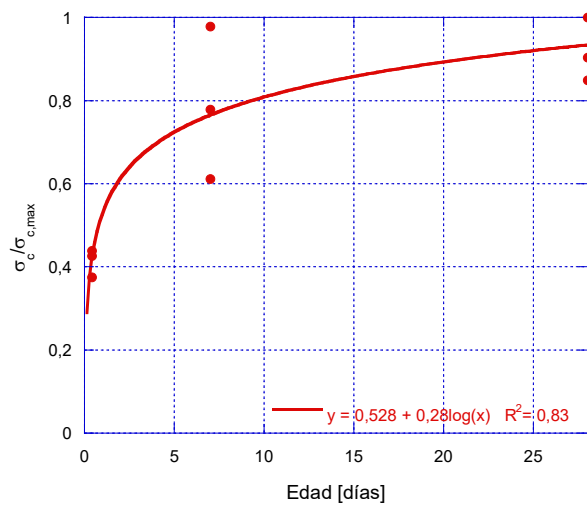


Figura 7. Evolución de la resistencia a compresión.

En cuanto a la resistencia residual a tracción, esta evolución sigue siendo mayor en las edades más tempranas (ver Figura 8), siendo este crecimiento 9,5 veces mayor de 10 h a 7 días que de 7 a 28 días.

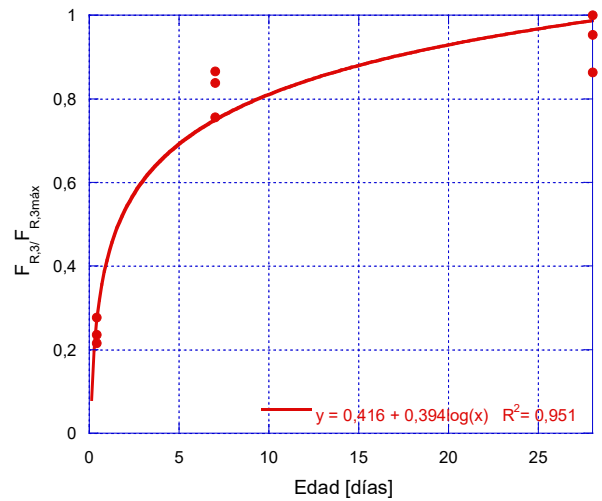


Figura 8. Evolución de la resistencia residual a tracción por flexión para CMOD=2,5 mm ($f_{R,3}$).

Las evoluciones de las resistencias presentan un buen ajuste con sendas funciones logarítmicas, especialmente en el caso de resistencia residual a tracción por flexión, con un valor de R muy próximo a 1.

Por otro lado, se ha observado una cierta proporcionalidad entre la resistencia a compresión y a tracción por flexión, siendo unas 8 veces mayor la resistencia a compresión que la resistencia a tracción a partir de los 7 días de edad. No obstante, a cortas edades es mayor el desarrollo de la resistencia a compresión y a largas edades el de la resistencia a la flexión. En la Figura 9 se muestra la comparación entre dichas tendencias.

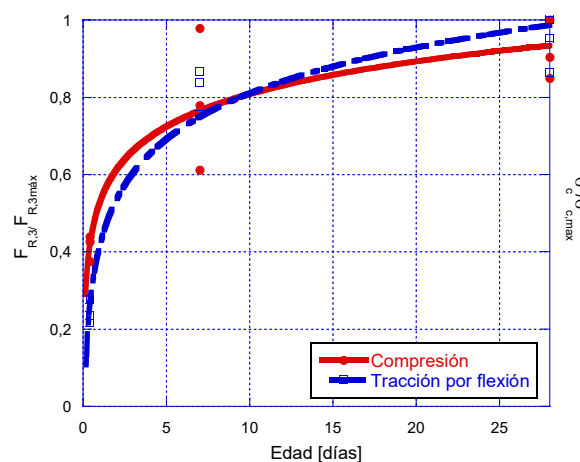


Figura 9. Comparación entre las tendencias de las resistencias a compresión y a tracción por flexión.

4. Conclusiones

Se han analizado las relaciones entre las resistencias a flexotracción para una apertura de fisura de 2,5 mm (fr3) y las resistencias a compresión, analizando las mismas en diferentes edades: 10 horas, 7 y 28 días para un hormigón reforzado con fibras metálicas.

Tanto la evolución de la resistencia a tracción por flexión como la evolución a compresión siguen una tendencia que se ajusta a una expresión logarítmica, consiguiendo un ajuste muy fiable (R próxima a 1).

Por otro lado, a medida que aumenta la edad de las probetas, existe una relación entre la resistencia a compresión y a flexión, de forma que sabiendo una de las dos se podría predecir la restante siendo mayor el desarrollo de la resistencia a compresión en los primeros días de curado y mayor el desarrollo de la resistencia a flexión a partir de los 7 días de curado.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer la financiación recibida a través del proyecto “Desarrollo de un nuevo concepto de Torre de hormigón in situ de gran altura para aerogeneradores de gran potencia (S2C)”, proyecto de investigación RTC-2017-6013-3 del Programa Retos Colaboración 2017, coordinado por Dragados y con la participación de Drace Infraestructuras, Ingecid y la Universidad de Cantabria.

Resolución de la Secretaría de Estado de universidades, investigación, desarrollo e Innovación y Presidencia de la Agencia Estatal de Investigación por la que se conceden Ayudas correspondientes a la convocatoria de tramitación anticipada de Retos Colaboración 2017, del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación, 2013-2016.

También se desea agradecer a Dragados el préstamo del equipo de control diferencial HMI (CHARI) para el control de la temperatura de hormigón en el tiempo de curado.

Referencias

- [1] REVISTA TRIMESTRAL DE LA ASOCIACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL, Hormigón y Acero. 61–nº256 (2010) 83–101. <http://e-ache.com/modules/hormigonyacero/pdf.php?id=256>.
- [2] C.M. WONG, Use of Short Fibres in Structural Concrete to Enhance Mechanical Properties, 2004. <https://eprints.usq.edu.au/95/1/ChuanMeinWONG-2004.pdf>.
- [3] Ş. Yazıcı, G. İnan, V. Tabak, Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1250–1253. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.05.025.
- [4] D. Liu, Y. Tang, W.L. Cong, A review of mechanical drilling for composite laminates, *Compos. Struct.* 94 (2012) 1265–1279. doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2011.11.024.
- [5] K. Holschemacher, T. Mueller, Y. Ribakov, Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete, *Mater. Des.* 31 (2010) 2604–2615. doi:10.1016/J.MATDES.2009.11.025.
- [6] K. Wille, D.J. Kim, A.E. Naaman, Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents, *Mater. Struct.* 44 (2011) 583–598. doi:10.1617/s11527-010-9650-4.
- [7] Z. Wu, K.H. Khayat, C. Shi, How do fiber shape and matrix composition affect fiber pullout behavior and flexural properties of UHPC?, *Cem. Concr. Compos.* 90 (2018) 193–201.

- doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2018.03.021.
- [8] F. Altun, T. Haktanir, A comparative experimental study of steel fibre-additive reinforced concrete beams, *Mater. Construcción*. 54 (2004) 5–15. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/252/298>.
- [9] C. Xu, P. Zhou Cao, K. Wu, S. Lin, D. guo Yang, Experimental investigation of the behavior composite steel-concrete composite beams containing different amounts of steel fibres and conventional reinforcement, *Constr. Build. Mater.* 202 (2019) 23–36. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.026.
- [10] S.H. Park, D.J. Kim, G.S. Ryu, K.T. Koh, Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Cem. Concr. Compos.* 34 (2012) 172–184. doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2011.09.009.
- [11] R.S. Olivito, F.A. Zuccarello, An experimental study on the tensile strength of steel fiber reinforced concrete, *Compos. Part B Eng.* 41 (2010) 246–255. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2009.12.003.
- [12] J. Gao, W. Sun, K. Morino, Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete, *Cem. Concr. Compos.* 19 (1997) 307–313. doi:10.1016/S0958-9465(97)00023-1.
- [13] E.A. Samer, B.P. N., Normal- and High-Strength Fiber-Reinforced Concrete under Compression, *J. Mater. Civ. Eng.* 4 (1992) 415–429. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(1992)4:4(415).
- [14] T. Job, R. Ananth, Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 19 (2007) 385–392. doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385).
- [15] S.-T. Kang, Y. Lee, Y.-D. Park, J.-K. Kim, Tensile fracture properties of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with steel fiber, *Compos. Struct.* 92 (2010) 61–71. doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2009.06.012.
- [16] H. Huang, X. Gao, L. Li, H. Wang, Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC, *Constr. Build. Mater.* 188 (2018) 709–721. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.08.146.
- [17] M.C. Nataraja, N. Dhang, A.P. Gupta, Stress–strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, *Cem. Concr. Compos.* 21 (1999) 383–390. doi:10.1016/S0958-9465(99)00021-9.
- [18] AENOR, UNE 83507:2004. Hormigones con fibras. Rotura por compresión., (n.d.).
- [19] AENOR, Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual). UNE-EN 14651:2007+A1, (n.d.).