

## Ensayos para evaluar la adherencia residual acero-hormigón a altas temperaturas

F. B. Varona Moya<sup>\*(1)</sup>, D. Bru Orts<sup>(1)</sup>, F. J. Baeza de los Santos<sup>(1)</sup>, S. Ivorra Chorro<sup>(1)</sup>

(1) Universidad de Alicante, Dpto. de Ing. de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana, ctra. San Vicente del Raspeig s/n, 03690-San Vicente del Raspeig  
e-mail: borja.varona@ua.es\*

**Palabras clave:** hormigón estructural; altas temperaturas; adherencia; hormigón reforzado con fibras  
**Keywords:** structural concrete; high temperature; bonding; fiber-reinforced concrete

### RESUMEN

Desde finales del siglo XIX una de las características más importantes del hormigón como material estructural ha sido su buen comportamiento frente al fuego. El estado del arte en la actualidad cubre adecuadamente las variables que definen este comportamiento y los reglamentos de diseño recogen prescripciones para el dimensionamiento: tablas para elección de recubrimientos en función de la RF, métodos simplificados para la determinación de la resistencia de las secciones de elementos estructurales y métodos más avanzados. Uno de los aspectos menos investigados y que no aparecen cubiertos en la reglamentación es el de las condiciones de adherencia entre el acero corrugado y el hormigón tras someter ambos materiales a elevadas temperaturas. La presente comunicación recoge los resultados de los ensayos que se han llevado a cabo para tratar de caracterizar la resistencia residual a la adherencia. Se ha tratado de analizar esta propiedad conforme al conocido ensayo de *pull-out*; las probetas han sido calentadas a edades de entre 60 y 70 días en un horno industrial hasta tres rangos de temperatura: 450°C, 650°C y 825°C. Previo al proceso de calentamiento han sido sometidas a un escalón de 130°C durante varias horas a fin de eliminar al máximo posible la humedad retenida. Los ensayos se complementan con el de compresión en probetas cilíndricas y el de tracción indirecta, realizados en los mismos rangos de temperatura y con probetas fabricadas a partir de las mismas amasadas. Asimismo, se han realizado ensayos de adherencia en probetas a temperatura ambiente, a 28 días y a 60 días, a fin de poder completar el conjunto de datos para el contraste. Los resultados que se presentan demuestran que la adición de fibras de acero mejora el comportamiento de adherencia residual a altas temperaturas.

### 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón armado comenzó a ser utilizado como material estructural en la segunda mitad del siglo XIX y una de las razones que propiciaron su utilización fue su buen comportamiento frente a las altas temperaturas que podían generarse durante un incendio, comparado con el del otro gran material de construcción, la fundición de acero, por aquel entonces. Hoy en día, la comparación con el acero estructural sigue siendo ventajosa para el hormigón. Sin embargo, a finales de la década de los 1970 comenzó a desarrollarse una extensa labor de investigación centrada en el comportamiento estructural del hormigón sometido a la acción de las altas temperaturas; detrás de ello estaba la proliferación de la energía nuclear, cuyos reactores se construían en hormigón [1]. La exposición de una estructura de hormigón armado a las elevadas temperaturas que se desarrollan en un incendio, afecta a su durabilidad y a sus prestaciones mecánicas. El daño producido puede ser variable en función de los materiales almacenados en la estructura, ya que la naturaleza de éstos define su combustibilidad y su tendencia a propagar el fuego. Otro factor determinante en la intensidad del fuego y la extensión de las llamas, es el efecto de las corrientes de aire generadas por ventanas o aberturas. Uno de los fenómenos que más perjuicio generar en el comportamiento estructural del hormigón en condiciones de incendio es el *spalling* o desprendimiento de las capas de hormigón más calientes: cuando la velocidad de calentamiento es rápida (por ejemplo si se trata de un incendio por combustión de hidrocarburos) este desprendimiento puede llegar a ser súbito y explosivo [1, 2].

Desde el punto de vista estructural, la Instrucción EHE-08 [3] propone en su Anejo 6 metodologías de diseño simplificadas provenientes del Eurocódigo 2-Parte 1-2 [4]: métodos basados en tablas (dimensiones mínimas de las secciones transversales y valores mínimos de recubrimiento para los paquetes de armado) y el métodos de reducción de la isoterma de 500°C. Dentro de este tipo de metodologías, el Eurocódigo 2 admite también el método de zonificación y también permite abordar el problema de una forma más ambiciosa mediante simulación numérica avanzada. En estos casos, se dispone de tablas que describen la evolución de las siguientes propiedades frente a altas temperaturas: resistencia a compresión del hormigón y curva tensión-deformación, resistencia a tracción del hormigón, coeficiente de dilatación térmica del hormigón, conductividad térmica, calor específico, reducción del módulo de elasticidad del acero de las armaduras, reducción de su límite elástico y coeficiente de dilatación térmica del acero. En opinión de los autores, los reglamentos estructurales deberían incluir también datos o modelos para cuantificar la variación de las condiciones de adherencia entre el hormigón y el acero cuando las estructuras de hormigón armado se someten a altas temperaturas, pudiendo generarse importantes gradientes a lo largo de un elemento estructural por la diferencia entre la conductividad térmica de ambos materiales. Existe muy poca bibliografía que trate este tema y la presente contribución pretende abordarlo desde el punto de vista experimental.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 Descripción de la campaña de ensayos

La campaña de ensayos que se ha llevado a cabo ha tenido como objetivo caracterizar la variación de las siguientes propiedades mecánicas del hormigón con la temperatura: resistencia a compresión simple ( $f_c$ ); resistencia a tracción indirecta ( $f_{ct,i}$ ); y adherencia  $\tau_b$  acero-hormigón. Estos ensayos se han llevado a cabo sobre cuatro tipos distintos: hormigón de resistencia convencional, con y sin fibra de acero, y hormigón de alta resistencia (HAR), con y sin fibra de acero

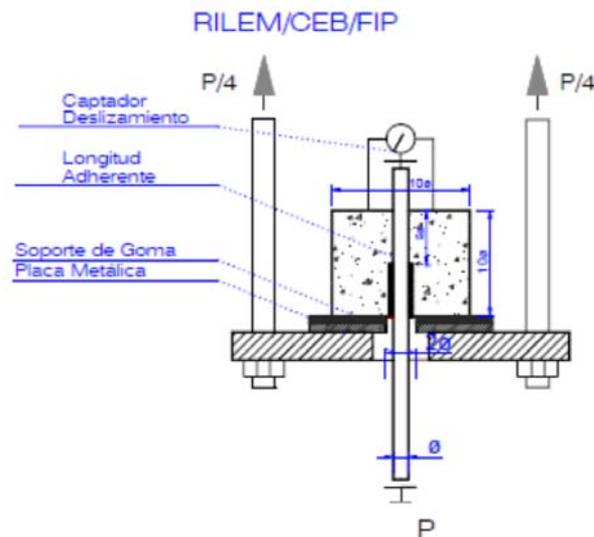


Figura 1. Esquema del ensayo *pull-out* (CEB, 1983)

El ensayo de resistencia a compresión y el de tracción indirecta o de hendimiento son conformes a las normas UNE-EN 12390-1, UNE-EN 12390-2, UNE-EN 12390-3 y UNE-EN 12390-6. El ensayo de adherencia acero-hormigón mediante *pull-out* es conforme a la revisión del *Comité Européen du Béton* [5]. A pesar de que los ensayos recomendados en la Instrucción EHE-08 para la certificación de la adherencia de las barras de acero corrugado soldable son el de la viga (o *beam-test*) y el de geometría de corruga, según norma UNE-EN 10080, se ha optado por recurrir al ensayo de *pull-out* debido a las incertidumbres que generaría el someter el montaje del *beam-test* a temperaturas de hasta 825°C. Las probetas ensayadas han sido cilíndricas,

de 10 cm diámetro y 10 cm de generatriz, con un redondo de Ø10 mm embebido y dispuesto en el eje de la probeta (ver Figura 1). El calentamiento de las probetas se ha llevado a cabo en un horno industrial. La fase de calentamiento a las temperaturas de 450°C, 650°C ó 825°C ha sido precedida de un escalón de secado de 3 horas de duración a 130°C para eliminar al máximo posible la cantidad de humedad retenida.

## 2.2. Materiales y dosificaciones

Los materiales empleados en la fabricación de los hormigones han sido cemento CEM II/B-L 32,5 R (hormigón de resistencia convencional) y CEM I 52,5 R (de alta resistencia), agua, arena caliza, grava caliza de machaqueo con granulometría 6/12, plastificante (con proporciones comprendidas entre el 0,5 y el 2% de la masa del cemento). En la fabricación de probetas de alta resistencia se ha utilizado también humo de sílice no densificado, suministrado por *Grupo Ferroatlántica*. Las fibras de acero utilizadas han sido Arcelor Mittal HE 55/35, de extremos en gancho. Para las probetas del ensayo pull-out se empleó acero corrugado soldable B500SD, según UNE-EN 10080. Las dosificaciones ensayadas se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de los hormigones ensayados

Material	Dosificación resist. conv. (kg/m <sup>3</sup> )	Dosificación alta resist. (kg/m <sup>3</sup> )
Cemento	418	500
Agua	230	159
Arena	694	629
Grava	1042	1000
Plastificante	2,1	12
Humo de sílice	-	50
Fibra de acero	- / 20	- / 20

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la realización de los ensayos, las probetas cilíndricas de Ø15×30 cm de hormigón de alta resistencia explotaron a temperaturas en el entorno de los 500°C debido al citado fenómeno de *spalling* explosivo; las probetas de alta resistencia para el ensayo *pull-out* no presentaron este problema, el cual tampoco afectó a las probetas de hormigón de resistencia convencional.

La adición de fibras no supone una variación sustancial en la resistencia a compresión ni en el hormigón convencional (Figura 2) ni en el HAR (Figura 3). El valor de la resistencia a compresión que se observa a temperatura ambiente a 28 días en el caso del HAR (Figura 3) no es concluyente.

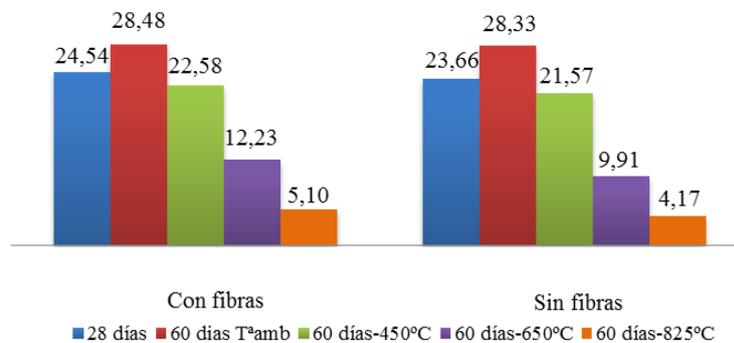


Figura 2. Resist. a compresión simple en hormigón convencional (MPa)

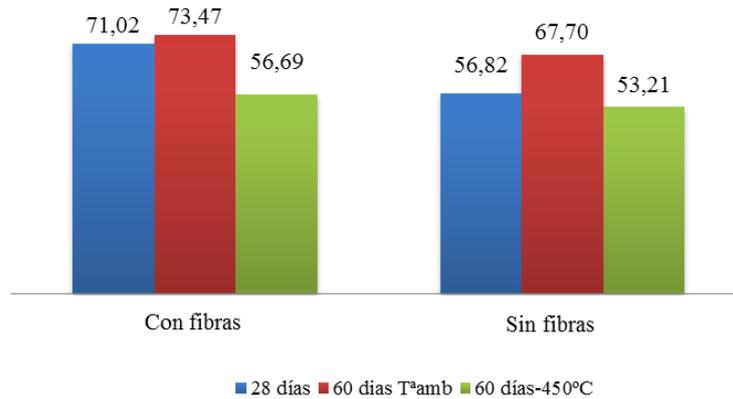


Figura 3. Resist. a compresión simple en HAR (MPa)

En el caso de la resistencia a tracción indirecta, las fibras la mejoran de forma notable a altas temperaturas en el caso del hormigón convencional (especialmente en el rango de los 650°C) (Figura 4). Sin embargo, en el caso del HAR, no se ha podido verificar esta tendencia debido al fallo de las probetas por *spalling* durante la fase de calentamiento por encima de 500°C.

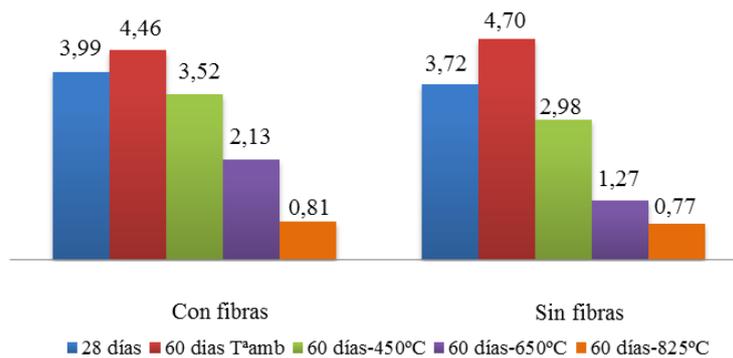


Figura 4. Resist. a tracción indirecta en hormigón convencional (MPa)

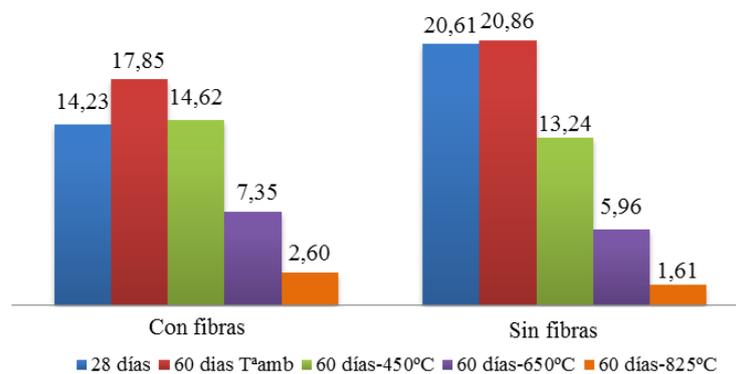


Figura 5. Adherencia  $\tau_b$  acero-hormigón convencional (MPa)

En lo referente a la resistencia a adherencia acero-hormigón convencional (Figura 5), el refuerzo de fibras empeora el comportamiento a temperatura ambiente, probablemente debido a que contribuyen a incrementar la porosidad [6]. Sin embargo, la adherencia residual tras someter las probetas a altas temperaturas es mayor

cuando se emplean fibras de acero (un 61% mayor a 825°C). En las probetas *pull-out* de HAR ensayadas a temperatura ambiente, no se consiguió lograr el arrancamiento del redondo y el fallo fue por rotura por tracción del acero en la zona de alargamiento libre, alcanzándose valores de  $\tau_b$  superiores a 29 MPa (Figura 6). A altas temperaturas, la presencia de fibras de acero es beneficiosa (el doble de adherencia a 825°C).

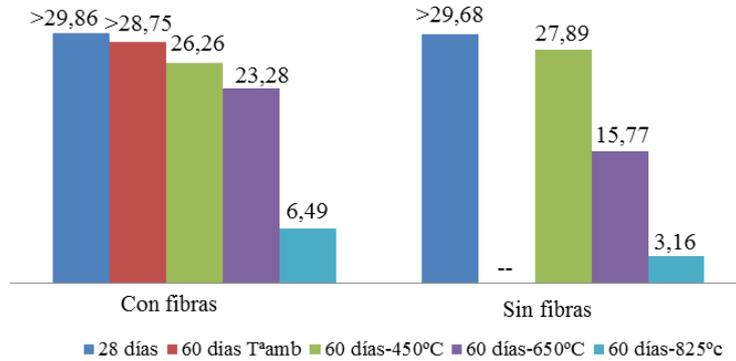


Figura 6. Adherencia  $\tau_b$  acero-HAR (MPa)

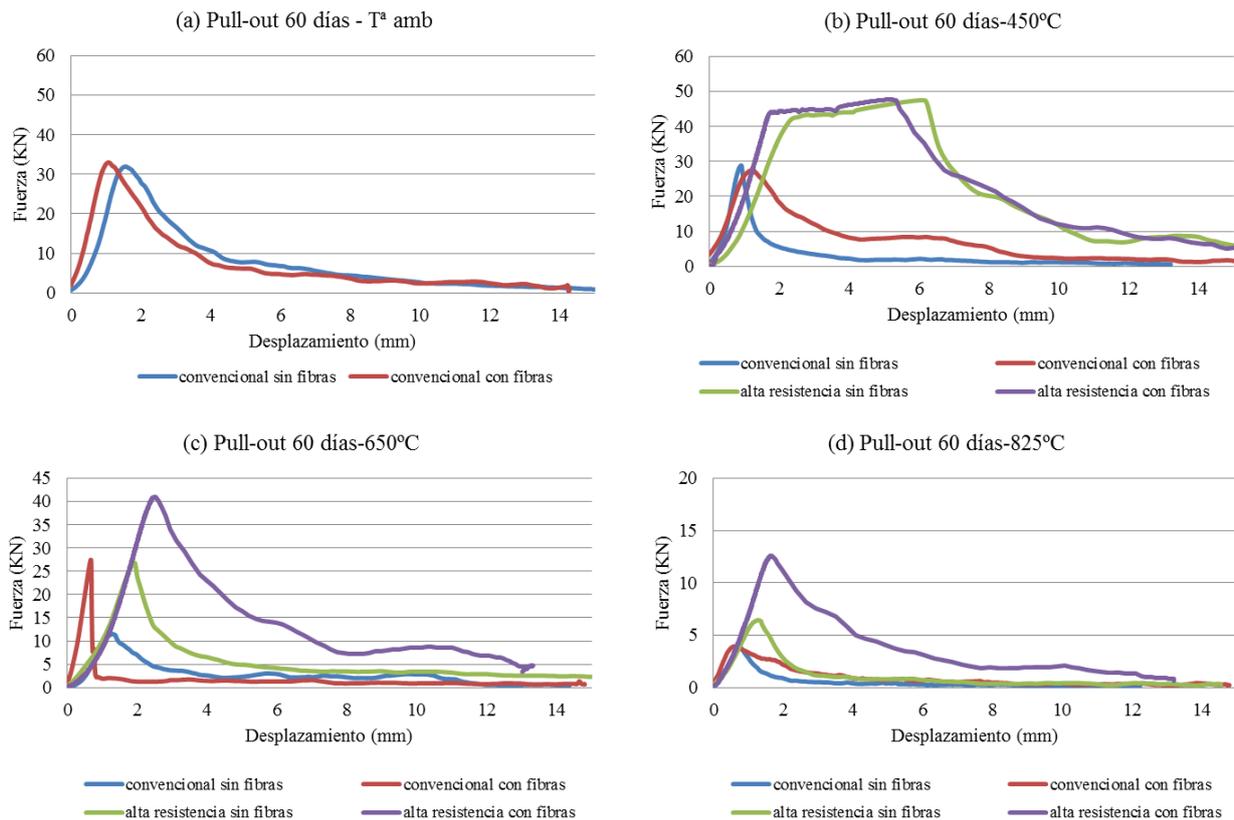


Figura 7. Curvas carga-deslizamiento de los ensayos de pull-out a 60 días a distintas temperaturas

Las Figuras 7(a)-(d) recogen las curvas de carga-deslizamiento del ensayo de *pull-out*. La Figura 7(a) no recoge datos para el HAR porque no se consiguió lograr el arrancamiento del redondo. En las probetas sometidas a 450°C el fallo por arrancamiento se produjo después de iniciada la plastificación del acero del

redondo pero sin que éste alcanzase la carga máxima de rotura, tal y como recoge la Figura 7(b). Las Figuras 7(c) y 7(d) permiten apreciar la mejora que supone la adición de fibras en la resistencia a la adherencia acero-hormigón a altas temperaturas, en especial en el hormigón de alta resistencia.

#### 4. CONCLUSIONES

La adición de fibra de acero disminuye ligeramente la adherencia armadura-hormigón a temperatura ambiente, lo que puede ser debido al incremento en la porosidad de la matriz y/o a la merma de la interfaz de contacto del redondo y la corruga con el hormigón. No obstante, a altas temperaturas sí se produce una mejora sustancial en la adherencia. Este hecho puede ser de gran interés en el estudio de las condiciones de ductilidad de las secciones críticas o de gran responsabilidad en elementos de hormigón armado sometidos a una situación accidental de incendio. En el caso del HAR, sin embargo, el fenómeno más preocupante es el *spalling*, en especial si se emplean dosificaciones elevadas de microsilíce [4]. La adición de las fibras de acero como adición no es suficiente para evitar este problema. Las líneas de investigación a que dan pie estos resultados son, por un lado, la verificación de estas conclusiones con campañas más exhaustivas y con modelos de simulación numérica; por otro lado, la búsqueda de dosificaciones de HAR que sean resistentes al *spalling*, posiblemente combinando las fibras de acero con fibras de polipropileno [4, 7].

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Bazant, Z.P. y Kaplan M.F., *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*, Longman, London (1996).
- [2] Schulte, C. y Schaab A., “Fire protection requirements and solutions for international tunnel projects” en *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure* (Ed. Koenders, E.A.B. y Dehn, F.) pp. 3-17 (2011).
- [3] Comisión Permanente del Hormigón, *Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08)*, Ministerio de Fomento, Madrid (2009).
- [4] Comité Européen de Normalisation, *EN-1992-1-2 Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design*, CEN, Bruselas (2004).
- [5] Comité Européen du Béton, “Recommendations on reinforcement steel for reinforced concrete. Revised Edition of RC-6: Bond test for reinforcement steel: (2) Pull-out test” en *Bulletin d’Information CEB*, Bulletin d’Information 13 (1983).
- [6] Soroushian, P. y Bayasi, Z., “Local bond behaviour of deformed bars in steel fibre reinforced concrete joints” en *Magazine of Concrete Research* 42-151, pp. 91-95, ICE Publishing, Londres (1990).
- [7] Allen, C., “Concrete solutions to fire” en *Fire Protection Engineering for New and Existing Tunnels*, International Tunnelling Association, Londres (2006).