

# Análisis experimental de la pérdida de adherencia hormigón-acero en hormigones sometidos a altas temperaturas

## EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE LOSS OF BOND BETWEEN REBARS AND CONCRETE EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7184> | Recibido: 16/06/2014 • Aceptado: 23/10/2014

■■■■  
F. Borja Varona, F. Javier Baeza, Salvador Ivorra, David Bru

UNIVERSIDAD DE ALICANTE. Dpto. de Ingeniería Civil. Carretera San Vicente del Raspeig, s/n - 03690 San Vicente del Raspeig. Tfno: +34 965 903 705. [borja.varona@ua.es](mailto:borja.varona@ua.es)

### ABSTRACT

• Within the context of the most usual construction materials for building and civil infrastructures, concrete stands out because of its excellent behaviour when exposed to high temperatures and fire condition. The present study focuses on the residual bond strength between concrete and steel rebars after exposure to elevated temperatures and natural cooling to room temperature. Normal strength and high strength concretes have been tested, as well as polypropylene and steel fibre reinforced concretes.

The bond strength has been measured using the pull-out test. Compressive and tensile strength have also been determined. Some specimens have been tested at an age of 28 days and at room temperature. At 60 days the tests have been repeated at room temperature and after heating up to three temperature ranges: 450°C, 650°C and 825°C. Before each of the three heating phases, the specimens were pre-heated during 3 hours at 120 °C.

After these experiments it has been possible to assess the loss of steel-concrete bonding for higher temperatures. The addition of fibres has no clear influence on the bonding at ambient condition. However, an improvement on the residual bonding strength has been observed for steel fibre reinforced concrete under high temperatures.

• **Key Words:** concrete, high strength concrete, materials characterization, high temperatures, steel-concrete bonding, fibre reinforced concrete.

### RESUMEN

En el conjunto de materiales de construcción habituales en la edificación y las obras de ingeniería, el hormigón destaca entre otras razones por su excelente comportamiento frente a las altas temperaturas y la exposición al fuego. El presente estudio se centra en la adherencia residual entre el hormigón y las barras de acero corrugado soldable tras exponer probetas a altas temperaturas y enfriarlas hasta temperatura ambiente por convección natural. El estudio incluye hormigones de resistencia convencional, hormigones de alta resistencia y hormigones reforzados con fibras de polipropileno y fibras de acero.

La adherencia hormigón-acero se ha medido mediante el conocido ensayo de *pull-out*. La campaña experimental también ha incluido la resistencia a compresión y la resistencia a tracción indirecta. Parte de las probetas se han ensayado a 28 días de edad a temperatura ambiente. A 60 días de edad se han repetido los ensayos a temperatura ambiente y se han realizado esos mismos ensayos en probetas calentadas en un horno industrial hasta tres rangos de temperatura: 450°C, 650°C y 825°C. Previo al proceso de calentamiento han sido sometidas durante 3 horas a un escalón de secado a 120°C.

Mediante la metodología propuesta ha sido posible caracterizar la evolución de la pérdida de adherencia residual entre el acero y el hormigón conforme se exponen los especímenes a temperaturas más elevadas. La adición de fibras no tiene una influencia clara en la adherencia a temperatura ambiente. Sin embargo, sí se ha conseguido determinar una mejora sustancial de la adherencia residual en los hormigones, reforzados con fibras de acero sometidos a altas temperaturas.

**Palabras Clave:** hormigón, hormigón de alta resistencia, caracterización de materiales, altas temperaturas, adherencia acero-hormigón, hormigón reforzado con fibras.

### 1. INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo XIX una de las características más importantes del hormigón como material estructural ha sido su buen comportamiento frente al fuego. La reglamentación internacional 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 resistencia a fuego (RF), métodos simplificados para la determinación de la resistencia de las secciones de elementos estructurales y métodos más avanzados con modelización numérica.

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 de aquella época: la fundición de acero. Hoy en día, la comparación con el acero estructural sigue siendo ventajosa para el hormigón. El hormigón puede estar sometido a altas temperaturas en situación accidental de incendio; pero también puede estar sometido a temperaturas elevadas en determinados procesos industriales (p. ej. los tanques de gasificación en centrales térmicas de carbón, donde se producen temperaturas de entre 1000°C y 2000°C [1]). 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 y siguen construyendo en hormigón.

La exposición de una estructura de hormigón armado a las elevadas temperaturas que se desarrollan en un incendio, afecta a su composición química 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 estos define su combustibilidad y su tendencia a propagar el fuego. Uno de los fenómenos que más perjuicio genera en el comportamiento estructural del hormigón en condiciones de incendio es el *spalling* o desprendimiento de las capas de hormigón más calientes. En este sentido, incendios relevantes en estructuras y túneles, tales como los ocurridos en el *Edificio Windsor* en 2005 (España) [2-6], túnel del Canal de la Mancha en 1996 (Francia-Inglaterra) [7-10], el túnel de Tauern en 1999 (Austria) [11] y el túnel de *Mont Blanc* en 1999 (Francia) [12] han mostrado que las condiciones de exposición térmica de incendios confinados con una elevada carga de combustible y un incremento rápido de las temperaturas, pueden provocar afectaciones muy severas a las estructuras de hormigón, manifestándose diversos fenómenos como el desconchamiento explosivo (*explosive spalling*). Ello provoca una disminución súbita de la sección resistente, comprometiendo la integridad de la estructura y su capacidad para soportar las cargas actuales.

Los hormigones de alta resistencia son sensibles al fenómeno de *explosive spalling* [13,14] debido a las bajas relaciones de agua/cemento y a su estructura más compacta. Actualmente, la forma más extendida de evitar el *spalling* es la dosificación de fibras de polipropileno monofilamento en el hormigón fresco [15-18]. La fusión de estas fibras en torno

a los 170°C crea en el hormigón una red capilar que permite liberar la presión de vapor del agua liberada por la descomposición de la porlandita entre los 450°C y 500°C. Estas fibras no tienen función estructural sino que su función es la de mejora de la resistencia al fuego del hormigón. De hecho, la normativa europea Eurocódigo 2-Parte 1-2: Proyecto de estructuras sometidas al fuego [19] hace referencia a este problema cuando la dosificación de humo de sílice en los hormigones de alta resistencia es superior al 6% del peso del cemento y recomienda dosificar al menos 2 kg/m<sup>3</sup> de fibras de polipropileno monofilamento.

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. Los reglamentos estructurales [19-21] no incluyen datos orientativos ni 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. Actualmente, existe poca bibliografía que trate este tema, aunque cabe destacar los trabajos de Milovanov y Salmanov (1954), Kasami et al. (1975), Diederichs y Schenider (1981), Morley y Royles (1983), Haddad y Shannis (2004), Haddad et al. (2008) y Foti (2014) [22-29].

El mecanismo resistente de las estructuras de hormigón armado depende fuertemente de la hipótesis de adherencia hormigón-acero. Este mecanismo puede verse gravemente comprometido cuando, en situación de incendio, se elevan las temperaturas de los materiales y se generan importantes gradientes a lo largo de un elemento estructural por la diferencia entre la conductividad térmica de ambos materiales. Por esta razón se plantea el presente estudio que pretende caracterizar la pérdida de adherencia en elementos de hormigón sometidos a altas temperaturas. Ello se va a realizar en tres tipos de hormigones: los de resistencia convencional, los de alta resistencia y los reforzados con fibras de acero.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. MATERIALES

En la campaña experimental se han utilizado distintos tipos de hormigones (Tabla 1) y barras de acero corrugado B500S con diámetros nominales de 10 y 12 mm. Todos los áridos empleados, arena y grava, son de tipo calizo y se han obtenido mediante machaqueo. La Tabla 1 presenta un resumen con las

Designación	Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	Tipo de cemento, según UNE-EN 197-1	Agua [kg/m <sup>3</sup> ]	Arena 0/4 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	Grava caliza 6/12 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	Humo de sílice [kg/m <sup>3</sup> ]	Fibras de polipropileno [kg/m <sup>3</sup> ]	Fibras de acero [kg/m <sup>3</sup> ]
HC	418	CEM II/B-L 32,5 R	230	694	1042	-	-	-
HRF	418	CEM II/B-L 32,5 R	230	694	1042	-	-	20
HAR	450	CEM I 52,5 R	173	835	835	45	3	-
HAR-RF	450	CEM I 52,5 R	173	835	835	45	3	20

Tabla 1: Dosificación de los hormigones ensayados

principales dosificaciones de los hormigones empleados en el estudio. Una vez hormigonadas las probetas, fueron mantenidas en sus respectivos moldes durante 24 horas y un vez desmoldadas, fueron conservadas hasta los 28 días de edad en un ambiente controlado ( $HR \geq 95\%$  y  $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ), según UNE-EN 12390-2. Entre los 28 y 60 días se conservaron en condiciones de laboratorio, a  $20^\circ\text{C}$  de temperatura y con una humedad relativa del 55% aproximadamente.

En una campaña experimental previa a este estudio, las probetas de HAR quedaron inutilizadas debido al fenómeno de explosive spalling cuando se calentaron en el horno. La Fig. 1 muestra cómo quedaron seis probetas cilíndricas de  $150 \times 300$  mm que estallaron cuando la sonda del horno marca una temperatura de  $522^\circ\text{C}$ .



Fig. 1: Explosive spalling en una campaña experimental previa al presente estudio

Las probetas pequeñas de *pull-out* no resultaron afectadas, debido a su menor tamaño y a la vía de escape del vapor de agua por la interfaz entre la barra corrugada y la probeta. Para evitar este problema, tal y como recoge la Tabla 1 y siguiendo lo recomendado en [19], se han añadido fibras de polipropileno en la dosificación de los HAR ensayados. Estas fibras no se han añadido con función de refuerzo estructural.

Las fibras empleadas en la campaña han sido de polipropileno 100%, con un diámetro de entre 31 y 35 micras y una longitud de 6 mm (ver Fig. 2). El punto de fusión indicado por el fabricante está entre  $163$  y  $170^\circ\text{C}$ . Las fibras de acero empleadas en la campaña han sido del tipo *hook-end* (ver Fig. 4) con un diámetro de  $0,75$  mm y una longitud de  $35$  mm. La

resistencia a tracción especificada por el fabricante es de  $1200$  MPa  $\pm 15\%$ . La dosificación elegida, reflejada en la Tabla 1, es la mínima prescrita por [20] para fibras con función de refuerzo estructural.

Con el fin de disponer de una muestra lo suficientemente representativa se han fabricado 3 probetas por cada tipo de ensayo (compresión, hendidamiento, *pull-out*), material (HC, HRF, HAR, HAR-RF) y temperatura alcanzada en el ensayo (28 días:  $T_{\text{amb}}$ , 60 días:  $T_{\text{amb}}$ ,  $450^\circ\text{C}$ ,  $650^\circ\text{C}$  y  $825^\circ\text{C}$ ), lo cual ha supuesto un total de 180 especímenes.

## 2.2. MÉTODO DE ENSAYO

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 ( $f_{ct}$ ) y adherencia  $t_b$  acero-hormigón. Estos ensayos se han llevado a cabo sobre cuatro tipos distintos de hormigones:

- Hormigón de resistencia convencional (HC).
- Hormigón de resistencia convencional reforzado con fibras de acero (HRF).
- Hormigón de alta resistencia (HAR)
- Hormigón de alta resistencia reforzado con fibras de acero (HAR-RF).

La resistencia  $f_c$  ha sido determinada mediante el ensayo de compresión según UNE-EN 12390-3 realizado sobre probetas cilíndricas de  $150$  mm de diámetro y  $300$  mm de altura. La resistencia  $f_{ct}$  ha sido obtenida a partir de la resistencia a tracción indirecta  $f_{ct,i}$  la cual, a su vez, ha sido determinada mediante el ensayo de hendidamiento o *brasileño*, según UNE-EN 12390-6. En este ensayo, una probeta cilíndrica se somete a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha y en toda su longitud. El resultado de la fuerza ortogonal resultante origina que la probeta rompa a tracción. El valor de la resistencia  $f_{ct,i}$  (expresada en MPa) se determina mediante la Ec. (1):

$$f_{ct,i} = \frac{2 \cdot C}{\pi \cdot L \cdot d} \quad (1)$$

Donde:  $C$  es la carga máxima alcanzada en el ensayo (expresada en N),  $L$  es la longitud de la probeta cilíndrica,  $L = 300$  mm,  $d$  es el diámetro de la probeta,  $d = 150$  mm.

Posteriormente, la resistencia a tracción  $f_{ct}$  se obtiene por aplicación de la Ec. (2) de acuerdo a lo indicado en el artículo



Fig. 2: Fibras de polipropileno (izquierda E 1:1 y centro: E 20:1) y de acero (derecha) empleadas en el estudio experimental

31.3 de la Instrucción EHE-08 [20] así como en el Eurocódigo 2 [19]:

$$f_{ct} = 0,90 \cdot f_{ct,i} \quad (2)$$

El procedimiento de ensayo prescrito por la Instrucción EHE-08 para medida de la adherencia  $t_b$  entre el acero corrugado soldable y el hormigón es el ensayo de la viga o *beam-test*, recogido en el Anejo C de la norma UNE-EN 10080. No obstante, debido a las incertidumbres que generaría el someter el montaje del *beam-test* a los escalones de temperaturas que se han establecido para la presente campaña (hasta 825°C), la adherencia va a ser caracterizada mediante el ensayo de *pull-out* según RILEM/CEB/FIP [30]. El esquema de realización de este ensayo se representa en la Fig. 3.

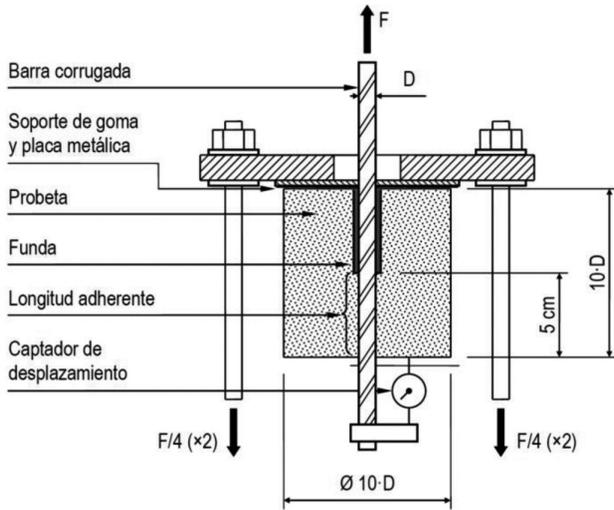


Fig. 3: Esquema del ensayo de adherencia por pull-out

La longitud de la zona de adherencia se ha acotado a 5 cm de acuerdo con las conclusiones expuestas en [31], según las cuales la ley de comportamiento para la adherencia local se obtiene de la curva  $t_b-s_u$  trazada con el ensayo de *pull-out*, donde:  $t_b$  se determina mediante la Ec. (3) y  $s_u$  es el deslizamiento relativo (*slip*) entre la probeta de hormigón y la barra de acero corrugado soldable, que mide el captador de desplazamiento en el extremo de la barra no cargado (*unloaded*).

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot D \cdot l_b} \quad (3)$$

En la Ec. (3)  $F$  es la fuerza aplicada en el extremo cargado de la barra de acero corrugado,  $D$  es el diámetro de dicha barra y  $l_b$  es la longitud adherente.

La funda indicada en la Fig. 3 tiene por objeto evitar la adherencia entre la barra y la probeta en la región donde la distribución de tensiones por reacción contra la placa rígida provoca un efecto de confinamiento que no desea medirse. Esta funda suele ser de plástico o de algún material similar.

Sin embargo, dadas las elevadas temperaturas a que van a someterse las probetas, la funda está hecha de papel, enrollado hasta alcanzar un espesor de 1 mm aproximadamente. En los ensayos de *pull-out* que se han llevado a cabo, las probetas ensayadas han sido cilíndricas, con las dimensiones siguientes:

- Hormigones de resistencia convencional (con y sin fibras de acero): probetas de 100 mm de diámetro y altura de 100 mm con barra corrugada Ø10.
- Hormigones de alta resistencia (con y sin fibras de acero): probetas de 120 mm de diámetro y altura de 120 mm con barra corrugada Ø12.

Los ensayos de compresión, tracción indirecta y *pull-out* se han realizado, para cada uno de los cuatro tipos de hormigones, de acuerdo a la siguiente metodología:

- Ensayos a temperatura ambiente a los 28 días de edad desde el hormigonado.
- Ensayos a temperatura ambiente a los 60 días de edad.
- Calentamiento de las probetas a los 60 días de edad hasta 450°C, enfriamiento por convección natural y realización de los ensayos para medida de las propiedades resistentes residuales.
- Calentamiento a 60 días hasta 650°C, enfriamiento y medida de las propiedades resistentes residuales.
- Calentamiento a 60 días hasta 825°C, enfriamiento y medida de las propiedades resistentes residuales.

El calentamiento de las probetas se ha llevado a cabo en un horno industrial eléctrico. La fase de calentamiento hasta las temperaturas de 450°C, 650°C ó 825°C ha sido precedida de un escalón de secado de 3 horas de duración a 120°C para eliminar al máximo posible la cantidad de humedad retenida. Las velocidades de calentamiento fueron de 6,5°C/min hasta los 650°C, y de 4,5°C/min posteriormente. La Fig. 4 muestra la evolución de la temperatura en el tiempo para cada uno de los escalones de calentamiento.

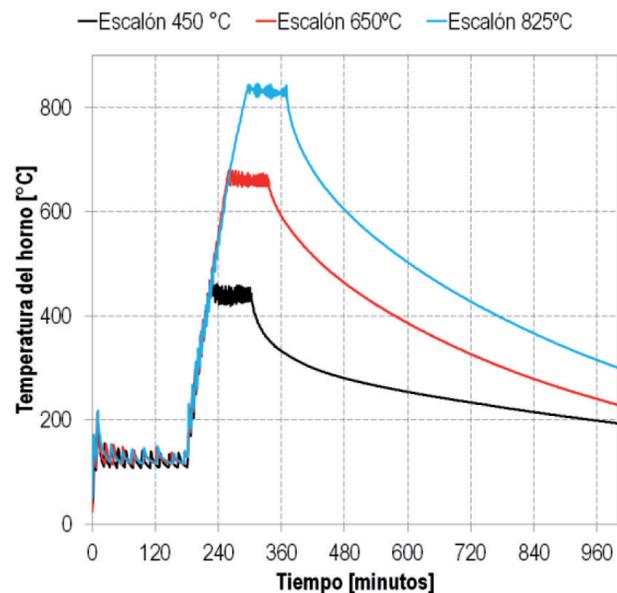


Fig. 4: Curva de calentamiento-enfriamiento para cada escalón de temperatura ensayado: 450°C, 650°C y 825°C.

### 3. RESULTADOS

Se recogen a continuación los resultados de los ensayos realizados. La Tabla 2 presenta la resistencia a compresión media en cada una de las fases de estudio para cada hormigón. En la Tabla 3 se muestra la resistencia a tracción media, obtenida del ensayo de hendimiento y aplicando la Ec. (2). En la Tabla 4 se expone la resistencia a la adherencia media en cada fase de estudio para cada hormigón; se ha determinado a partir de la máxima fuerza  $F_{máx}$  aplicada durante cada ensayo de *pull-out* y aplicando la Ec. (3). Además de los valores medios, en las Tablas 2, 3 y 4 se ha indicado también para cada fase y cada hormigón el coeficiente de variación correspondiente a

la muestra ensayada (la desviación estándar expresada como porcentaje de la media aritmética).

Las probetas cilíndricas de hormigón sin fibras de acero (tanto HC como HAR) ensayadas a hendimiento se partieron en dos trozos al alcanzar la máxima carga de ensayo. Por el contrario, en el caso de hormigón HC y HAR con fibras de acero, las probetas se fisuraron al alcanzar la máxima carga pero no se partieron, conservando resistencia residual a tracción.

Las Fig. 5 y 6 recogen las curvas tensión-deslizamiento obtenidas de los ensayos de *pull-out* realizados. En los ensayos de hormigón convencional la escala de deslizamiento se

	Resistencia a compresión, valor medio $f_{cm}$ [MPa] (entre paréntesis se indica el coeficiente de variación de la muestra)				
	28 días T <sup>a</sup> amb.	60 días T <sup>a</sup> amb.	60 días T <sub>máx</sub> = 450°C	60 días T <sub>máx</sub> = 650°C	60 días T <sub>máx</sub> = 825°C
Hormigón convencional (HC)	22,47 (3,1%)	27,47 (2,9%)	21,19 (1,2%)	9,80 (4,2%)	4,02 (3,8%)
HC + fibras de acero	24,04 (2,0%)	27,91 (1,2%)	22,12 (1,9%)	11,99 (2,1%)	5,00 (5,4%)
HAR + fibras de polipropileno (PP)	69,78 (13,2%)	84,86 (2,9%)	63,14 (7,4%)	40,89 (11,2%)	19,08 (24,1%)
HAR + fibras PP + fibras de acero	73,48 (3,5%)	89,48 (2,0%)	67,60 (7,8%)	44,71 (8,4%)	20,75 (6,2%)

Tabla 2: Resultados de la evolución de la resistencia a compresión en el estudio experimental

	Resistencia a tracción, valor medio $f_{ctm}$ [MPa] (entre paréntesis se indica el coeficiente de variación de la muestra)				
	28 días T <sup>a</sup> amb.	60 días T <sup>a</sup> amb.	60 días T <sub>máx</sub> = 450°C	60 días T <sub>máx</sub> = 650°C	60 días T <sub>máx</sub> = 825°C
Hormigón convencional (HC)	2,64 (8,5%)	2,09 (15,8%)	1,67 (4,9%)	0,71 (6,3%)	0,43 (4,4%)
HC + fibras de acero	2,51 (6,7%)	2,22 (3,5%)	1,97 (2,4%)	1,16 (5,1%)	0,52 (3,9%)
HAR + fibras de polipropileno (PP)	-	4,54 (12,7%)	3,08 (4,3%)	1,62 (23,2%)	0,90 (1,5%)
HAR + fibras PP + fibras de acero	-	5,71 (7,0%)	4,06 (7,5%)	2,21 (5,4%)	0,98 (15,6%)

Tabla 3: Resultados de la evolución de la resistencia a tracción en el estudio experimental

	Resistencia a adherencia, valor medio $t_{bm}$ [MPa] (entre paréntesis se indica el coeficiente de variación de la muestra)				
	28 días T <sup>a</sup> amb.	60 días T <sup>a</sup> amb.	60 días T <sub>máx</sub> = 450°C	60 días T <sub>máx</sub> = 650°C	60 días T <sub>máx</sub> = 825°C
Hormigón convencional (HC)	19,59 (6,5%)	19,33 (4,3%)	13,56 (11,8%)	5,73 (6,1%)	2,13 (6,6%)
HC + fibras de acero	13,54 (2,7%)	16,09 (3,6%)	13,90 (3,2%)	7,43 (5,7%)	2,45 (7,7%)
HAR + fibras de polipropileno (PP)	28,23 (6,8%)	31,14 (9,8%)	21,81 (8,1%)	13,24 (2,3%)	4,19 (10,1%)
HAR + fibras PP + fibras de acero	28,95 (5,4%)	30,06 (6,1%)	23,86 (16,6%)	15,41 (8,2%)	4,73 (14,2%)

Tabla 4: Resultados de la evolución de la resistencia máxima a adherencia en el estudio experimental

ha acotado a 6,5 mm, que es la separación entre corrugas consecutivas para la barra de acero corrugado B500S de diámetro nominal de 10 mm. En el caso de las probetas de hormigón de alta resistencia, en las que la barra empleada es de diámetro nominal 12 mm, la escala del deslizamiento se ha acotado a 7,2 mm, que es la separación entre corrugas consecutivas para la barra de acero corrugado B500S.

gráfico de la izquierda de la Fig. 7 representa la pérdida de resistencia en las probetas de hormigón convencional objeto del presente estudio, como porcentaje respecto de la resistencia media de probetas que no se han calentado por encima de la temperatura ambiente a la edad de ensayo (60 días). Los resultados experimentales se contrastan en dicho gráfico con la curva de pérdida de resistencia propuesta por el Eurocódigo

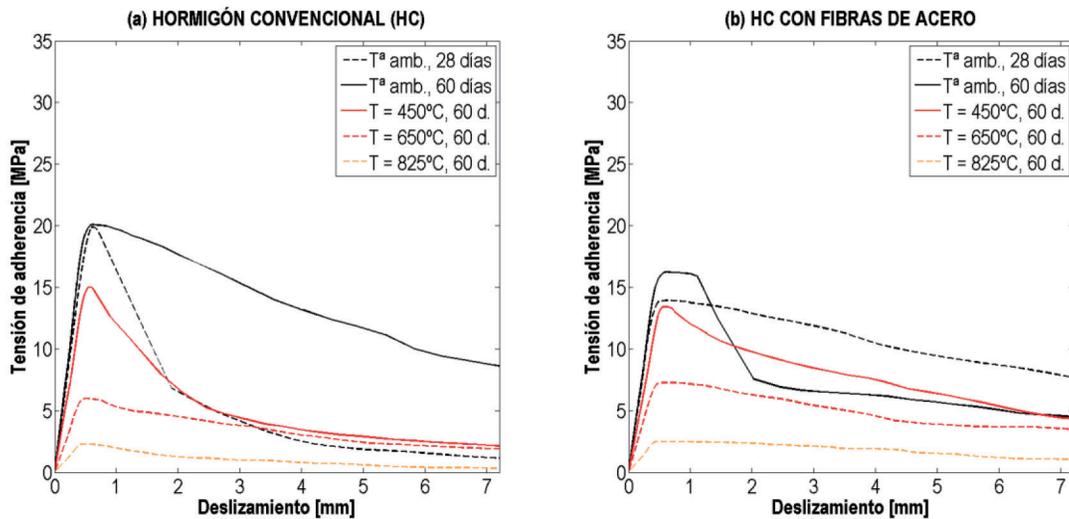


Fig. 5: Curvas de adherencia-deslizamiento. HC sin fibras de acero (a) y con fibras (b)

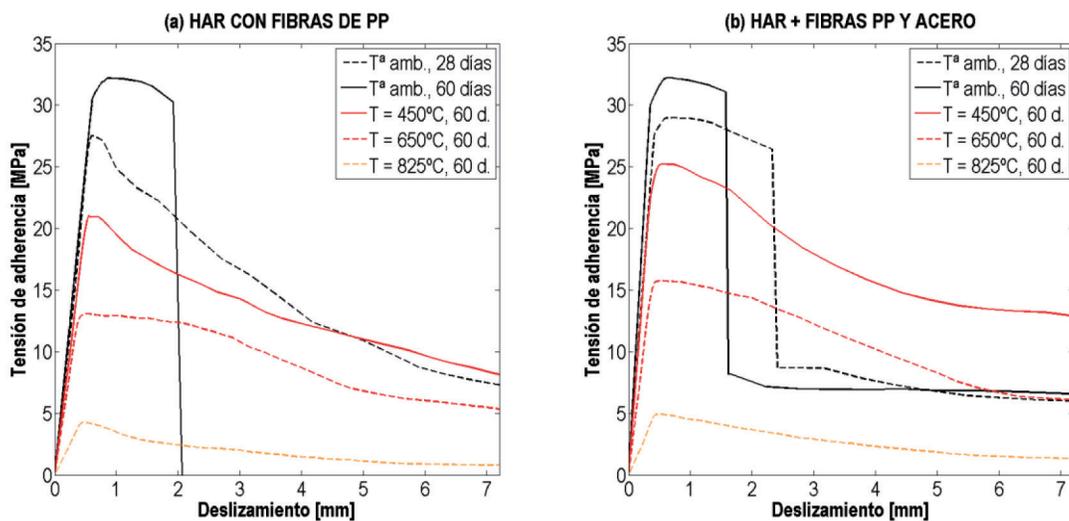


Fig. 6: Curvas de adherencia-deslizamiento. HAR con fibras de PP: sin fibras de acero (a) y con fibras (b)

#### 4. DISCUSIÓN

En lo que respecta a la eficiencia de las fibras de acero en el comportamiento del hormigón a temperatura ambiente, la Tabla 2 permite apreciar que la resistencia a compresión prácticamente no se ve afectada, lo cual es acorde a lo observado en otros estudios [32-33]. En el caso de la resistencia a tracción, tampoco se aprecian mejoras sustanciales por el empleo de fibras de acero aunque, como ya se ha comentado, las probetas cilíndricas con fibras de acero ensayadas a hendimiento conservaron una resistencia residual a tracción.

En la Fig. 7 se muestra la evolución de la resistencia a compresión en hormigones sometidos a altas temperaturas. El

2, Parte 1-2 [19] para hormigones con áridos calizos, que han sido los empleados en la fabricación de las probetas.

En el gráfico de la derecha de la Fig. 7 se representa la evolución de la resistencia a compresión con la temperatura en las probetas de HAR ensayadas. En este caso, los resultados se contrastan con las curvas propuestas en [19] para los HAR. Los marcadores de color verde corresponden a HAR de clase 1 (HAR-1), que son aquellos con resistencia característica de 55 MPa y 60 MPa, a 28 días de edad. Los marcadores de color naranja corresponden a HAR de clase 2 (HAR-2), con resistencias características de 70 MPa y 80 MPa a 28 días. Dados los resultados experimentales obtenidos a 28 días, las probetas

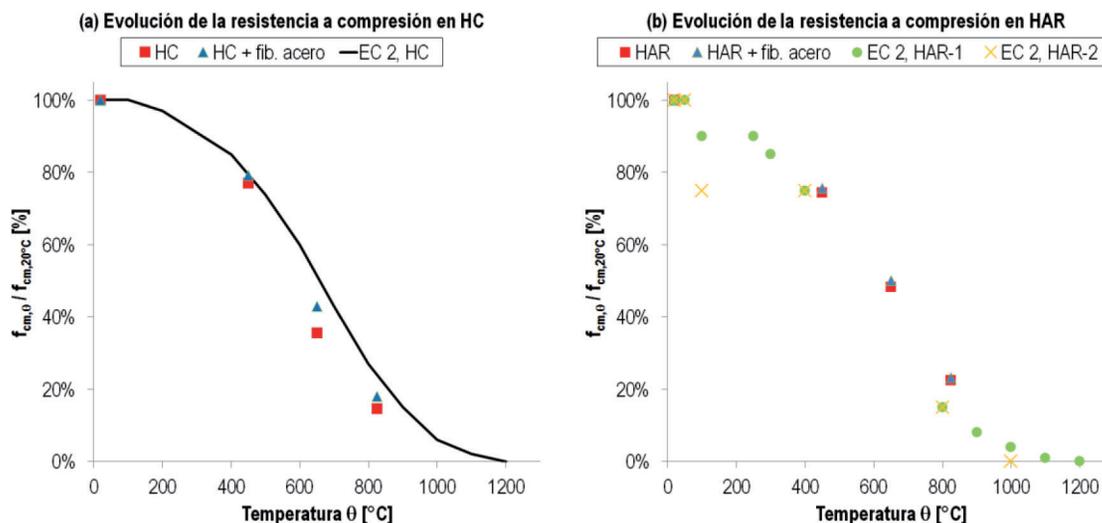


Fig. 7: Resistencia residual a compresión en hormigones sometidos a altas temperaturas: (a) hormigón convencional y (b) hormigón de alta resistencia

de HAR estudiadas corresponderían a hormigones de la clase 2 (HAR-2).

Los gráficos anteriores permiten extraer dos conclusiones relevantes. En primer lugar, los resultados experimentales obtenidos en HC y en HAR sin fibras de refuerzo estructural coinciden satisfactoriamente con lo propuesto por la reglamentación europea, aunque en el caso de los HC la curva de pérdida de resistencia de [19] estaría ligeramente del lado de la inseguridad. En segundo lugar, la incorporación de fibras de acero (en la dosificación estudiada de 20 kg/m<sup>3</sup>) prácticamente no produce mejora de resistencia con la temperatura en los HAR, aunque sí se aprecia un leve incremento de resistencia en los HC en el rango de los 650°C.

En la Fig. 8 se representa la evolución de la resistencia a tracción en los ensayos realizados sobre HC y HAR. En el caso del HC se contrasta la tendencia con lo regulado por el Eurocódigo 2, Parte 1-2 [19]. Para el caso de los HAR no se recoge recomendación alguna en [19]. Adicionalmente, la Fig. 8 contrasta los resultados experimentales con los límites inferior y superior recogidos por Bazant y Kaplan [1]. Los resultados experimentales en HC están notablemente del lado de la

inseguridad respecto de la recomendación del Eurocódigo 2 y quedan aproximadamente en el límite superior propuesto por Bazant y Kaplan [1].

Tal y como se aprecia en la Fig. 8, en lo referente a la influencia de las fibras de acero, estos resultados experimentales parecen apuntar a una apreciable mejora de la resistencia a tracción en el escalón de los 650°C en el caso de los hormigones de resistencia convencional. En este mismo escalón, en el caso del HAR la presencia de las fibras de acero apenas tiene influencia. En cuanto al escalón de 825°C, la resistencia residual a tracción está en torno al 20% tanto para los HC como para los HAR y las fibras de acero no tienen capacidad de mejora. Tras los ensayos mecánicos se observó la aparición de una capa de óxidos alrededor de las fibras de acero calentadas hasta 825°C. Por ello se decidió medir el diámetro de las fibras embebidas en cada hormigón, una vez retirada dicha capa de óxidos. Efectivamente en las fibras calentadas como máximo a 650°C no se apreció pérdida alguna de sección. Mientras que por el contrario las fibras que alcanzaron los 825°C presentaron una disminución de su diámetro de 0,09 ± 0,01 mm. Por tanto, la pérdida de sección resistente de dichas fibras tras lle-

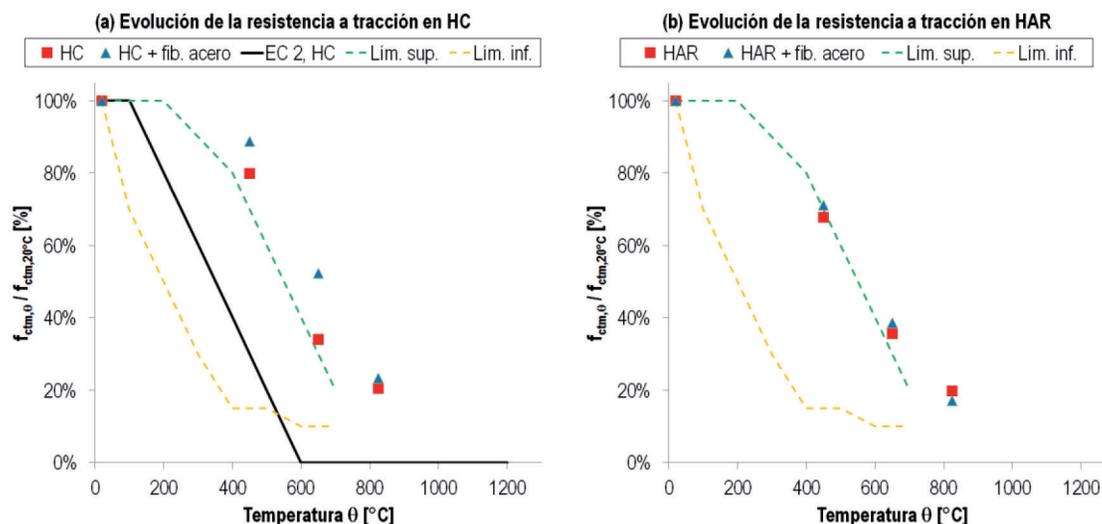


Fig. 8: Resistencia residual a tracción en hormigones sometidos a altas temperaturas: (a) hormigón convencional y (b) hormigón de alta resistencia

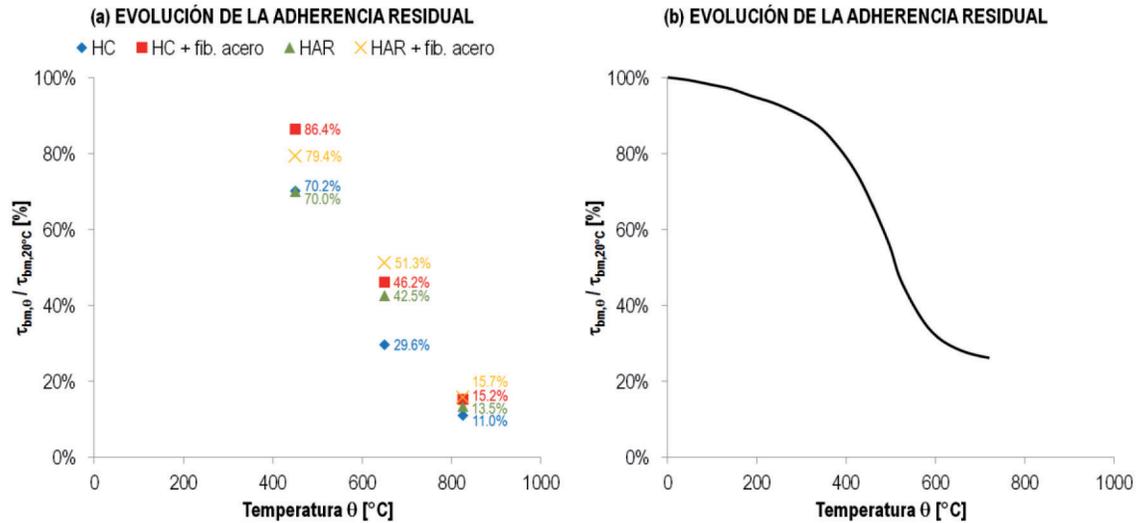


Fig. 9: Adherencia residual con respecto a la adherencia a 20°C en: (a) hormigones ensayados en el presente estudio; (b) curva adaptada de Diederichs y Schneider [24], para hormigones convencionales

gar a un rango tan elevado de temperatura, así como la merma de capacidad adherente de las mismas a la matriz de hormigón (debido a la capa de óxidos), sean las causantes de la pérdida de eficiencia del refuerzo de fibras una vez alcanzados los 825°C.

Los gráficos de la Fig. 9 recogen la evolución de la adherencia residual con la temperatura, con respecto a la adherencia a temperatura ambiente. En el caso de las probetas de hormigón sin fibras de acero para refuerzo estructural, se observa un mejor comportamiento de la adherencia con la temperatura en los hormigones de alta resistencia.

De la Fig. 9(a), cabe destacar el escalón de los 650°C, en el que la resistencia residual es de un 42,5% en el HAR, frente a un 29,6% en el HC. En lo que respecta a la eficiencia de las fibras de acero en la evolución de la adherencia con la temperatura, en ambos tipos de hormigón y en todos los escalones han contribuido a controlar la pérdida de adherencia respecto del hormigón sin fibras de acero. En el escalón del valor residual tras calentamiento hasta 650°C, la mejora de la adherencia con refuerzo de fibras de acero ha sido de un 56,1% en el caso del HC, aunque sólo de un 20,7% en el caso del HAR.

Por otro lado, los resultados experimentales de la evolución de la adherencia con la temperatura obtenidos en hormigón convencional han arrojado una adherencia residual del 70,2% y del 29,6% tras calentamiento a 450°C y 650°C, respectivamente. Estos resultados coinciden satisfactoriamente con los de Diederichs y Schneider [24] que se representan en la Fig. 9(b), correspondientes a ensayos de pull-out, según RILEM [30], realizados en barras de acero corrugado soldable embebidas en hormigón convencional.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha expuesto una metodología experimental para evaluar la pérdida de adherencia entre acero corrugado y hormigón a altas temperaturas en distintos tipos de hormigón.

Con la excepción de la resistencia residual a tracción, medida mediante el ensayo de hendimiento o brasileño, la evolu-

ción de las propiedades residuales de hormigones sin adición de fibras a altas temperaturas es conforme a lo anticipado en la bibliografía reseñada.

Los estudios permiten concluir que la adición de fibras cortas de acero al hormigón convencional y de alta resistencia, en una dosificación de 20 kg/m<sup>3</sup>, permiten mejorar las propiedades residuales de resistencia a tracción y la ley local de adherencia a altas temperaturas. Se han obtenido mayores incrementos en la resistencia local a adherencia en los hormigones convencionales con fibras de acero frente a los de alta resistencia con fibras de acero.

Por otro lado, en las leyes de adherencia vs. deslizamiento que se han obtenido mediante los ensayos de pull-out realizados, se observa que la adición de fibras de acero mejora la rigidez en el tramo de carga hasta el valor máximo de resistencia, tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas.

La resistencia de adherencia residual y la rigidez de la ley de adherencia son parámetros importantes a la hora de estudiar el comportamiento de los nudos de anclaje de los elementos de hormigón armado y su capacidad de disipación de energía frente a acciones sísmicas. Este estudio permite concluir que la adición de fibras de acero a los hormigones convencionales y de alta resistencia tiene efectos positivos en dichos parámetros. Profundizar en la línea de investigación planteada en este trabajo permitiría llegar a optimizar el diseño y la cuantía del armado en estructuras de hormigón mediante la adición de fibras.

Para ello, se propone como futuras líneas de investigación ampliar el estudio con mayores dosificaciones de fibras de acero, para contrastarlo con otros recientes estudios experimentales (Hameed et al. [34]), así como estudiar la influencia de la geometría de fibra de acero y su relación de aspecto (longitud vs. diámetro) en el comportamiento residual a altas temperaturas.

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha podido ser llevado a cabo gracias a la colaboración de CEMEX, BASF, ArcelorMittal y Grupo

FerroAtlántica, a quienes los autores desean expresar su más sincero agradecimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bazant ZP, Kaplan MF. "Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models". 1st Edition. Longman, 1996. 424p. ISBN 978-0582086265.
- [2] Flint G, Lamont S, Lane B, Sarrazin H, Lim L, Rini D, Roben C. "Recent Lessons Learned in Structural Fire Engineering for Composite Steel Structures", *Fire Technology*. Julio 2013. Vol. 49-3, P. 767-792 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-012-0291-8>).
- [3] Capote Abreu J, Alvear D, Lázaro M, Crespo J, Fletcher I, Welch S, Torero J. "Modelling of the Thermal Stresses of Concrete Structural Elements in Tall Buildings Under Natural Fires", *Informes de la Construcción*. Abril-Junio 2011. Vol. 63-522. P. 83-91 (DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.09.005>).
- [4] Pérez-Martín JC, Díaz-Díaz R, Santos-García R. "Fire Risk Assessment Method under the Technical Building Code", *Dyna*. Mayo 2010. Vol. 85-4. P. 303-314.
- [5] Menéndez E, Vega L. "Analysis of the Behaviour of the Structural Concrete after the Fire at the Windsor Building in Madrid", *Fire and Materials*. Marzo 2010. Vol. 34-2. P. 95-107 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/fam.1013>).
- [6] Montalva APE, Pons i Frigola V, Herrera O et al. "A Catastrophic Collapse: Windsor Building Fire (Madrid, 2005)". En: *Proceedings of the 4th International Conference on Forensic Engineering*. (Londres 2008), P. 372-382.
- [7] Carvel R. "Lessons Learned From Catastrophic Fires in Tunnels", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*. Noviembre 2008. Vol. 161-6. P. 49-53 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/cien.2008.161.6.49>).
- [8] Beard AN. "A Theoretical Model of Major Fire Spread in a Tunnel", *Fire Technology*. Abril 2006. Vol. 42-4. P. 303-328 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-006-7253-y>).
- [9] Msaad Y, Bonnet G. "Analyses of Heated Concrete Spalling due to Restrained Thermal Dilation: Application to the "Chunnel" Fire", *Journal of Engineering Mechanics*. Enero 2006. Vol. 132-10. P. 1124-1132 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2006\)132:10\(1124\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:10(1124))).
- [10] Kirkland CJ. "The fire in the Channel Tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*. Abril 2002. Vol. 17-2. P. 129-132 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(02\)00014-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(02)00014-7)).
- [11] Leitner A. "The Fire Catastrophe in the Tauern Tunnel: Experience and Conclusions for the Austrian Guidelines", *Tunnelling and Underground Space Technology*. Julio 2001. Vol. 16-3. P. 217-223 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00042-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00042-6)).
- [12] Faure RM, Karray M. "Investigation of the Concrete Lining after the Mont Blanc Tunnel Fire", *Structural Engineering International: Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE)*. Mayo 2007. Vol. 17-2. P. 123-132 (DOI: <http://dx.doi.org/10.2749/101686607780680763>).
- [13] Sanjayan G, Stocks LJ. "Spalling of High-Strength Silica Fume Concrete in Fire", *ACI Materials Journal*. Marzo 1993. Vol. 90-2. P. 170-173.
- [14] Kodur VR, Sultan MA. "Effect of Temperature on Thermal Properties of High-Strength Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*. Abril 2003. Vol. 15-2. P. 101-107 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2003\)15:2\(101\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(101))).
- [15] Bilodeau A, Malhotra VM, Hoff GC. "Hydrocarbon Fire Resistance of High Strength Normal Weight and Light Weight Concrete Incorporating Polypropylene Fibres". En: *Proceedings of the International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concretes*. (Sherbrooke 1998), P. 271-296.
- [16] Kodur VKR, Wang TC, Cheng FP. "Predicting the Fire Resistance Behaviour of High Strength Concrete Columns", *Cement and Concrete Composites*. Febrero 2004. Vol. 26-2. P.141-153 (DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00089-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00089-1)).
- [17] Blossfeld J, Kaundinya I. "Latest Developments of Structural Fire Protection for German Road Tunnels". En: *Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop*. (Delft 2011), P. 247-254.
- [18] Capote-Abreu JA, Alvear-Portilla MD, Crespo-Álvarez J. "Análisis experimental de hormigones expuestos al fuego. Evaluación de variables hidro-térmicas", *Dyna*. Octubre 2011. Vol. 86-5. P. 575-584.
- [19] CEN/TC250, AEN/CTN 140. UNE-EN 1992-1-2:2011 "Eurocódigo 2: Proyecto de Estructuras de Hormigón. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de Estructuras Sometidas al Fuego", AENOR. Abril 2011.
- [20] Ministerio de Fomento, CPH. "Instrucción Española de Hormigón Estructural. EHE-08". 5ª Edición. Madrid 2011. ISBN 978-8449808999.
- [21] ACI Committee 318. "ACI 318-11: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". ISBN 978-0870317446.
- [22] Milovanov AF, Salmanov GD. "The Influence of High Temperatures upon the Properties of Reinforcing Steels and Bond Strength between Reinforcement and Concrete", *Issledovaniya po Zharoupornym Betonu i Zhelezobetonu*. 1954. P.203-223.
- [23] Kasami H, Okuno T, Yamane S. "Properties of Concrete Exposed to Sustained Elevated Temperature". En: *Transactions of the 3rd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. (Londres 1975). Vol. 3. Paper H1/5.
- [24] Diederichs U, Schneider U. "Bond Strength at High Temperatures", *Magazine of Concrete Research*. Junio 1981. Vol. 33-115. P. 75-84.
- [25] Morley PD, Royles R. "Response of the Bond in Reinforced Concrete to High Temperatures", *Magazine of Concrete Research*. Junio 1983. Vol. 35-123. P. 67-74.
- [26] Haddad RH, Shannis LG. "Post Fire Behavior of Bond between High Strength Pozzolanic Concrete and Reinforcing Steel", *Construction and Building Materials*. Marzo 2004. Vol. 18. P. 425-435 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.006>).
- [27] Haddad RH, Al-Saleh RJ, Al-Akhras NM. "Effect of Elevated Temperature on Bond between Steel Reinforcement and Fiber Reinforced Concrete", *Fire Safety Journal*. Diciembre 2007. Vol. 43. P. 334-343 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.11.002>).
- [28] Ferhat Bingöl A, Gül R. "Residual Bond Strength between Steel Bars and Concrete after Elevated Temperatures", *Fire Safety Journal*. Mayo 2009. Vol. 44. P. 854-859 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.04.001>).
- [29] Foti D. "Prestressed slab beams subjected to high temperatures", *Composites Part B - Engineering*. Marzo 2014. Vol. 58. P. 242-250 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.083>).
- [30] RILEM/CEB/FIP. "Bond Test for Reinforcing Steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7-II-128): Tentative Recommendations", *Materials and Structures*. 1973. Vol. 6-32. P. 96-105.
- [31] Windisch A. "A Modified Pull-out Test and New Evaluation Methods for a More Real Local Bond-Slip Relationship", *Materials and Structures*. Mayo-Junio 1985. Vol. 18-3. P. 181-184 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472967>).
- [32] Giner VT, Baeza FJ, Ivorra S et al. "Effect of Steel and Carbon Fiber Additions on the Dynamic Properties of Concrete Containing Silica Fume", *Materials and Design*. Febrero 2012. Vol. 34. P. 332-339 (DOI: [10.1016/j.matdes.2011.07.068](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.068)).
- [33] Hsu LS, Hsu CTT. "Stress-strain behavior of steel-fiber high-strength concrete under compression", *ACI Structural Journal*. 1994. Vol. 91(4). P. 448-457 (DOI: <http://dx.doi.org/10.14359/4152>).
- [34] Hameed R, Turatsinze A, Duprat F, Sellier A. "Bond stress-slip behaviour of steel reinforcing bar embedded in hybrid fiber reinforced concrete", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2013, Vol. 17(7), P.1700-1707 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-013-1240-x>).