

# COMPORTAMIENTO DE LAS ARMADURAS ACTIVAS DESPUÉS DE UN FUEGO

José Miguel ATIENZA RIERA

Dr. Ingeniero de Caminos

Universidad Politécnica de Madrid

Prof. Contratado Doctor

[jmatienza@mater.upm.es](mailto:jmatienza@mater.upm.es)

Manuel ELICES CALAFAT

Dr. Ingeniero de Caminos

Universidad Politécnica de Madrid

Catedrático

[melices@mater.upm.es](mailto:melices@mater.upm.es)

## Resumen

Después de un fuego, aunque una estructura no haya colapsado y ni siquiera se hayan producido daños aparentes, resulta imprescindible evaluar si sigue siendo segura, porque tanto las propiedades mecánicas de los materiales como la distribución de cargas pueden haberse visto afectadas. En los últimos años, el comportamiento a altas temperaturas de los materiales de construcción se ha caracterizado exhaustivamente con objeto de aplicarlo en el diseño de estructuras capaces de resistir el fuego. Sin embargo, apenas se ha prestado atención a la situación post-incendio. En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de las armaduras activas después de sufrir un incendio; Se muestra que el fuego puede provocar daños no-visibles tanto en el material (deteriorando sus propiedades mecánicas) como en la distribución de cargas de la estructura (reduciendo la fuerza de pretensado al aumentar las pérdidas por relajación de los tendones). Ambos efectos pueden perjudicar la capacidad resistente de la estructura. Se aportan datos experimentales para estimar estos daños y ayudar en la evaluación de la seguridad estructural después del fuego.

**Palabras Clave:** pretensado, armaduras activas, acero estructural, fuego, temperatura, relajación, propiedades mecánicas, resistencia, seguridad estructural.

## 1. Introducción

Los efectos del fuego sobre las estructuras se han investigado desde hace más de cincuenta años. Las altas temperaturas alcanzadas durante un fuego afectan al comportamiento de una estructura, ya que disminuyen las propiedades mecánicas de los materiales y redistribuyen las cargas, fruto de las dilataciones impuestas que, al no ser en general libres, originan los esfuerzos correspondientes. El comportamiento de los materiales de construcción a altas temperaturas juega un papel fundamental en la respuesta al fuego de las estructuras, que se ha convertido en un asunto de gran actualidad.

El comportamiento esperado de una estructura resistente al fuego es el de soportar las cargas de diseño incluso durante el fuego. Se considera que un elemento estructural falla cuando se supera su capacidad resistente, lo que podría llegar a significar el colapso estructural si la transferencia de la carga a los elementos adyacentes no se logra de forma adecuada. Hoy la filosofía de diseño contra el fuego de las estructuras de hormigón está basada principalmente en procedimientos normalizados que permiten asegurar la estabilidad estructural en un fuego durante un periodo de tiempo suficiente que permita a la gente escapar y a los servicios de emergencia actuar para extinguirlo [1-9]. Esto constituye la base del dimensionado de las estructuras frente a la acción del fuego que en España se debe hacer de acuerdo a la EHE [4] y el Eurocódigo 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural FIRE design [3]. Recientemente el Ministerio de Vivienda ha aprobado el nuevo Código Técnico de la Edificación que en el Documento Básico sobre Seguridad de Incendios [5] aporta un nuevo enfoque a este tema, lo cual demuestra su importancia y actualidad.

Con estos objetivos, en las últimas décadas se ha realizado un trabajo experimental importante para caracterizar el comportamiento de los materiales de construcción a altas temperaturas [10-14]. Sin embargo, apenas se ha prestado atención al comportamiento después de un fuego. Pasado el incendio, aunque la estructura no haya colapsado, existe la posibilidad de que se hayan producido daños irreversibles, que dependerán de la intensidad y duración del fuego, pero también de la geometría y los materiales utilizados en la construcción y de las cargas que soportan. Es posible que

la estructura deba ser reemplazada o bien sea posible seguir utilizándola tal como está o después de unas reparaciones parciales. El aspecto económico, por supuesto, también es una cuestión a tener en cuenta y puede llevar en algunos casos a provocar la demolición de la estructura antes que realizar las reparaciones necesarias. En cualquier caso, resulta imprescindible evaluar si la estructura sigue siendo segura (cuál es su capacidad portante y cómo se ha visto afectada por el fuego), incluso aunque aparentemente no haya sufrido ningún daño. El conocimiento del comportamiento de los materiales después de haber sufrido un incendio resulta fundamental para responder a estas preguntas.

El objetivo de este trabajo es entender los efectos del fuego sobre el comportamiento post-incendio de las armaduras activas. Para ello se ha sometido a alambres de pretensado, cargados en situación de servicio, a los efectos de distintos escenarios de fuego, caracterizando los daños producidos:

- El deterioro permanente en las propiedades de los materiales, especialmente en su resistencia y límite elástico
- La reducción en la carga de pretensado motivada por el incremento en la relajación de tensiones generada por la exposición a altas temperaturas

Este artículo busca poner de manifiesto y dar una estimación conservativa de los daños no-visibles que puede provocar el fuego en las armaduras activas del hormigón pretensado, con el objetivo de proporcionar una herramienta sencilla que pueda resultar de utilidad en la evaluación de la seguridad estructural después de un incendio.

## **2. Experimental: Caracterización del comportamiento de las armaduras activas después del fuego**

Como se ha comentado en la Introducción, en la literatura se pueden encontrar muchos datos experimentales sobre las propiedades mecánicas (resistencia y límite elástico) tanto del hormigón como del acero estructural a altas temperaturas [1-14]. Esta información ha sido fundamental para predecir el comportamiento de las estructuras durante el incendio y permitir el diseño de estructuras resistentes al fuego. Sin embargo, apenas se ha prestado atención a las propiedades mecánicas residuales de los materiales después del fuego, aunque pueden haberse visto fuertemente deterioradas por las altas temperaturas alcanzadas. El conocimiento de dichos cambios es muy importante para evaluar la seguridad de una estructura después del incendio.

Un aspecto adicional que hasta ahora tampoco se había tenido en cuenta y que no debería olvidarse a la hora de evaluar la capacidad resistente residual de la estructura, es el incremento en las pérdidas por relajación en las armaduras activas producido por la exposición a altas temperaturas. Por definición, la relajación de tensiones se refiere al descenso de la tensión a lo largo del tiempo que sufre un alambre cuando se encuentra sometido a una deformación constante. En el caso de los elementos pretensados es muy importante que a lo largo de la vida del componente no haya una pérdida de tensión apreciable, porque una reducción en la carga de pretensado podría afectar a la seguridad de la estructura. Por esto, los Códigos de diseño imponen unos límites muy estrictos a las pérdidas por relajación de los alambres. No obstante, no hay que olvidar que la temperatura tiene una gran influencia en la relajación; un incremento de la temperatura aumenta de forma considerable las pérdidas por relajación en los alambres. Por tanto, el paso por un incendio previsiblemente provocará un descenso de la fuerza de pretensado en la estructura. Sin embargo, hasta ahora, en la literatura sólo se aportaban datos de relajación para temperaturas inferiores a 200 °C.

En resumen, en este trabajo se ha realizado una campaña experimental detallada para examinar los dos aspectos principales que podrían afectar el comportamiento de las armaduras activas después del fuego: las propiedades mecánicas residuales de la armadura y la pérdida de carga de pretensado producida por el incremento de las pérdidas por relajación en la armadura a alta temperatura.

### **2.1 Relajación de tensiones durante un fuego**

Las pérdidas de tensión por relajación de las armaduras se miden mediante ensayos normalizados (ASTM E328, ISO 15630/3, EHE 38.9) y los datos deben ser aportados por los fabricantes para la aceptación de los alambres; aquellos con unas pérdidas por relajación inferiores al 2.5% de la carga inicial (70% de la carga de rotura), después de 1.000 horas a temperatura ambiente, se denominan "alambres de baja relajación" y son los utilizados para el hormigón pretensado actualmente.

Durante un fuego, las temperaturas sufridas por los alambres pueden ser sensiblemente superiores. Como no se encontraron datos suficientes en la literatura, se consideró que era necesaria una campaña experimental para estudiar la influencia de la temperatura en las pérdidas por relajación durante un fuego. En este trabajo se han realizado ensayos de relajación a diferentes temperaturas sobre alambres de pretensado de 5 mm de diámetro para evaluar la pérdida de tensión producida por una exposición prolongada a altas temperaturas. Para ello se ha empleado una máquina de ensayos Instron 8803, con una célula de carga de 10 Tn y un horno acoplado a la máquina con control de temperatura de  $\pm 2.5^\circ\text{C}$  (Figura 1).



Fig. 1. Dispositivo experimental utilizado en este trabajo: máquina de ensayos mecánicos, horno y extensómetro para altas temperaturas.

La duración de los ensayos ha sido de 4 horas (que supera la duración de los incendios-tipo propuestos en las distintas normas [15]). Las temperaturas estudiadas han sido: 20, 100, 200, 300, 400, 500 y 600 °C. El límite del estudio se consideró 600 °C porque a partir de 700 °C, al producirse cambios importantes en la microestructura del acero, la resistencia del alambre sufre un descenso tan acentuado que casi puede considerarse despreciable y suele colapsar.

Si bien lo normal es que en servicio los alambres de pretensado aguanten cargas en torno al 60-70% de su resistencia, en el caso de un fuego el proceso de calentamiento provoca una dilatación de los materiales involucrados que, en función de las condiciones de contorno, suele producir una reducción de las cargas de tracción a las que están sometidos los elementos estructurales. Para evaluar las diferentes posibilidades se han variado las cargas iniciales de los ensayos (10-30-50-70-90 % de su resistencia), desde las más bajas hasta las más altas que permitía la resistencia de los alambres a cada temperatura. Se han realizado 2 ensayos para cada carga-temperatura sin encontrar variaciones significativas en los resultados de los mismos. En la Tabla 1 se recogen los ensayos realizados.

Tabla 1. Ensayos de relajación realizados. Temperatura en °C y carga inicial como % de la Resistencia  $F_m$ .

|           | 20 °C | 100 °C | 200 °C | 300 °C | 400 °C | 500 °C | 600 °C |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10% $F_m$ | X     | X      | X      | X      | X      | X      | X      |
| 30% $F_m$ | X     | X      | X      | X      | X      | X      | Rompe  |
| 50% $F_m$ | X     | X      | X      | X      | X      | Rompe  |        |
| 70% $F_m$ | X     | X      | X      | X      | Rompe  |        |        |
| 90% $F_m$ | X     | X      | X      | Rompe  |        |        |        |

En la Figura 2 se muestran las curvas de relajación durante las primeras 4 horas en función de la temperatura para las distintas cargas iniciales. Como se puede apreciar, la temperatura incrementa de forma notable las pérdidas por relajación, por lo que parece imprescindible tener en cuenta este aspecto para evaluar el daño producido por el fuego en la estructura. Los datos aportados en esta figura podrían utilizarse para obtener una estimación rápida de la pérdida de fuerza de pretensado provocada por un incendio.

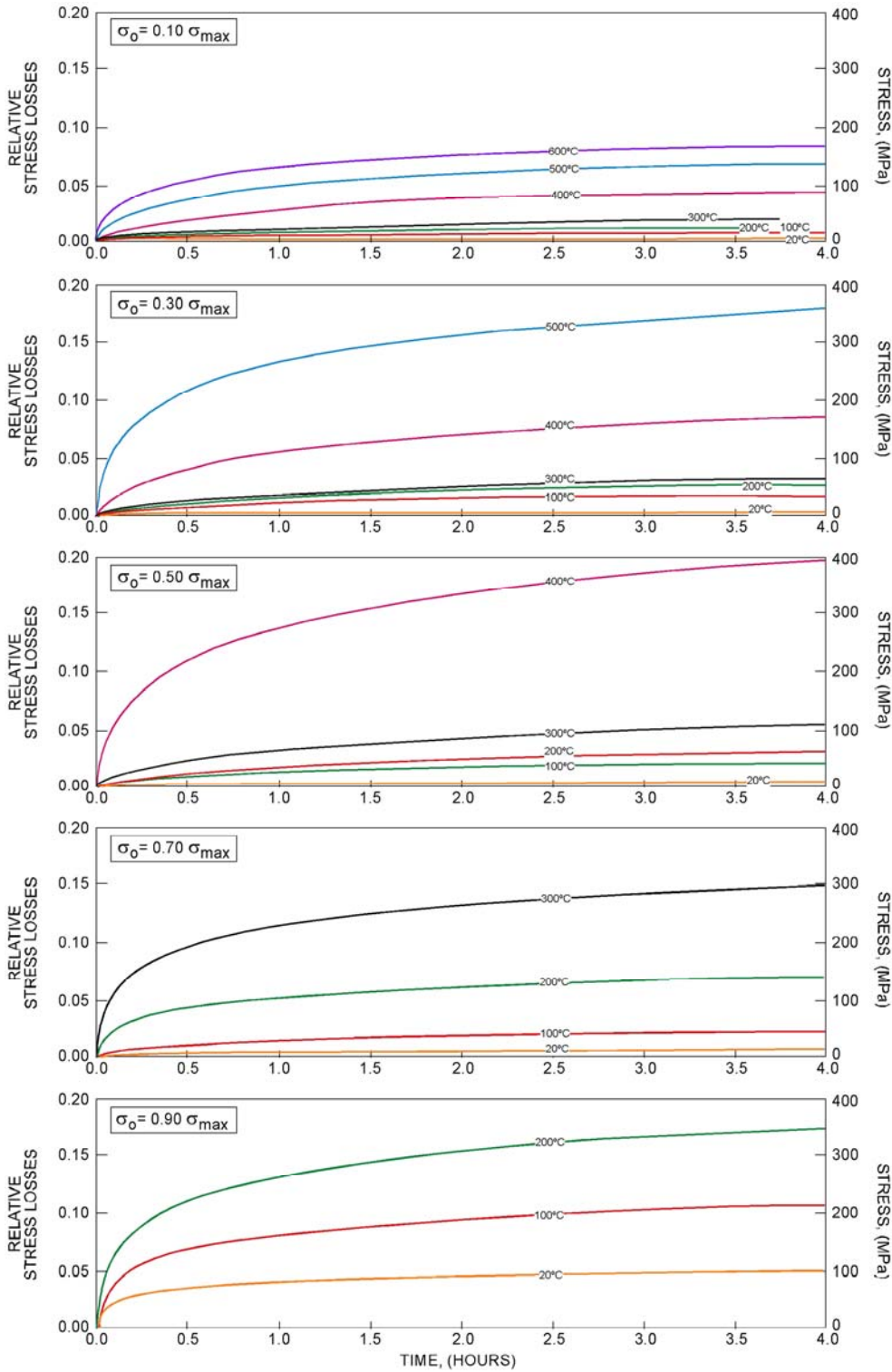


Fig. 2. Pérdida de tensión por relajación del alambre en función del tiempo, la carga inicial y la temperatura alcanzada. Para una comparación más sencilla, los resultados (pérdida relativa) se expresan en pérdida de tensión/resistencia.

## 2.2 Propiedades mecánicas residuales después de un fuego

Después de un fuego, aunque no se haya producido el colapso e incluso visualmente no se noten daños aparentes en la estructura, los materiales pueden haber sufrido un deterioro en sus propiedades mecánicas por haber estado expuestos a altas temperaturas. El término "residual" se usará en adelante para referirse a las propiedades que exhibirán las armaduras activas después de haber sufrido un ciclo completo de calentamiento-enfriamiento.

Hasta ahora se ha prestado poca atención a estos aspectos. El trabajo más interesante se debe a Cabrita et al [16] en el que se analizaba el efecto de un tratamiento térmico sobre la resistencia de los alambres, aunque éstos no estaban sometidos a ninguna carga durante el tratamiento.

En este trabajo, para simular los efectos del fuego se sometió a alambres de pretensado comerciales de 5 mm de diámetro a una carga del 70% de su carga de rotura y a un ciclo térmico completo de calentamiento y enfriamiento de aproximadamente cuatro horas. Los efectos del fuego dependerán de la duración del incendio y de la carga que esté soportando el alambre, por lo que el escenario de fuego al que se ha sometido a los alambres en este trabajo podría considerarse conservativo (la carga es cercana a la máxima que experimentan las armaduras en servicio y la duración del fuego supera los propuestos por las distintas Normas). La temperatura se elevó a una velocidad de 20°C/min hasta alcanzar la temperatura máxima que se mantuvo durante más de 3 horas. Las temperaturas máximas estudiadas han sido las mismas que en el apartado anterior (20, 100, 200, 300, 400, 500, 600). Una vez recuperada la temperatura ambiente, los alambres se han descargado y se han realizado ensayos de tracción a temperatura ambiente para evaluar cómo había afectado el fuego a las propiedades mecánicas residuales. Se han realizado 2 ensayos para cada carga inicial-temperatura. En la Tabla 2 se recogen los valores medios de dichos ensayos.

*Tabla 2. Propiedades mecánicas residuales a temperatura ambiente después de un fuego de cuatro horas, en función de la temperatura máxima alcanzada durante el fuego*

| <i>Max. Temperatura (°C)</i> | <i>Límite elástico (MPa)</i> | <i>Resistencia (MPa)</i> |
|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| 20                           | 1770                         | 1950                     |
| 100                          | 1765                         | 1947                     |
| 200                          | 1770                         | 1940                     |
| 300                          | 1752                         | 1926                     |
| 400                          | 1590                         | 1755                     |
| 500                          | 1380                         | 1521                     |
| 600                          | 887                          | 1014                     |

La Figura 3 muestra la variación de la resistencia y el límite elástico residual a temperatura ambiente, en función de las temperaturas máximas alcanzadas durante las simulaciones de fuego. Los valores se refieren a la resistencia inicial de los alambres. Se observa que las propiedades mecánicas residuales apenas sufren degradación hasta los 300 °C pero si el alambre ha sufrido temperaturas superiores durante el incendio su resistencia residual se habrá visto deteriorada, lo que debería tenerse en cuenta al evaluar la capacidad de carga de la estructura después del fuego.

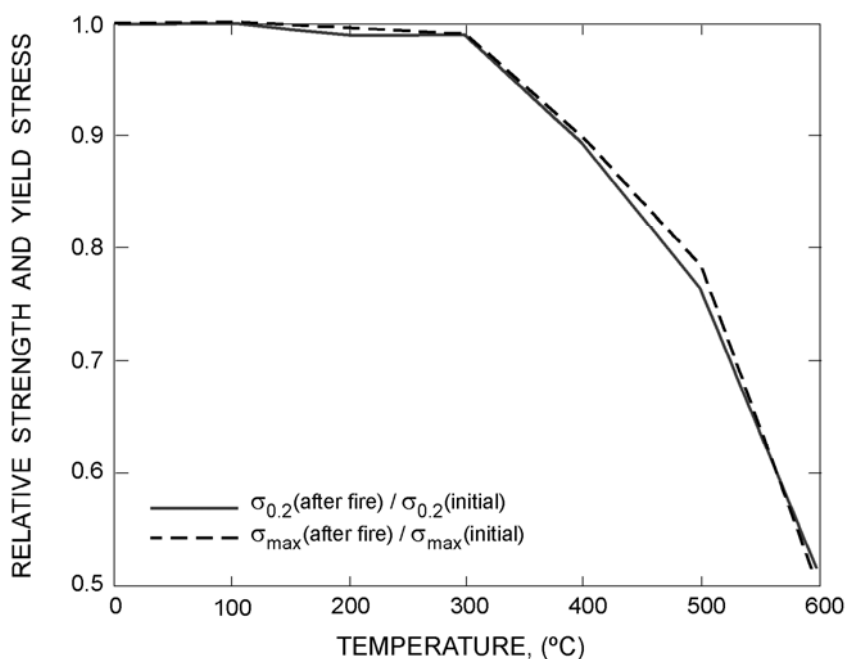


Fig. 3. Pérdida de resistencia y límite elástico a temperatura ambiente en función de la temperatura máxima alcanzada durante el fuego.

La Figura 3 puede resultar útil para estimar de una forma sencilla el daño producido por el fuego en las propiedades de las armaduras activas con sólo tener una idea de las temperaturas máximas alcanzadas durante el incendio. Cabe señalar que un método más exacto para evaluar el deterioro del material requeriría conocer datos sobre el fuego (duración, intensidad, carga real soportada por la armadura...) que normalmente no están al alcance de los ingenieros, al menos inmediatamente después del fuego, en el momento en que hay que decidir sobre la seguridad residual de la estructura.

### 3. Discusión: Estimación del daño producido por el fuego en las armaduras activas

Para ejemplificar el daño producido por el fuego en la armadura activa de una estructura pretensada se ha monitorizado el comportamiento de un alambre durante un escenario de fuego simulado. De esta forma se han podido identificar los efectos presentados en el apartado anterior.

#### 3.1 Escenarios de fuego según las Normas

Para verificar la resistencia al fuego de una estructura, el primer paso es modelizar una historia de temperaturas que sea acorde a un escenario de fuego realista. En la Norma UNE-EN [15] se proponen algunas curvas de fuego nominales, siendo la más utilizada la curva paramétrica propuesta previamente en la Norma UNE EN 1363:2000 (que es la que utiliza el Nuevo Documento Básico para la Seguridad en caso de Incendio (DB-SI) del recientemente publicado Código Técnico de la Edificación 2006):

$$T = 20 + 345 \log(8t+1)$$

Siendo T la temperatura del gas en el sector del fuego en °C y t el tiempo transcurrido desde la iniciación del incendio en minutos. Dos aspectos adicionales a considerar son la duración del fuego (en torno a 2-3 horas según las distintas Normas) y la velocidad a la que se produce el enfriamiento.

En este trabajo se ha estudiado el comportamiento de los alambres de pretensado, por lo que nos interesaba conocer la historia térmica que sufren los alambres de acero durante el fuego. El acero estructural, como material de alta conductividad térmica, se calienta de modo inmediato, de forma que, expuesto directamente al incremento de temperaturas producido por el fuego, adquiere inmediatamente la temperatura que se alcanza en el incendio. No obstante, el hormigón, debido a su baja conductividad térmica y al espesor de las secciones resistentes, suele proteger a los alambres de acero, haciendo que la temperatura en el interior de la estructura vaya aumentando más lentamente. En las diferentes Normas se recogen curvas para predecir las temperaturas en el interior de los elementos de hormigón

al ser sometidos a una curva de fuego nominal. En la Figura 4 se compara la curva paramétrica temperatura-tiempo de la UNE EN 1363:2000 con las temperaturas que realmente van alcanzando las armaduras en función del recubrimiento. Los recubrimientos utilizados (30 y 45 mm) pretenden representar casos habituales en las armaduras pretensas y postesas.

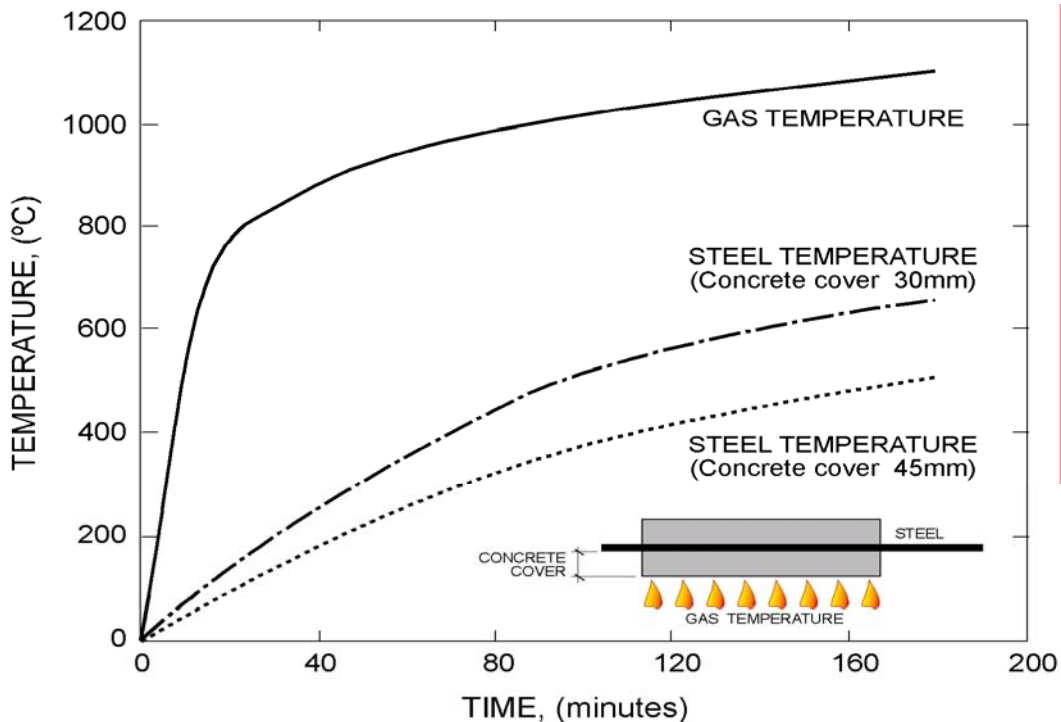


Fig. 4. Temperatura del gas en el escenario de fuego propuesto por la Norma UNE-EN [3,15]. Se muestra también la temperatura en función del tiempo que alcanzarían en dicho escenario dos alambres de acero con recubrimientos de 30 y 45 mm respectivamente.

El efecto del aumento de la temperatura sobre una estructura es doble: por una parte afecta a las características resistentes de los materiales (hormigón y acero) y por otro lado genera una deformación (dilatación) impuesta que, al no ser en general libre, origina los esfuerzos correspondientes. Por tanto, para estudiar el comportamiento de un elemento estructural hay un aspecto adicional a considerar además de las temperaturas alcanzadas: las condiciones de contorno del elemento. Éstas van a influir de forma decisiva en su comportamiento según permitan o no la dilataciones impuestas por el calentamiento. Usualmente, cuando ocurre un fuego en una parte de una gran estructura, la parte calentada se expandirá y empujará contra el resto de la estructura. A cambio, la parte más fría ejercerá fuerzas de compresión sobre la zona caliente. En este sentido, las diferentes Normas suelen distinguir entre los elementos estructurales cuya dilatación está restringida por el resto de la estructura (*restrained assemblies*) y aquellos en que no hay impedimento a la dilatación en ningún momento (*unrestrained assemblies*) [17]. Desde el punto de vista de las armaduras activas, la diferencia va a estar básicamente en las tensiones que van a soportar los alambres durante las altas temperaturas: los elementos *unrestrained*, al no haber dilatación impedida que reduzca la tensión de tracción durante el calentamiento, soportarán cargas más elevadas, por lo que el daño puede ser superior.

### 3.2 Escenario de fuego utilizado en este trabajo

Para poner de manifiesto los efectos “no visibles” que puede provocar el fuego en las armaduras activas se ha monitorizado lo que le sucede a un alambre durante un ciclo calentamiento-enfriamiento que pretende ser un escenario de fuego realista (se han utilizado altas temperaturas y duraciones del fuego iguales o superiores a las propuestas en las Normas). El incendio se ha simulado siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Un alambre de pretensado comercial de 5 mm de diámetro se pone en carga a temperatura ambiente (20 °C) simulando un ensayo de relajación y registrándose su curva carga-tiempo. La carga inicial considerada ha sido el 70% de la carga de rotura, que es el valor propuesto por las Normas (ASTM E328, ISO 15630/3, EHE 38.9) para los ensayos de relajación.
- Tras 5 días a temperatura ambiente (después de haber sufrido la mayor parte de las pérdidas por relajación), se ha utilizado un horno para elevar la temperatura, simulando el efecto del fuego. En la Figura 5 se recoge la curva temperatura-tiempo empleada. La velocidad de calentamiento ha sido aproximadamente 3 °C/min representando la

curva típica de calentamiento de una armadura dentro de un elemento de hormigón durante los fuegos nominales propuestos por las Normas (ver Figura 4). La temperatura máxima ha sido 500 °C. En ese momento, el horno se apaga y se deja abierto para que el alambre pueda enfriarse al aire. El tamaño del horno es el 80% de la longitud del alambre y dicha longitud se mantiene constante en todo momento (*restrained assembly*). Durante el ciclo calentamiento-enfriamiento se sigue registrando la curva carga-tiempo en todo momento.

- Una vez recuperada la temperatura ambiente, el ensayo se continúa 5 días más, registrándose de nuevo la evolución de la carga con el tiempo. Después de transcurrido ese tiempo, el alambre se ha descargado y se ha realizado un ensayo de tracción a temperatura ambiente para controlar cómo había afectado el fuego a las propiedades mecánicas residuales mostrando que su resistencia había descendido un 20% respecto a la del alambre original, correspondiéndose con los resultados obtenidos en la campaña experimental (Figura 3).

En la Figura 5 se muestra la evolución de la carga de pretensado que soporta el alambre de acero antes, durante y después del posible escenario de fuego. Durante la exposición a altas temperaturas hay una reducción significativa de la carga como consecuencia de la dilatación impedida (por la estructura circundante) y del incremento de pérdidas de relajación de la armadura. En el enfriamiento se recupera la parte de carga perdida por la dilatación impedida, pero no así las pérdidas por relajación. Como consecuencia, aunque el alambre parece haber superado el fuego sin daños aparentes, habría que tener en cuenta que:

- la carga de pretensado que aporta a la estructura se ha reducido en más de un 20% por la relajación
- su resistencia también se ha visto afectada (20% inferior a la resistencia inicial, Fig. 3) al haber soportado temperaturas de hasta 500 °C.

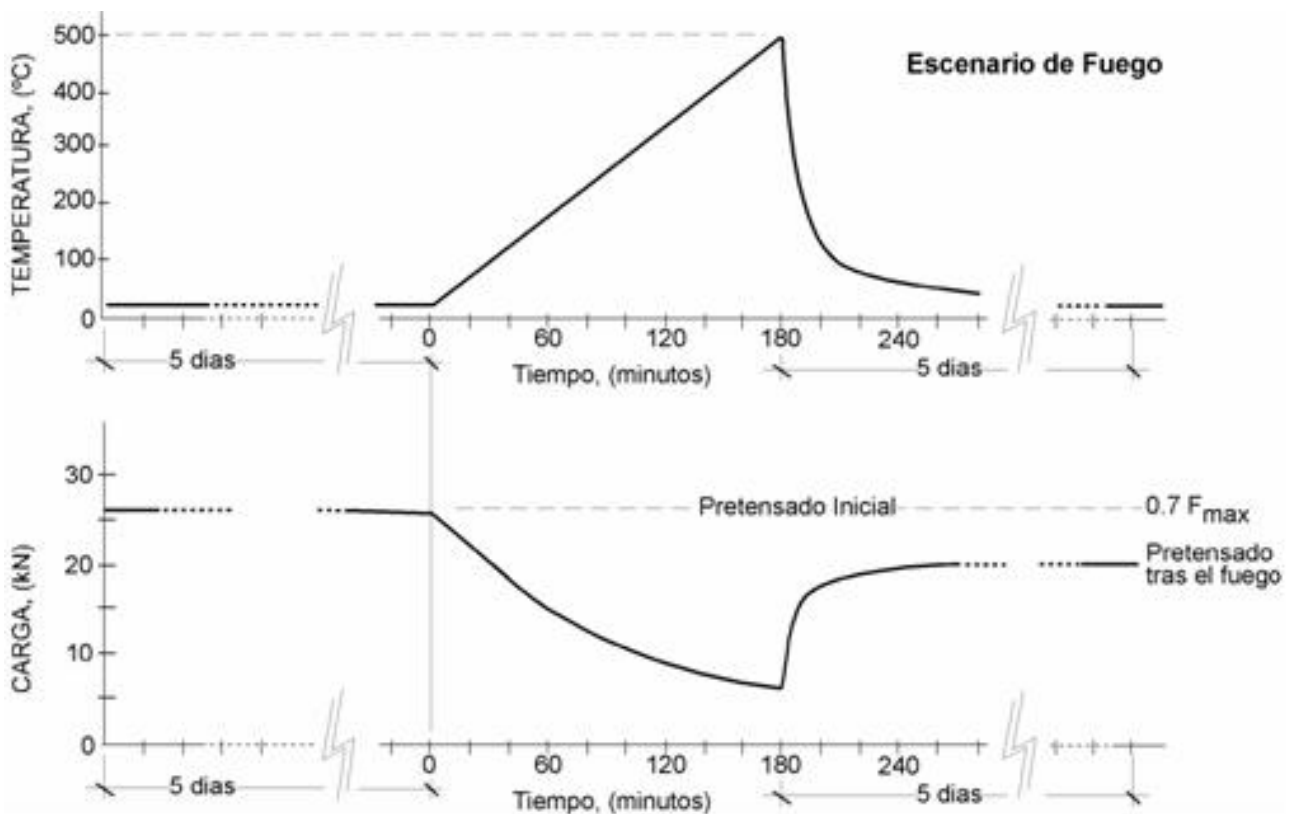


Fig. 5. Evolución de la carga de pretensado antes, durante y después del escenario de fuego estudiado en este trabajo.



#### 4. Resumen y recomendaciones

La seguridad frente al fuego no sólo debe considerar lo que sucede durante el incendio, sino también el comportamiento de la estructura después del enfriamiento. Incluso si el fuego no parece haber generado daños aparentes, las propiedades mecánicas de los materiales y la distribución de cargas pueden haberse visto afectadas. La extensión del daño provocado por el fuego sobre las armaduras activas depende de la intensidad y duración del incendio, las temperaturas alcanzadas en el alambre y la carga soportada por la armadura durante el fuego. Dichos factores pueden resultar, a menudo, imposibles de conocer. No obstante, los resultados mostrados en este trabajo permiten dar una estimación que podría ayudar en la evaluación de la capacidad resistente de la estructura después del incendio:

- La resistencia de los alambres puede haberse deteriorado si han sufrido temperaturas superiores a 300°C durante el fuego. Se aporta un gráfico (Fig. 3) para estimar esta pérdida de resistencia en función de las temperaturas máximas alcanzadas durante el incendio.

- La fuerza de pretensado puede haberse reducido por el aumento de la relajación a altas temperaturas. Para estimar estas pérdidas se podrían utilizar las curvas experimentales de relajación de diferentes temperaturas mostradas en la Figura 2 entrando en ellas con los siguientes datos: carga inicial de la armadura, temperatura máxima alcanzada durante el fuego y duración estimada del incendio.

#### Agradecimientos

Los autores desean mostrar su agradecimiento al apoyo del Ministerio de Fomento (proyecto "Durabilidad de armaduras activas en estructuras de hormigón pretensado"). Este trabajo también ha sido financiado gracias a la red SEDUREC integrada en el programa de investigación nacional CONSOLIDER-INGENIO 2010. También desean mostrar su gratitud a D. Luis del Pozo, de EMESA Trefilería SA, por su ayuda y sus útiles comentarios y a D. Mariano Ortez por su ayuda con los ensayos.

#### Referencias

- [1] CRISTOFANO A.H., MARTIN L.D. Design for fire resistance of precast prestressed concrete. Second Edition, Prestressed Concrete Institute PCI; 1989.
- [2] WORKING PARTY 4.3-1 (fib). Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling. State of art report. fib Bulletin 38, april 2007.
- [3] EUROCODE 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural Fire Design. EN 1992-1-2: 2002. February 2005.
- [4] EHE, Instrucción de Hormigón Estructural.
- [5] Documento Básico sobre Seguridad de Incendios. Código Técnico de la Edificación, 2006.
- [6] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS8110: Part 2: 1985, Structural use of concrete, Code of practise for special circumstances. BSI, London, 1985.
- [7] CEB. Fire design of concrete structures. Bulletin 208, Comité Euro-International du Béton (CEB), Laussane, Switzerland, 1991.
- [8] ANCHOR R.D., MALHOTRA H.L., PURKISS J.A. Design of structures against fire. Essex, UK: Elsevier Applied Science Publisher; 1986.
- [9] HARMATHY T.Z. Fire safety design & concrete. Essex, UK: Longman Scientific & Technical; 1993.
- [10] HOLMES M., ANCHOR R.D., COOK G.M.E., CROOK R.N. The effects of elevated temperatures on the strength properties of reinforcing and prestressing steels. The Structural Engineering, Vol. 60B, No. 1, 1982, pp.7-13.
- [11] HARMATHY T.Z., STANZAK W.W. Elevated temperature tensile and creep properties of some structural and prestressing steel. Fire Test Performance, ASTM STP 464. American Society for Testing and Materials 1970, pp. 186-208.
- [12] ABRAMS M.S., CRUZ C.R. The behaviour at high temperatures of steel strand for prestressed concrete. PCA Research and Development Bulletin, Vol. 134, No. 3, 1961, pp. 8-19.
- [13] BROCKENBROUGH R.L., JOHNSTON B.G.. Steel Design Manual. Pittsburgh, PA: US Steel Corp; 1968.

- [14] GUSTAFERRO A.H. Fire resistance of prestressed concrete beams. Study C: Structural behavior during fire tests. PCA Research and Development Bulletin (RD009.01B), Portland Cement Association, 1971.
- [15] EUROCODE 1: Basis of design and actions on structures, Part 2.2: Actions on structures exposed to fire, EN 1991-1-2: 2002. November 2002.
- [16] CABRITA I., RODRÍGUEZ J.P.C., LOUREIRO P. Mechanical properties of reinforcing and prestressing steels after heating. Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 8, No. 4, 1996, pp. 189-194.
- [17] ASTM Designation: E119-88. Standard methods of fire tests of building construction and materials. ASTM Book of Standards, American Society for Testing and Materials Vol. 04.07, 1988.