



MODELO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE LOS CAMPOS DE TEMPERATURA EN ACEROS ESTRUCTURALES BAJO LA ACCIÓN DEL FUEGO¹

Juan A. Trilleros²
Irene Huertas³
Sonia Mato⁴

Resumen

El objetivo principal del trabajo experimental desarrollado es el diseño, la construcción, la puesta a punto y la puesta en operación de un horno piloto que permita la obtención experimental de los perfiles de las temperaturas en probetas de aceros estructurales. El horno se opera en régimen transitorio, siguiendo la evolución de las temperaturas dada por la norma ISO 834, alcanzándose temperaturas de fuego superiores a los 1.200°C, para intervalos de tiempo que no superan las tres horas.

Palabras claves: Horno de ensayo de fuego; Aceros estructurales y fuego; Campos de temperaturas en aceros estructurales.

EXPERIMENTAL MODEL TO CARRY OUT THE TEMPERATURE PROFILES IN STRUCTURAL STEELS UNDER THE FIRE CONDITIONS

Abstract

The main experimental work is the design, construction, adjustment and starting a pilot furnace, which allows the experimental temperature profiles of the samples structural carbon steels. The furnace operates under unsteady state of heat flow, following the evolution of the temperature profile given by the ISO 834 norm. The fire temperatures into de furnace can being reached to 1200 °C, for intervals of time that they do not overcome three hours.

Key words: Test furnace for fire; Structural steels and fire; Remperature profiles in structural steels.

¹ Contribución técnica al 65° Congreso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Prof. Dr. Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad Complutense de Madrid. España.

³ Lda. Químicas. Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad Complutense de Madrid. España.

⁴ Dra. Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad Complutense de Madrid. España.

1 INTRODUCCION

En toda obra civil tanto para uso publico como industrial, es de capital importancia la estructura de la obra y por ende, los materiales estructurales utilizados, ya que constituyen los vectores principales tanto de la propagación como de las barreras para que los incendios no alcancen a otros sectores de la obra.⁽¹⁾

Dentro de este contesto, es la resistencia al fuego la propiedad que posee todo elemento constructivo de mantener las condiciones para el cual fue diseñado teniendo en cuenta la posibilidad de incendio. Dicho concepto se presenta por el tiempo en minutos durante el cual el elemento constructivo mantiene las propiedades que definen la resistencia al fuego, habiendo de considerar la capacidad de carga, la estanqueidad al paso de las llamas y de los gases calientes debido a la combustión, así como la posibilidad de que se generen gases inflamables y tóxicos.^(2,3)

Las estructuras portantes metálicas de las obras civiles a día de hoy, están constituidas por perfiles normalizados de acero al carbono que poseen una elevada capacidad de absorber las solicitaciones mecánicas. La acción del fuego sobre dicho acero modifica la plasticidad del mismo y con ello se rompe el equilibrio de las tensiones de trabajo previstas, con lo que se origina una perdida de estabilidad de la estructura.^(4,5)

La temperatura a partir de la cual aparece el fenómeno de la plasticidad, permite valorar la resistencia al fuego de los elementos estructurales. Dicha temperatura es bastante baja y se alcanza con facilidad en toda la masa de la estructura debido a la elevada conductividad térmica del acero al carbono. Así, a partir de 250° C se modifican la resistencia y el límite elástico de dichos aceros, y a partir de los 538° C, la caída de la resistencia es muy acusada, con lo que la estructura no puede soportar la carga de diseño, por lo que dicho nivel se considera crítico.^(6,7) Otro aspecto a considerar es la dilatación producida en los elementos que constituyen la estructura, aumentando las tensiones que pueden producir el colapso de la misma. Resumiendo, la estructura además de perder resistencia mecánica se ve sometida a tensiones mayores.

De otra parte el acero al carbono se comporta como inerte frente al fuego, lo que representa una ventaja, no obstante como se ha indicado anteriormente, las estructuras en acero al carbono pierden rápidamente su resistencia, que junto a su elevado coeficiente de dilatación, da origen a hundimientos antes de que actúen los sistemas contra incendios.^(8,9)

Además, hay que tener en cuenta no sólo la perdida de resistencia del acero frente al campo térmico generado en un incendio, también hay que tener en cuenta los fenómenos derivados de la dilatación del acero, dando lugar a desplazamientos, originando fuerzas que provocan compresiones elevadas. Estos desplazamientos junto a las torsiones y flexiones producidos, originan serios daños a otros elementos próximos por tracción dando lugar a roturas de las soldaduras.^(10,11)

En los últimos años se esta estudiando el comportamiento mecánico de los aceros estructurales de construcción a temperatura elevada para conocer hasta que punto las propiedades de los aceros se degradan, de forma que ciertos aceros estructurales de construcción normalizados rompen frágilmente a atracción cuando se ensayan a 500°C.

Ensayos de tracción llevados a cabo a 20°C, 300°C y 500°C, en probetas cargadas en un horno garantizándose que éstas alcanzan dichas temperaturas, demuestran para los aceros 460 N y NL, que la fractura fue dúctil en ambas. En cuanto a los ensayos de tracción se comprueba una reducción significativa de límite elástico para cada uno de los dos aceros. La resistencia a la tracción crece ligeramente a los 300°C y decrece de manera importante a los 500°C. La estricción crece proporcionalmente con la temperatura del ensayo.⁽¹²⁾

Los ensayos anteriores se refieren al comportamiento mecánico de los materiales ensayados en régimen estacionario isotérmico, condiciones que no se cumplen en un fuego real en donde se tiene un comportamiento de las evoluciones de la temperatura tiempo en régimen transitorio,⁽¹³⁾ y variando en cada punto, lo que da lugar a la aparición de gradientes de temperaturas en cada posición del material, por lo que sería de interés, obtener evidencia experimental de todo ello, por lo que se ha creído necesario el diseño y construcción de un horno piloto para recoger dicha evidencia experimental.

2 MATERIALES Y METODOS

El material seleccionado fue acero sobre el que se realizaron los ensayos en régimen transitorio a temperatura elevada. Los aceros se clasifican en función del contenido en carbono, así los aceros no aleados tienen un contenido en carbono no superior al 0.2%, y los aceros de baja aleación con un contenido igual o superior al 0.2% en carbono y una cantidad total no superior al 5% en otros elementos, ver tabla 1. De otra parte, los aceros para la construcción se clasifican de acuerdo al proceso de fabricación y están regulados en Euronormas. Así los productos de acero laminados en caliente, están definidos en la norma UNE EN 10025-2.⁽¹⁴⁾

Las características comunes a todos los aceros son las siguientes: Modulo de elasticidad 210.000 N/mm², modulo de rigidez 81.000 N/mm², coeficiente de Poisson 0.3, coeficiente de dilatación térmica $1.2 \cdot 10^{-5}$ (°C) y densidad 7.850 kg/m³.

En particular la norma UNE 10025-3⁽¹⁵⁾, hace referencia a productos laminados en caliente para construcciones metálicas. Son principalmente aceros de grano fino soldables suministrados en estado normalizados o laminado de normalización (N). Estos aceros son importantes por las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción y su elevada tenacidad a bajas temperaturas, también tienen una buena soldabilidad por un reducido nivel de carbono equivalente.

Tabla 1. Composición química del análisis de los aceros normalizados ensayados

	C %	Si%	Mn%	P %	S %	Cr%	Ni%	Mo%	Al%	Cu%	Co%
S355NL	0,169	0,310	1,140	0,018	0,006	0,046	0,244	0,008	0,040	0,216	0,019
S460N	0,127	0,286	1,400	0,019	0,006	0,029	0,510	0,008	0,028	0,013	0,018
S460NL	0,087	0,301	1,270	0,017	0,005	0,026	0,053	0,010	0,044	0,015	0,015

Mediante el proceso de normalizado se afina y homogeniza la estructura del acero calentándolo a unos 950°C y dejándolo enfriar lentamente, obteniéndose de este proceso aceros de mayor dureza.

Sus aplicaciones principales están en las áreas de las construcciones soldables, tales como en estructuras de obra civil, aplicaciones de calderería

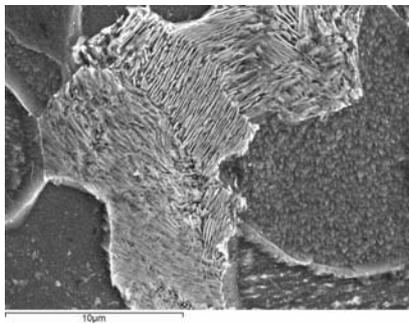
tanto a temperatura ambiente como a bajas temperaturas. Los aceros tipo S275 y S355 son aceros de calidad no aleados y los tipos S420 y S460 son aceros especiales aleados.

El grado de estos aceros se designa por N cuando se suministran con un valor mínimo especificado de la energía de flexión por choque a temperaturas superiores a iguales a -20°C y NL cuando es a -50°C . A la vista de lo expuesto anteriormente, se tomo como criterio seleccionar un acero no aleado el S355NL y otro aleado el S460 tanto en grado N como NL, lo que le confiere al primero comportarse como un acero de tenacidad media y al segundo de alta tenacidad.



Figura 1. Micrografía comparativa de los aceros ensayados.

CORTE TRANSVERSAL (electrónica)
S-355-NL (X5000)



CORTE LONGITUDINAL (electrónica) S-460-NL (X3000)

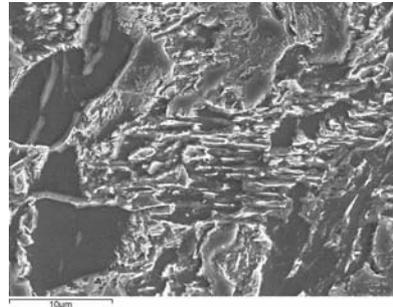


Figura 2. Imágenes de microscopía electrónica de los aceros ensayados.

Todos estos materiales son aceros al carbono de naturaleza ferrítico perlítica, tal como se pone de manifiesto en las macrografías bajo microscopio óptico, tal como se indican en las Figuras 1 y 2 para cada material.

Estos aceros que se obtienen por trabajo en caliente, aun partiendo en caliente de un campo monofásico austenítico, adopta la estructura de bandas, en donde el carbono se segrega en ciertas fibras que se alternan con otros de menor contenido en este elemento, al producirse la reacción eutectoide, la perlita se distribuye con preferencia en las bandas en que se había segregado el carbono.

El protocolo seguido en la preparación de las probetas metalográficas para la observación micrográfica fue el siguiente. Las probetas usadas en la preparación metalográfica fueron de 20mm x 9mm y se embutieron en resina de Cu para posterior desbaste con 4 pasos de papel de lija, P240, P400, P600

y P1000, correspondientes a los tamaños de 58.5, 35.0, 25.9 y 18.3 micrómetros, y pulido con alúmina de 3 y 1 μm .

Se usó nital 2 (ácido nítrico al 60-62% y alcohol etílico al 99,5%) para revelar la estructura oscureciendo la perlita y dando contraste a las colonias de la misma, antes de ser observadas en el microscopio electrónico de barrido tradicional. Todos los aceros ensayados, S355NL, S460N y S460NL, muestran un tamaño de grano pequeño, recristalizado y equiaxial. La distribución es en bandas de perlita fina (zonas oscuras) y ferrita (zonas claras) alternadas (Figuras 1 y 2).

Para el análisis del comportamiento de un elemento estructural bajo la acción de un fuego, es práctica de diseño, el utilizar una curva temperatura tiempo, para poder ensayar el comportamiento de los materiales y que se la denomina curva normalizada o curva tipo fuego definida en la norma ISO 834,⁽¹⁶⁾

$$T = 345 \log_{10}(8 t + 1) + 20 \quad (1)$$

donde -T- es la temperatura del gas en $^{\circ}\text{C}$, y - t - el tiempo de exposición al fuego estimado en minutos. La curva estándar tiempo-temperatura es un modelo convencional que se utiliza para representar la acción térmica. El ataque térmico producido por un fuego real puede ser mayor o menor que el determinado por la curva estándar tiempo-temperatura.

Por tanto la idea de diseño, parte de un horno de gran capacidad de calefacción y sobre todo de transmisión de calor muy rápida, capaz de mantener un ambiente térmico cuya atmósfera siga la evolución en el tiempo de las curvas de fuego, empezando por la estándar con objeto de obtener evidencia experimental de las evoluciones de las temperaturas de los materiales sometidos a la acción del fuego de forma que una de las caras del material ve directamente el fuego y la cara opuesta esta en un ambiente exento de fuego.

Se tomo de referencia la curva de fuego estándar y se operaron en el horno probetas de 200x100x20 mm. Para cada tipo de acero, registrándose en todo momento tanto las curvas de fuego utilizadas, como las temperaturas de las caras internas y externas de las probetas del horno. Con objeto de ponderar que el tamaño de las probetas fuera el correcto, y que los efectos de contorno de frontera con el horno fueran despreciables se dispuso la indicación de al menos cinco temperaturas tanto en la cara interna como en la externa de la probeta, una en el centro y las otras cuatro distantes uno y dos centímetros de los bordes laterales y superior e inferior. Para los indicadores de temperaturas y dado el intervalos de las mismas desde la ambiente hasta los 1.150 $^{\circ}\text{C}$, se seleccionaron termopares tipo K cromel-alumel.

La cámara del horno, se dispuso de forma paralelepípedica disponiendo los elementos de resistencia eléctrica, en hilo de resistencia tipo Kantal, sobre la cara opuesta a la de las probetas, con objeto de tener un factor de visión para la transmisión de calor por radiación que fuera el mayoritario en el funcionamiento del horno e igual a la unidad. Así mismo, se dispuso de otro indicador de temperatura en centro de la cámara del horno que además actuaba de control de la temperatura para seguir las diferentes curvas de fuego, que previamente se programaban, por medio de diferentes velocidades de calefacción, una vez seleccionados diferentes rampas de calefacción para los intervalos de temperaturas integrantes de la curva patrón de fuego seleccionada. El programador actuaba en función de dichos parámetro que se

introducían, para lo que había que seleccionar la diferente forma de control diferencial e integral.

En las Figuras 3 se presenta un diagrama simplificado de la cámara del horno que disponía de un sistema de control y de recogida de las temperaturas en la probeta del horno, así como los registros correspondientes de las temperaturas sobre soporte informático por medio de un PC. Debido a que el intervalo total de las curvas de fuego a ensayar era elevado, y puesto que la información del transitorio se tenía al final del ensayo, se diseñó el horno anterior de forma modular dejando la cámara del horno y el frente del mismo en donde se disponía las probetas de forma que se pudieran adaptar diferentes frentes, según se necesitase en los ensayos.

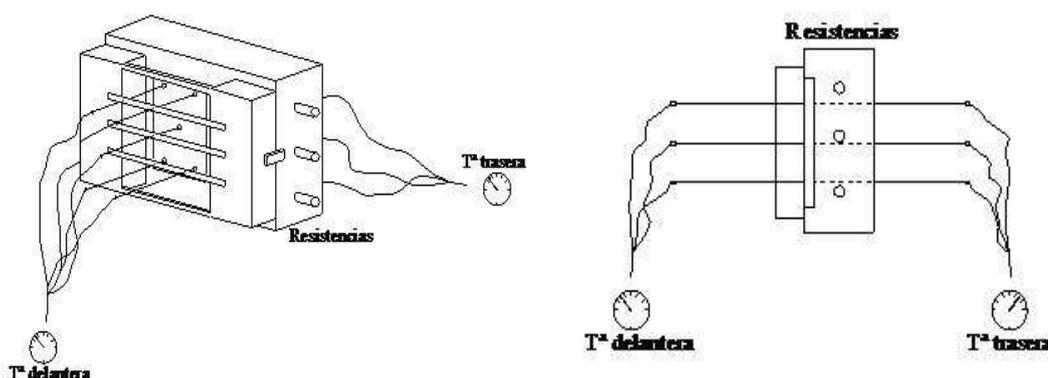


Figura 3. Esquema del horno, vista y perfil.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizada la puesta en marcha del horno que simula el comportamiento de los materiales sometidos a fuego por una cara, se operó el mismo con la curva de fuego estándar, para analizar el comportamiento de los materiales ensayados. En la Figura 4 se puede observar la correcta evolución de la atmósfera del horno y de la curva de fuego introducida, que se corresponde con una probeta de acero S460NL, hasta un total de 3 horas de operación.

Se ensayaron en el horno un acero no aleado el S355NL y otro aleado el S460 tanto en grado N como NL. Todos estos aceros son aceros al carbono de naturaleza ferrítico perlítica, tal como se puso de manifiesto y se documentó anteriormente. Todos los aceros mostraron un tamaño de grano pequeño, recristalizado y equiaxial. La distribución es en bandas de perlita fina (zonas oscuras) y ferrita (zonas claras) alternadas (Figuras 1 y 2). La diferencia entre los cortes transversales y longitudinales sólo se manifiesta por el cambio de dirección de las bandas.

Las micrografías en microscopio electrónico resuelven la perlita fina (zonas claras). Las inclusiones, generalmente de sulfuro de manganeso, aparecen plásticamente alargadas en la dirección del laminado.

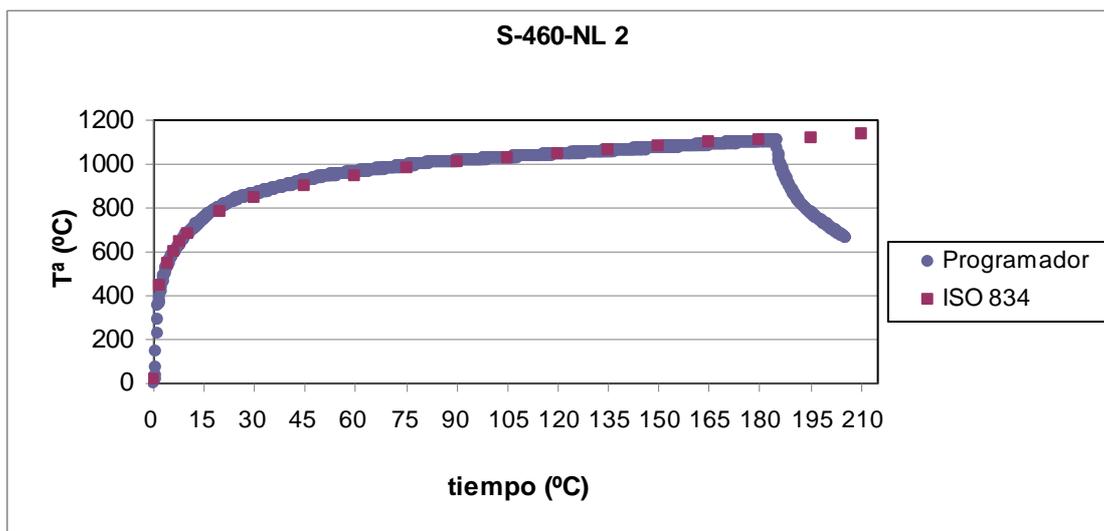


Figura 4. Perfiles de temperaturas de la atmósfera del horno y del modelo de temperatura estándar ISO 834

Los ensayos realizados han sido sobre probetas de acero al carbono S375NL y S460NL y N, de las que se evaluaron previamente a la acción del fuego, la determinación de la dureza Rockwell B, que se realizaron sobre ocho determinaciones medidas con indentador de acero duro de 1/16 de pulgada, un patrón de dureza HRB 76,1 ± 1, una precarga de 10 kg y una carga de 100 kg. Los valores se dan en la Tabla 2.

Tabla 2. Durezas de los aceros antes y después de del ensayo de fuego

ACERO ENSAYADO	D. ROCKWELL HRB inicial	D. ROCKWELL HRB final	VARIACION (%) D. ROCKWELL
S-355 NL	81,6	76,6	-6,1
S-460 NL	85,6	73,9	-13,7
S-460 N	88,8	75,0	-15,5

El ensayo de dureza para este tipo de aceros puede sustituir a los de rotura por tracción, ya que se establece una relación lineal entre la resistencia del material y la dureza. Para los aceros ensayado la resistencia a la tracción a temperatura ambiente presenta valores próximos, y de acuerdo con los datos obtenidos de Imedio et al.,⁽¹²⁾ se puede hacer una proyección de los coeficientes de proporcionalidad la resistencia de los aceros y las durezas Rockwell B, tal como se recoge en la tabla 3 para el acero S460NL y en dónde de aprecia la importante reducción de dicho parámetro.

Tabla 3. Coeficiente de proporcionalidad entre resistencia y dureza

T (°C)	R _M (MPa)	HRB	R _M /HRB /MPa)
20	600	85,6	7,1
500	350	>73,9	>4,7
600	<350	<73,9	<4,7

A continuación se presentan los registros temperatura - tiempo de los materiales ensayados S375NL y S460NL, tanto de la cara anterior en contacto con el ambiente, como de la posterior en contacto con la cámara del horno, habiéndose registrado en cada caso cinco valores de la temperatura, dos en la

zona superior, uno en el medio y otros dos mas en la zona inferior de las probetas. Se han asignado los números pares correlativos para la cara anterior y los impares para la cara posterior, siempre en el orden que se han descrito (Figura 5).

Como puede apreciarse la superficie expuesta al horno, evoluciona muy rápida hacia valores próximos a los del horno. La cara exterior, tiende una evolución de tendencia parecida a la anterior, pero no superándose los 600°C finales después de tres horas de ensayo. También se comprueba que a partir de los 15 minutos de ensayo, la diferencia de temperaturas entre ambas caras, evoluciona lentamente desde los 380°C hacia valores alrededor de los 500°C, al final de las tres horas de ensayo. Es evidente que no hay desviaciones significativas entre las temperaturas tanto en la cara interna como externa de la probeta, considerando tanto la variación longitudinal, puntos 3,5,9 y 4,6,1; como en su anchura de las probetas ensayadas, puntos 1,3 y 2,4; 7,9 y 8,10 (Figuras 6 y 7).

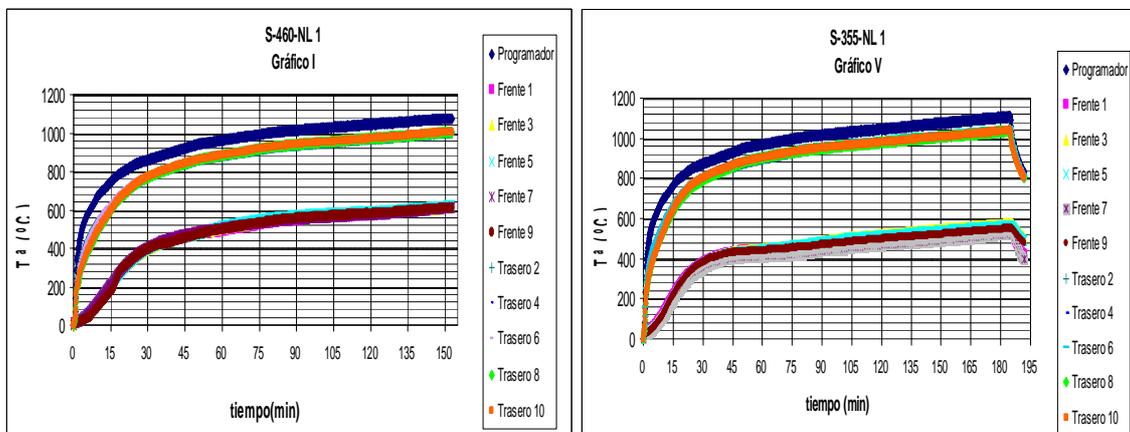


Figura 5. Perfiles de las temperaturas en los aceros S460 y S355.

Con relación a la evolución de las durezas de los materiales durante el ensayo, después de seccionar las probetas por la mitad y segregar una muestra para la observación micrográfica, se tiene que el acero S460 presenta una mayor disminución de la dureza que el acero S355NL, después de la prueba del ensayo de fuego. El acero S460N es el que presenta una mayor disminución de la dureza próxima al 15% (Tabla 2).

También se han determinado las durezas Rockwell B tanto en la cara exterior de las probetas como en la interior del horno, no apareciendo desviaciones significativas de las mismas, salvo cuando hay algo de oxido aunque no se observe a simple vista, dando indicaciones de la dureza entre 5 y diez puntos inferiores.

Las capas de óxidos son frágiles y se desprenden bien las mas exteriores, aumentando la compactación y la adherencia a medida que se progresa hacia el interior del material. El desprendimiento de dichas capas es mas fácil en el acero S355 que en el S460 y en la cara anterior que en la cara posterior de las probetas; en la figura 8, se presenta el estado final de una probeta después de un ensayo en el horno.

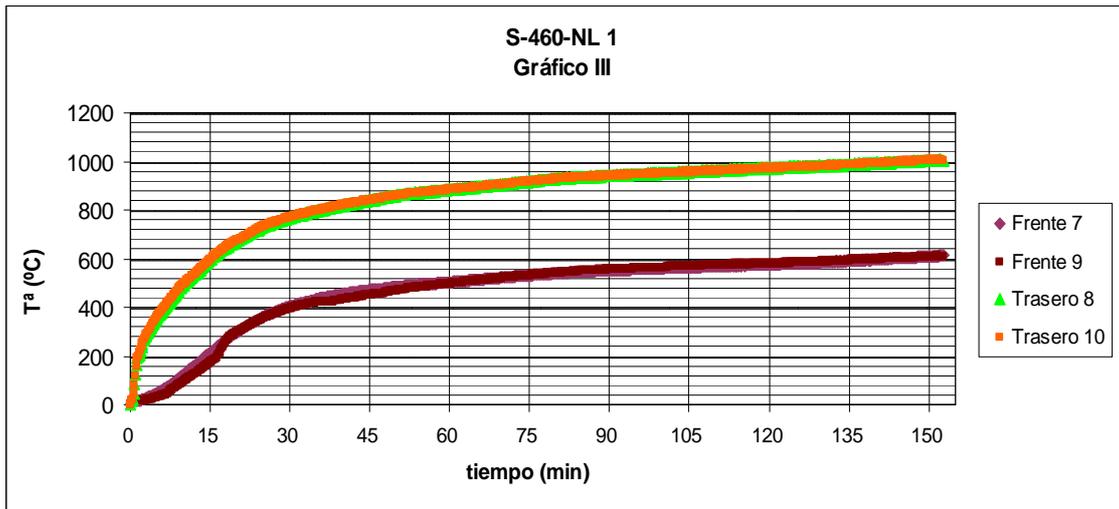


Figura 6. Variaciones de las temperaturas a lo largo de la anchura de la probeta zonas superior e inferior.

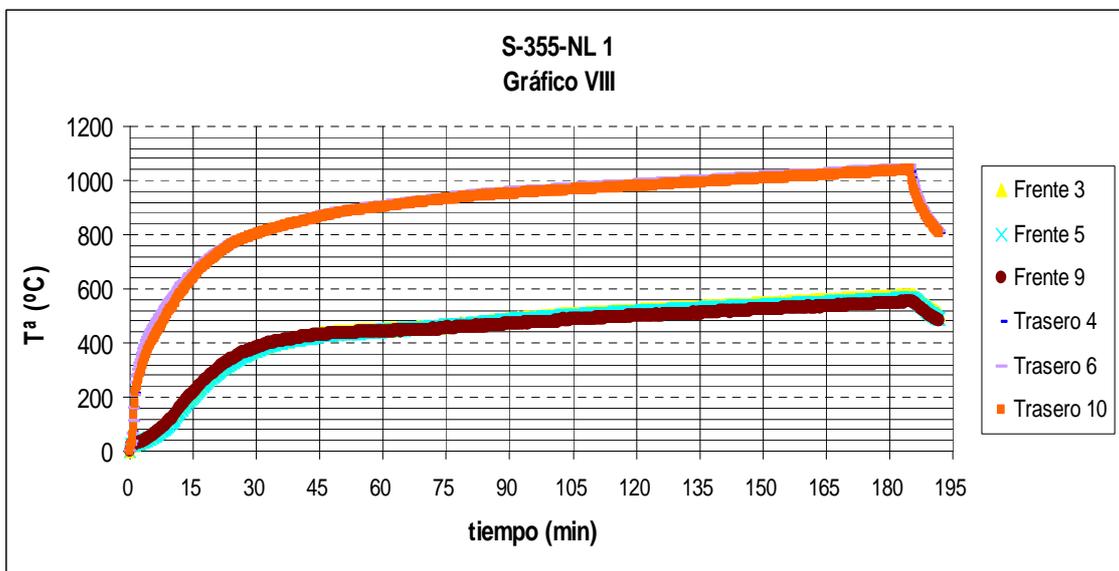


Figura 7. Variaciones longitudinales de las temperaturas en los aceros ensayados.



Figura 8. Vistas anterior de uno de los aceros ensayados S460NL.

En los aceros al carbono hipoeutectoides como es el caso de los S355 y S460 toda la perlita se transforma en austenita por encima de la temperatura A_{c1} , quedando el acero constituido por austenita y perlita libre, la cual comienza a disolverse en la austenita, a medida que aumenta la temperatura de forma que al rebasar el acero la temperatura A_{c3} , todo el carbono forma solución sólida con la austenita. Pero suele haber segregaciones en cuanto a su composición. La difusión del carbono será tanto mas rápida cuanto mayor sea la temperatura del acero. De otra parte, si el acero se mantiene bastante tiempo a temperaturas superiores a la A_{c3} , se obtendrán cristales gruesos de austenita.

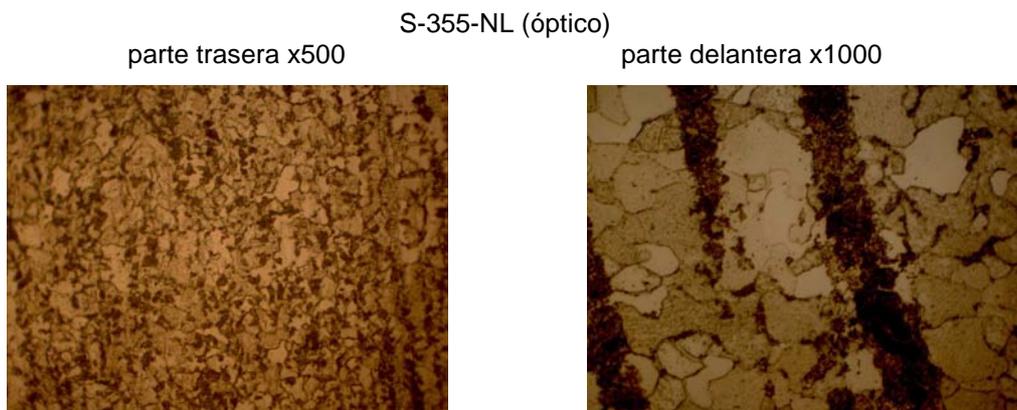


Figura 9. Micrografías acero S355NL después del ensayo de simulación de fuego.

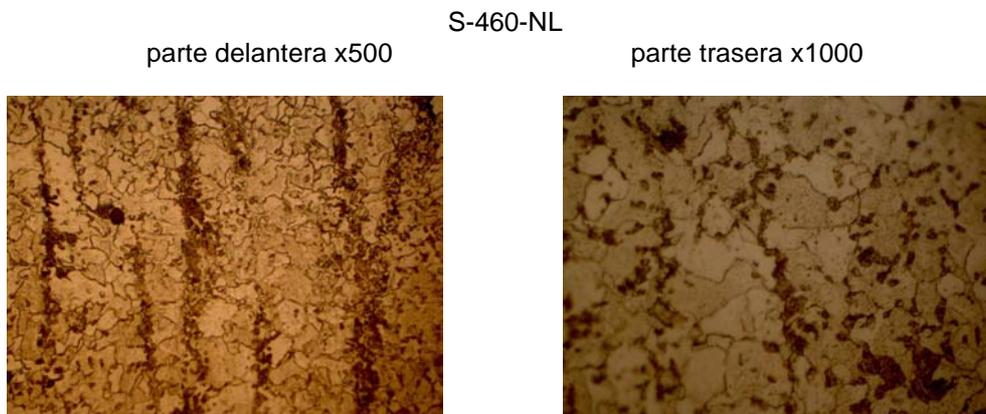


Figura 10. Micrografías acero S460NL después del ensayo de simulación de fuego.

A partir de los gráficos de temperatura tiempo, se puede comprobar de forma general que a partir de los 45 minutos, la cara interna de la probeta suele tener una temperatura superior a la A_{c3} , consiguiéndose una sobre calefacción de esta cara por encima de los 200°C , sin embargo, la cara externa solamente está ligeramente por encima de los 600°C , valor inferior a la A_{c1} de inicio de la transformación austenita. Dado que el perfil de las temperaturas dentro de las probetas es lineal por la forma geométrica, se puede deducir que al final de los ensayos transcurridas las tres horas, el 50% del acero interno de la probeta ha tenido opción para la transformación austenita y solamente alrededor del 25% del material mas exterior no ha iniciado aun dicha transformación.



En las micrografías de la Figura 9 y 10, se corrobora que las partes delanteras se observa la estructura en bandas de perlita, debido al proceso de transformación en caliente, mientras que en las caras traseras, la estructura en bandas está totalmente desdibujada, ya que la perlita que aparece se ha generado a partir de la austenita que se transformó, ésta no ha tenido mucho tiempo para el crecimiento cristalino, por lo que la ferrita presenta un tamaño de grano fino, repartiéndose la perlita generada de forma regular en la matriz. El resultado es un material. menos duro que el de partida, ya que no ha habido conformación en caliente.

4 CONCLUSIONES

Se ha operado con aceros estructurales no aleado S355NL, así como con acero aleado S460NL, según norma UNE. Todos estos aceros son de naturaleza ferrítico-perlítica y se emplean tanto en obra civil como en industrial.

Para cada caso y situación se han evaluado tanto los niveles de temperatura máximos alcanzado en los tiempos, de acuerdo con la norma ISO 834, para encontrar experimentalmente la variación real de las temperaturas en diferentes puntos de las probetas ensayadas de acero y con dimensiones de 200x100x20 mm.

Se han obtenido para los aceros ensayados, los perfiles de las temperaturas en el tiempo, sobre las probetas ensayadas, tanto por la cara expuesta al foco de calor, zona de fuego, como en la cara que se encuentra fuera de la vista del foco de calor y por tanto del fuego, tal como se ensayan los elementos estructurales en las pruebas de fuego.

Se han analizado la evolución de los perfiles de temperatura tiempo obtenidos, comprobándose la importancia del posicionamiento en la respuesta térmica de los materiales ensayados.

También se han deducido el efecto que tienen los diferentes perfiles de temperatura, en la evolución registrada de la microestructuras de los aceros ensayados, así como la evolución de las propiedades mecánicas en los aceros por medio de la dureza Rockwell B.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación, la financiación recibida a través del proyecto BIA2008-06705-C02-02.

REFERENCIAS

- 1 ASTM 119. Standard test methods for fire tests building construction and materials.4.07, section 4; 1997.
- 2 KODUR VKR, GHANI BA, SULTAN MA, LIE TT, EL-SHAYEB M. "A model for evaluating the fire resistance of contour-protected steel columns". *Structural Engineering and Mechanics*. v.12, p. 559-572, 2001.
- 3 GARDNER L. "Stainless steel structures in fire". *Proc. of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. v.160, p.129-138, 2007.
- 4 HUANG ZF, TAN KH, TIN SK "Heating rate and boundary restraint effects on fire resistance of steel columns with creep ".*Engineering Structures*. v.28,p. 805-817 , 2006.

- 5 ZENG L, TAN KH, HUANG ZF. "Primary creep buckling of steel columns". *J. Construc. Steel Res.* v. 59, p.951-970, 2003.
- 6 ALI HM, SENSENY PE, ALPERT RL. "Lateral displacement and collapse of single-story steel frames in uncontrolled fires". *Engineering Structures*, v.26(5) , p. 593-607, 2004.
- 7 NWOSU DI, KODUR VKR. "Behaviour of steel frames under fire conditions". *Can. Journal of Civil Engineering.* v. 26, p.156-167, 1999.
- 8 FRANSSSEN JM. "Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire". *Fire Safety Journal.* v. 34, p. 191-207, 2000.
- 9 MOWRER FW. "Thermal response to fire of insulated cylindrical steel elements". *Journal of Fire Protection Engineering.* v.17, p.129-143, 2007.
- 10 ALI HM, SENSENY PE. "Performance of single story frames in larges fires". *Engineering Structures*, v.3, p.449-480,2001.
- 11 BAILY CG. "The influence of the thermal expansion of beam on the structural behaviour of columns in steel-framed structures during fire". *Engineering Structures*, v. 22, p.755-768, 2000.
- 12 IMEDIO O,GOMEZ FJ,CABALLERO I,VALIENTE A. "Ductilidad a alta temperature de aceros estructurales de construccion de los tipos S460 y S275".*Anales de Mecanica de Fractura*,v. 21p. 269-274, 2004.
- 13 TOH WS,TAN KH, FUNG TC. "Strength and stability of steel frames in fire: Rankine approach. *Journal of Structural Engineering*, v.12, p.461-469 , 2001.
- 14 AENOR, UNE EN 10025-2." Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Aceros estructurales no aleados", Madrid, 2006.
- 15 AENOR, UNE EN 10025-3." Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Aceros soldables de grado fino en la condición de normalizado/laminado de normalización", Madrid, 2006.
- 16 ISO 834 Part 1, " Fire resistance test. Elements of building construction, 1992.