

# DUCTILIDAD A ALTA TEMPERATURA DE ACEROS ESTRUCTURALES DE CONSTRUCCIÓN DE LOS TIPOS S460 Y S275

O. Imedio, F. J. Gómez, L. Caballero y A. Valiente

Universidad Politécnica de Madrid

Departamento de Ciencia de Materiales

E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid

**Resumen.** En este trabajo se presentan resultados experimentales de la rotura a tracción de tres aceros estructurales de construcción tipo S460 N, S460 NL y S275 JO, desde temperatura ambiente hasta 500°C. Los aceros elegidos exhiben efectos opuestos de la temperatura sobre la ductilidad, ya que aumenta o disminuye con la temperatura según el acero. El trabajo incluye un estudio fractográfico de las roturas a tracción para explicar las diferencias de comportamiento mediante los micromecanismos de rotura y su relación con la temperatura.

**Abstract.** In this work provides experimental results of the tensile fracture of three structural steel of construction (S460 N, S460 NL and S275 JO) at temperatures ranging from the room temperature to 500°C. The steels exhibit opposed behaviours as to the effect of temperature on the ductility since it increases or decreases with temperature depending on the steel. The work includes a fractographic study of the broken specimens in order to explain the differences of behaviour through the fracture micromechanisms and their relation with temperature.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha surgido un gran interés en conocer el comportamiento mecánico de aceros estructurales de construcción a alta temperatura y en establecer hasta que punto las propiedades del acero se degradan [1]. Estos conocimientos son de suma importancia para evaluar la integridad estructural de los edificios de estructura metálica en caso de incendios con fallo de las protecciones que aíslan térmicamente la estructura. Los autores de esta investigación han observado que ciertos aceros estructurales de construcción normalizados rompen frágilmente a tracción cuando se ensayan a 500°C [2,3]. En un programa de ensayos de tracción simple a 20°C y a 500°C realizados con probetas planas de los aceros de media y baja resistencia S355JO, S275JR, S275JO [EN 10025 (1993)] y G60 [ASTM A575], se obtuvo que en todos ellos se produjeron roturas dúctiles a 20°C y frágiles a 500°C con la excepción del acero S275 JO. Estos resultados, aparentemente anómalos, han llevado a la realización de un estudio más detenido, consistente en la comparación de uno de los aceros anteriores con otros dos de alta resistencia, uno de tenacidad media S460 N y otro de tenacidad alta S460 NL, que no exhiben la anomalía descrita. Además se ha incorporado una temperatura intermedia (300°C) a las de 20 y 500°C.

Los datos publicados sobre propiedades mecánicas de aceros de construcción a alta temperatura se refieren al

comportamiento de su resistencia a tracción, pero apenas abordan el tema de la ductilidad. En la referencia [4] se publican curvas tensión-deformación del acero S355 a 300°C, 400°C, 500°C, 600°C y 700°C, pero medidas indirectamente y sólo para deformaciones en ningún caso superiores al 1,7 %. La referencia [5] es un trabajo experimental comparativo del acero estructural europeo S275 y dos aceros japoneses de construcción modificados para mejorar su comportamiento al fuego. El intervalo de temperaturas explorado llega hasta 700°C y las propiedades comparadas son el límite elástico, la resistencia a tracción y el alargamiento a rotura bajo carga máxima. Los valores experimentales y los valores del proyecto del acero S275 concuerdan en cuanto a resistencia, pero las diferencias en cuanto a alargamiento son significativas. Los aceros resistentes al fuego mantienen los valores de la resistencia hasta temperaturas mayores que el acero S275 (600°C frente 400°C), pero su ductilidad no mejora la de éste. La referencia [6] incluye medidas de resistencia y ductilidad a temperatura ambiente de aceros de construcción afectados por incendios, pero no a las temperaturas que el acero puede alcanzar en el incendio.

En una primera parte del trabajo se exponen las características de los materiales utilizados, las técnicas de los ensayos mecánicos realizados y los resultados obtenidos. La segunda parte está dedicada al estudio fractográfico de las roturas producidas.

**Tabla 1.** Composición química de los aceros.

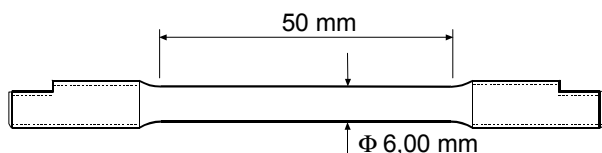
Aceros	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	N	Al	Mo	C <sub>equi</sub>
S460N	0.18	1.54	0.41	0.002	0.015	-	0.47	-	0.057	-	0.071	0.143	0.4966
S460NL	0.09	1.61	0.447	0.001	0.012	0.026	0.026	0.012	0.03	0.004	0.038	0.06	0.378
S275JO	0.16	0.75	0.16	0.022	0.011	0.09	0.13	0.52	0	0.01		0.	0.3515

## 2. EXPERIMENTACIÓN

Los aceros empleados en esta investigación son de los tipos S460N, S460NL [7] y S275 JO [8]. Corresponden a aceros estructurales de construcción, de grano fino, soldables, con un límite elástico de 460 MPa los dos primeros y 275 MPa el tercero. La diferencia entre los acero S460N y S460NL radica en la tenacidad, ya que la temperatura de transición Charpy exigida es de  $-30^{\circ}\text{C}$  para el S460N (tenacidad media) y de  $-50^{\circ}\text{C}$  para el S460NL (tenacidad alta).

La tabla 1 indica la composición química de los tres aceros. Los aceros S460 N y S460 NL fueron suministrados en chapa de 30 mm de espesor y el acero S275 JO en chapa de 10 mm.

Los ensayos de tracción se han realizados a  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$  y  $500^{\circ}\text{C}$  en la dirección de laminación de la chapa, empleando probetas cilíndricas cuyas dimensiones aparecen en la figura 1.



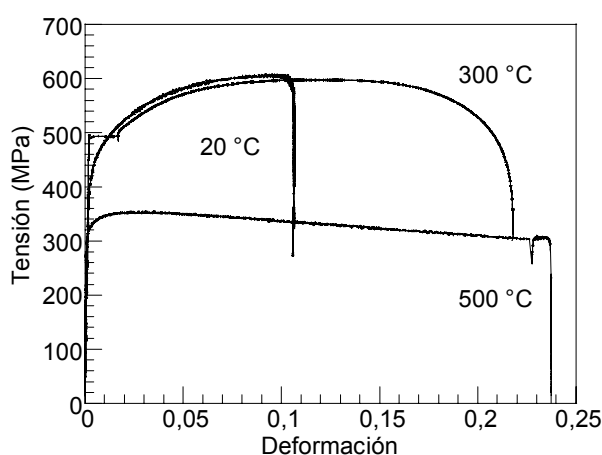
**Fig 1.** Dimensiones de las probetas ensayadas.

Se han ensayado los tres materiales y cada ensayo se han realizado por duplicado. Una cámara con temperatura regulable acoplada a la máquina de ensayos permitió mantener la temperatura del ensayo y a la vez aplicar la carga de tracción. Las deformaciones se midieron con un extensómetro capacitivo de alta temperatura sin refrigeración sujeto a la probeta mediante cuchillas y muelles especiales, cuya base de medida era de 25 mm y su máximo alargamiento 5 mm. La temperatura de la probeta se registró con un termopar tipo K colocado en contacto con la misma. El controlador de temperatura de la cámara se ajustó en función de la lectura del termopar.

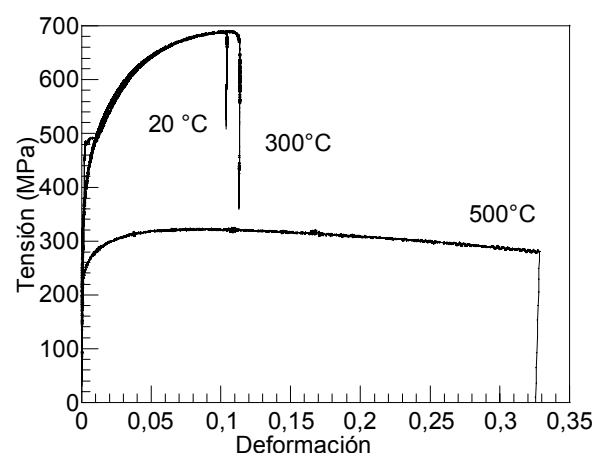
La probeta y las mordazas, junto con el extensómetro, permanecían en el interior de la cámara y se unían al actuador y a la célula de carga mediante dos barras de acero inoxidable y baja conducción que atravesaban la cá-

mara por sendos orificios dispuestos al efecto. Un sistema de refrigeración de las barras evitaba el calentamiento de la célula de carga.

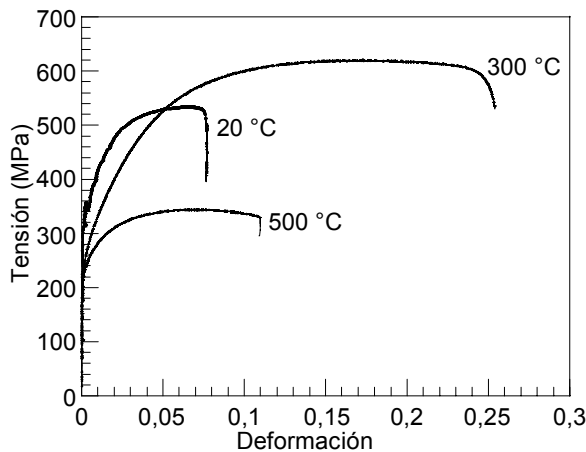
El calentamiento de las probeta hasta la temperatura de ensayo se realizó a razón de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  bajo una precarga de 1 kN. Una vez alcanzada la temperatura de ensayo, ésta se mantuvo durante 30 min antes de comenzar el ensayo, a fin de asegurara la uniformidad de temperatura de la probeta.



**Fig 2.** Curvas tensión-deformación del acero S460 NL a las temperatura de ensayo.



**Fig 3.** Curvas tensión-deformación del acero S460 N a las temperatura de ensayo.



**Fig 4.** Curvas tensión-deformación del acero S275 JO a las temperatura de ensayo.

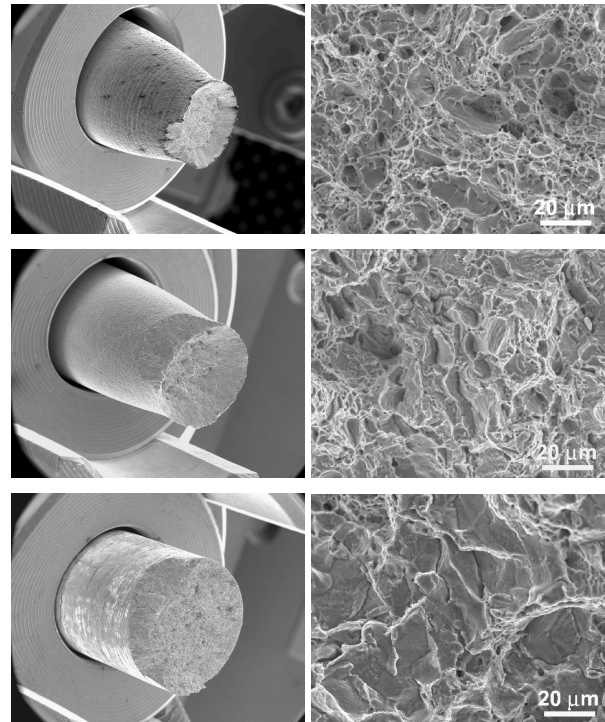
Las curvas tensión-deformación obtenidas son las de las figuras 2, 3 y 4. Las diferencias en la forma final de las curvas se deben a la formación de la estricción dentro de la base del extensómetro (aceros S460 NL y S275 JO a 300 °C). Se puede observar en las tres figuras una pérdida de resistencia al aumentar la temperatura. En todos los aceros, las curvas ponen de manifiesto que la resistencia disminuye con la temperatura, pero la tendencia de la ductilidad es menos clara. En los aceros S460N y S460NL la rotura se produjo dúctilmente, previa formación de la estricción las tres temperaturas. En cambio en el acero S275 JO, esto solo ocurrió a 20°C y 300°C ya que a 500°C la rotura se produjo sin estricción.

### 3. FRACTOGRAFIA

Las superficies de rotura fueron estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido. Del estudio realizado se muestran a continuación los resultados obtenidos a 10 y a 1000 aumentos.

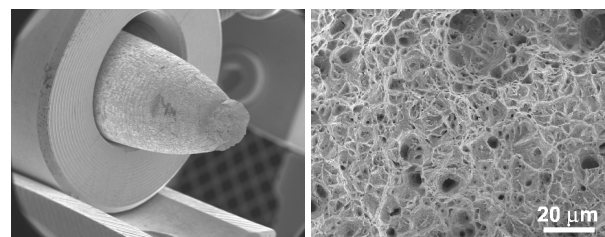
En el caso del acero S275 JO, la secuencia de fotos de la figura 5 (tres parejas de macrografía y micrografía) corresponden de arriba abajo a 20°C, 300°C y 500°C respectivamente y muestran una clara disminución de la estricción al aumentar la temperatura de ensayo. Esta pérdida de ductilidad es consistente con las características micromorfológicas de las roturas. Las dos primeras macrografías muestran sendas roturas en copa y cono de textura fibrosa que producen una apariencia de rugosidad creciente con la deformación plástica. En las micrografías correspondientes se observa un relieve continuo de cúpulas sin interrupciones por bordes de grano, característico de las roturas transgranulares debidos al crecimiento y coalescencia de microvacíos

. Por el contrario, la tercera macrografía muestra una rotura frágil plana de aspecto cristalina. El relieve que se observa en la micrografía es propio de una rotura intergranular [9]. constituida por facetas de separación de los granos, aunque hay síntomas de ductilidad.

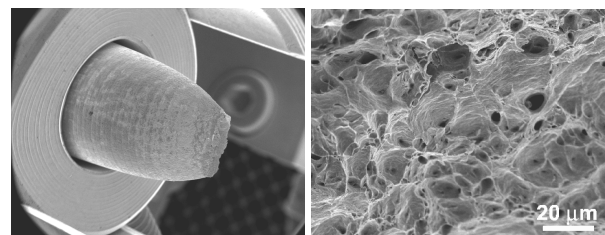


**Fig 5.** Macrografías y fractografías de la rotura del acero S275 JO a 20°C, 300°C y 500°C.

Las figuras 6 y 7 son macro y micrografías de las roturas de los aceros S460 N y 460 NL a 500°C. Las roturas son dúctiles, en copa y cono, y de aspecto fibroso. En ambos casos la rotura fue transgranular y se produjo por el crecimiento y coalescencia de huecos, con un desarrollo de las cúpulas mayor en el acero S460 NL debido a las mayores deformaciones plásticas que se alcanzara en este acero antes de romperse.



**Fig 6.** Macrografías y Fractografías y del acero S460 N a 500°C.



**Fig 7.** Macrografías y fractografías del acero S460 NL a 500°C.

#### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las figuras 8, 9 y 10 muestran el efecto de la temperatura sobre el límite elástico, la resistencia a tracción y la estricción en los tres aceros. En la figura 8 se observa que la disminución del límite elástico con la temperatura se produce gradualmente en el caso del acero S275 JO, y bruscamente en los aceros S460 N y S460 NL a partir de 300°C.

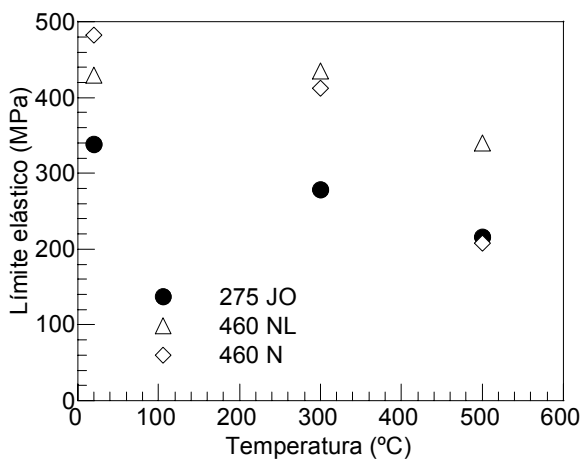


Fig 8. Variación del límite elástico con la temperatura.

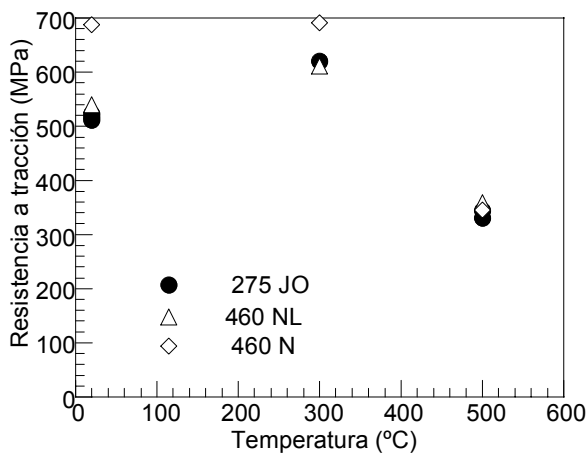


Fig 9. Variación de la resistencia a tracción con la temperatura.

La influencia de la temperatura sobre la resistencia a tracción es similar en los tres aceros entre 300°C y 500°C donde se produce una fuerte disminución (figura 9), mientras que crece ligeramente entre 20°C y 300°C para los aceros S275 JO y S460 NL. Se puede observar que la resistencia a 500°C es igual para los tres.

La diferencia más clara entre los aceros aparece en la estricción. En los aceros S460 N y S460 NL aumenta con la temperatura mientras que en el acero S275 JO disminuye, acelerándose la disminución a partir de 300°C (figura 10). El origen de esta diferencia de comportamiento (ductilidad creciente con la temperatura frente a ductilidad decreciente) puede encontrarse en la composi-

ción química de los aceros. Si se comparan dichas composiciones (tabla 1) se observa que el contenido en cobre del acero con ductilidad decreciente es considerablemente más alto que el de los aceros con ductilidad creciente.

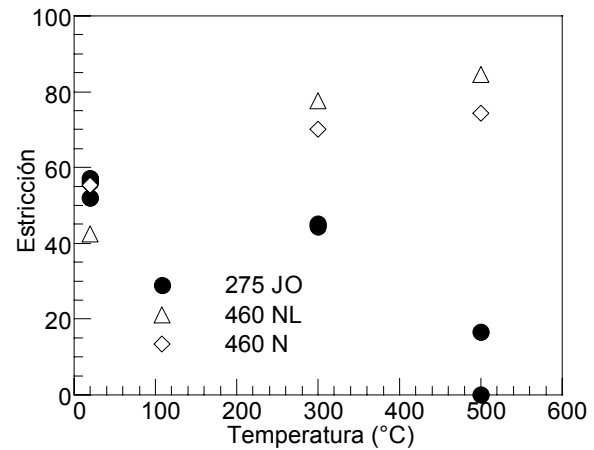
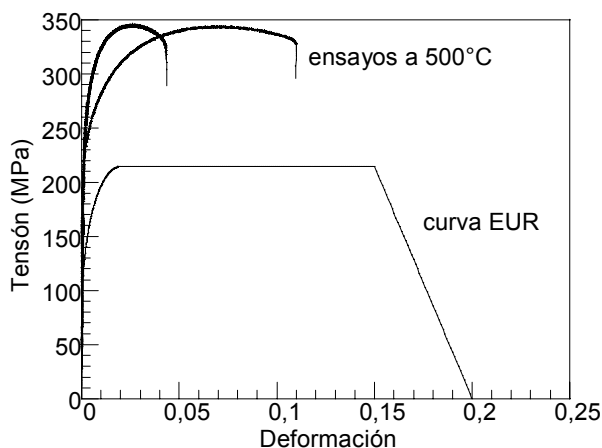


Fig 10. Variación de la estricción con la temperatura.

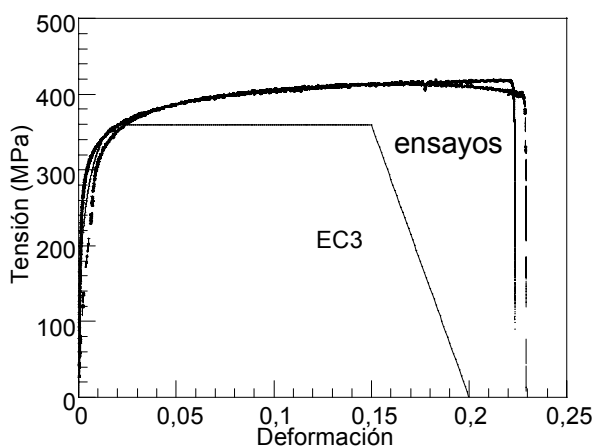
Para confirmar esta posibilidad sería necesario realizar ensayos de rotura con concentradores de tensiones que permitan identificar los iniciadores de la rotura y comprobar su relación con el cobre. La segregación en el borde de grano propiciada por las altas temperaturas pueden proporcionar estos iniciadores [10].

Las curvas tensión deformación obtenidas en los ensayos se han comparado con las que proponen el Eurocódigo 3 para cálculo de estructuras metálicas ante incendio [11]. Dichas curvas se describen en la parte 10 del Eurocódigo y están determinadas por el límite elástico del material. Los correspondientes a los aceros de esta investigación a 500°C se han presentado en las figuras 11, 12 y 13, junto a las curvas experimentales.

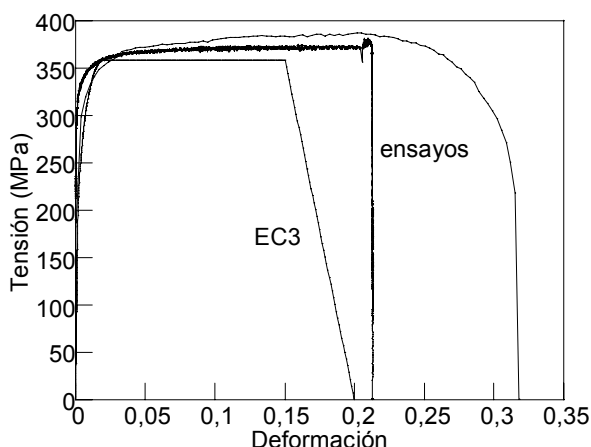
Comparando los valores del Eurocódigo para los aceros S460 N y S460 NL con sus curvas experimentales, puede verse que se encuentran del lado de la seguridad, tanto en cuanto a resistencia como en ductilidad, ya que las curvas calculadas están encerradas bajo las curvas experimentales. Sin embargo, para el acero S275 JO la resistencia de cálculo es inferior a la real pero la ductilidad es superior. Esto indica que los requisitos exigidos a los aceros de construcción normalizados no garantizan un comportamiento mecánico a alta temperatura más seguro que el adoptado para el cálculo.



**Fig 11.** Curva de diseño del eurocódigo EC3 para el aceros S275 JO a 500°C.



**Fig 12.** Curva de diseño del eurocódigo EC3 para el aceros S460 N 500°C.



**Fig 13.** Curva de diseño del eurocódigo EC3 para el aceros S460 NL 500°C.

## 5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la investigación revelan que el comportamiento de los aceros S460 N y S460 NL a 500°C es dúctil, mientras que el del acero S275 JO es frágil a la misma temperatura. De acuerdo con las comparaciones realizadas, el origen de este comportamiento anómalo podría hallarse en la composición química y en particular en el contenido de cobre. Las morfologías macro y microscópicas de las roturas son consistentes con el comportamiento reflejado por los ensayos.

El efecto de la temperatura sobre la resistencia no presenta anomalías, aunque es más intenso en los aceros más resistentes y a 500°C la diferencia desaparece.

El Eurocódigo EC3 no tiene en cuenta la ductilidad decreciente con la temperatura de algunos aceros de construcción aquí detectada. Las curvas tensión-deformación que propone para el cálculo ante el incendio no están del lado de la seguridad. Los requisitos exigidos a los aceros no son condición suficiente del comportamiento de cálculo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia y Tecnología la financiación recibida a través del proyecto MAT 0201422.

## REFERENCIAS

- [1] Bazant, Z.P y Zhon, Y. "Why did the World Trade Center collapse?- Simple Analysis" *J. Eng. Mechanics ASCE*, 128, 2-6 (2002).
- [2] A. Valiente y F. J. Gómez. "Ensayos de Resistencia al Fuego de los perfiles laminados IPE 160 S355JO y HEB 220 S275JO y de sus uniones soldadas" Informe para Calidad Siderúrgica. (2001).
- [3] A. Valiente y F. J. Gómez. "Ensayos de Resistencia al Fuego de Chapas de Aceros S355JO, S275JR, S275JO y G60" Informe para Calidad Siderúrgica. (2002).
- [4] Outinen, J., Kesti, J. y Mäkeläinen, P. "Fire Design Model for Structural Steel S355 Based Upon Transient State Tensile Test Results" *Journal of Constructional Steel Research*. 42 161-169 (1997).
- [5] Kelly, F.S y Sha, W. "a comparison of the mechanical properties of fire-resistant and S275 structural steel", *Journal of Constructional Steel Research*. 50 223-233 (1999).
- [6] Setien, J. González, J.J., Alvarez, J.A y Polanco J.A. "Evolution of mechanical behaviour in structural steel subjected to high temperatures" *Eng. Failure Analysis*, 9, 191-200 (2002).
- [7] CEN, EN 10113. Producto laminados en caliente para la construcción metálica (1993).

- [8] CEN, EN 10025. Productos laminados en caliente , de acero no aleado para construcción metálicas de uso general.
- [9] Metal Handbook, vol 9 Fractography and atlas fractographs. 8th edition. ASM, Metals Park. Ohio. USA (1974).
- [10] Briant, L C. Y Bannerirji, S . k. “Intergranular Failure in Steel: The Role of Grain – Boundary Composition” *International Metals Reviews*. **4** 164-199 (1978).
- [11] CEN “EN 1993 1-2: Eurocode 3- Design of Structures – Part 1.2: General Rules –Structural Fire Design”, Comité Europeo de Normalización (1995).