

## TENACIDAD DE FRACTURA DE ACEROS ESTRUCTURALES DE ALTA RESISTENCIA Y GRAN ESPESOR

J. M. Flores, A. Valiente, M. Elices y J. Ruíz

Departamento de Ciencia de Materiales  
E.T.S. de Ingenieros de Caminos. Universidad Politécnica de Madrid

**Resumen.** En este trabajo se compara el comportamiento fractomecánico de un acero estructural con el comportamiento tipificado en que se basa el método de prevención de la rotura no dúctil del Eurocódigo 3 "Proyecto de estructuras metálicas de acero". El material elegido es acero de construcción metálica S460NL fabricado en planchas de fuerte espesor (80 mm). Esta característica, unida a su alta resistencia y tenacidad, eleva el riesgo de rotura no dúctil frente a otros aceros del Eurocódigo 3, lo que justifica la elección. La caracterización del material se ha llevado a cabo mediante ensayos de rotura con probetas preafisuradas de espesor igual al de laminación del acero. Los ensayos se han realizado a velocidad de carga estática y a distintas temperaturas, abarcando el intervalo de  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ . La contrastación con el Eurocódigo se basa en comparar: (a) la tenacidad medida en los ensayos con la de proyecto que el Eurocódigo establece para rotura frágil; y (b) el diagrama de rotura del Eurocódigo para rotura no frágil con los datos de las roturas dúctiles y de transición que se han producido en los ensayos.

**Abstract.** The actual fracture behaviour of a structural steel for steel structures is compared with the typified behaviour of the steel assumed by Eurocode 3 "Design of steel structures" in the design method of Annex C against brittle fracture. The chosen material is a high strength, high toughness steel S460NL type and was made as rolled plates of large rolling thickness (80 mm). All these features increase the risk of non-ductile failure for this steel regarding others of Eurocode 3 and explain its selection for the research. The actual fracture behaviour was stated experimentally by performing fracture tests at static loading rate with precracked compact tensile specimens of the same thickness as the rolled plates. The temperature range from  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $20^{\circ}\text{C}$  was explored. The actual behaviour and that typified by Eurocode 3 are contrasted by comparing the "design" toughness for brittle fracture and the failure assessment diagram assumed by Eurocode 3 for the tested steel with the corresponding experimental data.

### 1. INTRODUCCION

Tradicionalmente, las especificaciones de diseño basadas en criterios de integridad estructural han estado reservadas a tecnologías como la energética o la aeronáutica donde las estructuras son de gran responsabilidad y el aprovechamiento óptimo de los materiales estructurales es casi imprescindible. Sin embargo, también los puentes metálicos y otras estructuras metálicas de construcción empiezan a formar parte de esa categoría, porque a su gran responsabilidad se unen unas condiciones de servicio cuya severidad obliga a optimizar el diseño y el uso de los materiales para poder satisfacerlas. Esta es la causa de que las recomendaciones más recientes de proyecto y construcción de estructuras metálicas incluyan procedimientos cuantitativos para preservar la integridad estructural en sustitución de las reglas cualitativas aplicadas hasta ahora. La fuente de estos procedimientos es el método de diseño contra la rotura contenido en el Anejo C del Eurocódigo 3 [1]. El Eurocódigo tipifica las propiedades mecánicas de los aceros estructurales para construcción metálica y el Anejo C tipifica el comportamiento frente a la rotura frágil adoptando valores de la tenacidad

que se calculan en función de la temperatura, la velocidad de deformación y el espesor mediante fórmulas dadas. Estas fórmulas se basan en numerosas medidas de tenacidad realizadas en el IRSID [2] con aceros estructurales (si bien con poca representación de los utilizados en construcción metálica), y en los resultados experimentales de Barsom y Rolfe sobre la influencia de la velocidad de deformación en la tenacidad [3].

Para roturas no frágiles, el Eurocódigo adopta uno de los diagramas de rotura del método R6 [4]. Las constantes con que se particulariza el diagrama para cada acero son el límite elástico convencional al 0,2 % y la tenacidad que resulta de aplicar la fórmula de cálculo para las condiciones de temperatura, velocidad de deformación y espesor existentes, independientemente de que no den lugar a roturas frágiles. El límite elástico convencional se emplea como límite elástico ideal para calcular las cargas de colapso plástico y la tenacidad calculada como valor límite del factor de intensidad de tensiones.

El objetivo de este trabajo es contrastar el comporta-

miento fractomecánico tipificado del Eurocódigo con el comportamiento real, caracterizado experimentalmente, de un acero estructural de gran espesor para construcción metálica. El acero elegido es del tipo S460NL, es decir, uno de los de mayor resistencia y tenacidad del Eurocódigo 3. Estas características hacen de él un excelente candidato para condiciones de servicio muy exigentes y esto justifica su elección.

**2. EXPERIMENTACION REALIZADA**

El acero elegido para la investigación pertenece a la familia S460NL EN 10113 [5] de aceros estructurales de construcción fabricados por laminación en caliente, es de fabricación comercial y fue suministrado en planchas con el espesor de laminación, 80 mm. La composición química aparece en la tabla 1 y está dentro de los límites que establece la Euronorma EN 10113, Parte 2 para aceros estructurales soldables de grano fino. Es de destacar la presencia de aleantes (Al, Nb) para refinamiento de grano y control de la transformación.

Tabla 1. Composición química del acero (% en peso).

C	Si	Mn	P	N	S
0,07	0,38	1,57	0,012	0,005	0,001
Al	Ni	Nb	Cu	Cr	Mo
0,043	0,42	0,02	0,16	0,025	0,14

De acuerdo con el objetivo de la investigación y los requisitos del método del Anejo C del Eurocódigo 3, en el programa de ensayos mecánicos se han incluido ensayos de tracción, medidas de resiliencia y ensayos de tenacidad. Los ensayos de tracción se realizaron a tres temperaturas (-30°C, 20°C y 50°C) con probetas cilíndricas de 6 mm de diámetro extraídas del plano medio de la chapa y orientadas haciendo coincidir su dirección longitudinal con la de laminación. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero.

Temperatura	Módulo elástico	Límite elástico al 0,2 %	Resistencia a tracción	Máxima deformación uniforme
-30°C	200 GPa	450 MPa	570 MPa	11 %
20°C	190 GPa	430 MPa	540 MPa	11 %
50°C	200 GPa	410 MPa	515 MPa	13 %

Para las medidas de resiliencia que requiere el Eurocódigo EC3 se realizaron ensayos Charpy empleando probetas extraídas del plano medio de la chapa con la arista en V y la dimensión mayor paralelas respectivamente a la dirección del espesor y a la de laminación. Para determinar la temperatura de transición se exploró

el intervalo de temperaturas de -200°C a 0°C con los resultados que muestra la Figura 1. El valor de -52°C de la temperatura de transición  $T_{27}$ , a la cual la energía absorbida es de 27 J, procede de la curva de ajuste, efectuado mediante una función tangente hiperbólica de 3 parámetros.

Los ensayos de tenacidad se llevaron a cabo empleando probetas compactas configuradas conforme a la norma EFAM GTP94 [6] con un canto útil de 150 mm y un espesor de 75 mm, igual al espesor de laminación de las planchas salvo las capas eliminadas a ambos lados para regularizar las superficies. La línea de carga de las probetas era paralela a la dirección de laminación de las planchas.

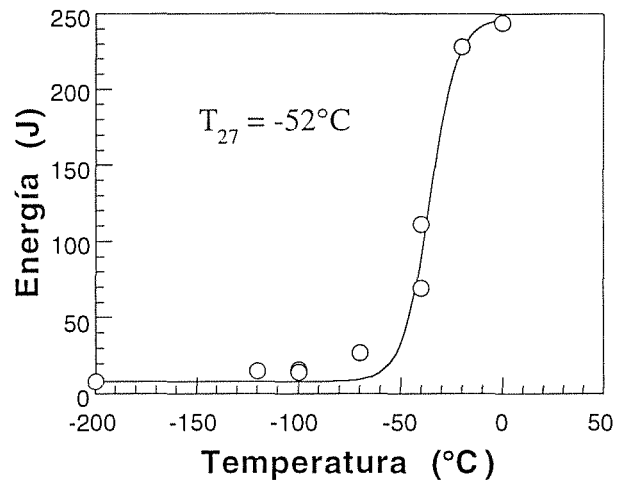


Fig.1. Resultados de los ensayos de resiliencia.

La prefisuración se realizó escalonando la carga de fatiga dentro de los límites de la norma hasta reducir el ligamento resistente a 60 mm, el 40% del canto útil. Tras la prefisuración se mecanizaron sendas entallas laterales a la altura del plano de la fisura dejando un espesor neto de probeta de 60 mm, el 80% del espesor bruto.

La aplicación de la carga durante los ensayos se realizó en control de CMOD (apertura de la fisura a la altura de la línea de carga) empleando para ello un extensómetro específico de este tipo de medidas con 5 mm de base y 8 mm de recorrido. En previsión de un posible agotamiento del recorrido del extensómetro, se diseñó un sistema de sujeción regulable para las cuchillas de apoyo, con la posibilidad de retornar a la separación inicial de 5 mm en cualquier momento del ensayo. Periódicamente a lo largo de éste, se efectuaron descargas parciales conforme a la norma [6] para medir la flexibilidad de la probeta y detectar cualquier crecimiento de grieta.

Los ensayos de tenacidad realizados fueron seis, dos a 20°C, dos a -30°C, uno a -60°C y uno a -100°C. En los dos primeros la rotura de la probeta se produjo por

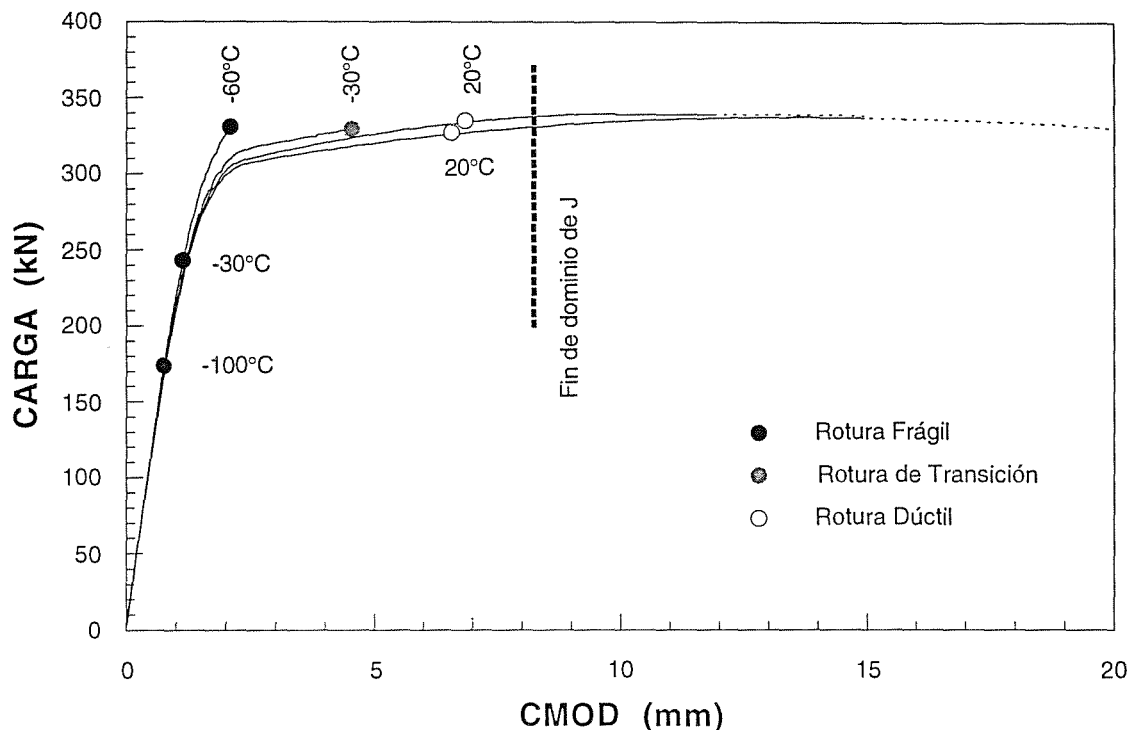


Fig. 2. Curvas Carga-CMOD obtenidas en los ensayos de tenacidad.

desgarramiento dúctil y colapso plástico posterior (rotura dúctil), y en los cuatro restantes por propagación brusca de la fisura. Tres de estas roturas se produjeron en la rama elástica de la curva carga-CMOD (rotura frágil) y la cuarta después de que la probeta hubiese alcanzado la situación de plasticidad extendida, pero sin haberse iniciado el desgarramiento dúctil (rotura de transición). En la Figura 2 se han representado las curvas de los seis ensayos con indicación de la temperatura y el tipo de rotura. La iniciación del desgarramiento dúctil en los ensayos realizados a 20°C se determinó mediante el cambio de flexibilidad de la probeta, de acuerdo con el criterio de la norma [6]. El tramo de las curvas donde la integral J domina el campo de tensiones del frente de la fisura se ha determinado mediante las expresiones que proporciona la norma [6] para dicha integral y para su valor límite:

$$J = \frac{(2 + 0,522 \frac{b}{W}) A}{b B_n} \left. \begin{matrix} \\ b > \frac{40J}{R_{p0,2} + R_m} \end{matrix} \right\} \Rightarrow A < \frac{b^2 B_n (R_{p0,2} + R_m)}{80 + 20,88 \frac{b}{W}} \quad (1)$$

donde b es el ligamento, W el canto útil, B<sub>n</sub> el espesor neto, A el trabajo de las fuerzas aplicadas, R<sub>m</sub> la resistencia a tracción y R<sub>p0,2</sub> el límite elástico al 0,2%. Como puede verse, todas las roturas tuvieron lugar bajo dominio de la integral J. Los valores críticos de rotura o de iniciación de la rotura figuran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores críticos de la integral J.

Temperatura de ensayo	Tipo de rotura	Valor crítico de la integral J
20°C	Desgarramiento dúctil	1150 kJ/m <sup>2</sup>
20°C	Desgarramiento dúctil	1120 kJ/m <sup>2</sup>
-30°C	Rotura de transición	736 kJ/m <sup>2</sup>
-30°C	Rotura frágil	91 kJ/m <sup>2</sup>
-60°C	Rotura frágil	263 kJ/m <sup>2</sup>
-100°C	Rotura frágil	41 kJ/m <sup>2</sup>

### 3. LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL EN EL EUROCODIGO EC3.

Los fundamentos del método del Eurocódigo 3 contra la rotura puede consultarse en la referencia [7]. Por lo que al comportamiento del material se refiere, el punto de partida es el diagrama de rotura de la opción 2 del método R6 [4]. Este tipo de diagrama es una interpolación ingenieril entre las situaciones de rotura frágil y colapso plástico para situaciones intermedias, en las cuales la rotura se produce por colapso plástico con desgarramiento dúctil progresivo o por propagación brusca de la fisura bajo plasticidad extendida. El diagrama adoptado por el Eurocódigo 3 supone material idealmente plástico, sin endurecimiento por deformación, y está definido por las dos condiciones siguientes:

$$\frac{P}{P_Y} < 1$$

$$\frac{K}{K_C} < \left(1 + \frac{P^2}{2P_Y^2}\right)^{-1/2} \quad (2)$$

donde  $P$  y  $K$  son la carga y el factor de intensidad de tensiones aplicados y  $P_Y$  y  $K_C$  son los valores de esas magnitudes que respectivamente producen el colapso plástico y la rotura frágil en ausencia de interacción entre ambos mecanismos. La representación gráfica de este diagrama de rotura puede verse en la figura 3.

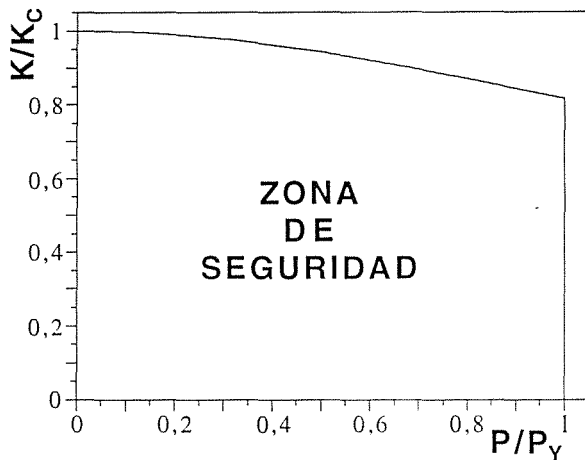


Fig. 3. Diagrama de rotura del Eurocódigo 3.

La carga de colapso plástico es un valor teórico cuyo cálculo sólo requiere elegir adecuadamente el límite elástico ideal para asimilar el material a un sólido perfectamente plástico. Dado que el escalón de cedencia es típico de los aceros estructurales, el Eurocódigo 3 opta por el límite elástico convencional al 0,2%.

Las dificultades para establecer el valor de la tenacidad  $K_C$  son mayores. De acuerdo con el diagrama de rotura, esta tenacidad tiene el significado de factor de intensidad tensiones que origina la rotura frágil. Por ello, los valores que el Eurocódigo 3 asigna a la tenacidad  $K_C$  proceden de medidas de este tipo [2, 3] generalizadas a los aceros de construcción mediante fórmulas de cálculo que proporcionan el valor de  $K_C$  en función de la temperatura, el espesor y la velocidad de deformación. Ahora bien, hay combinaciones de estas variables para las cuales la rotura frágil no se produce y la tenacidad  $K_C$  pierde el significado de factor de intensidad tensiones crítico, quedando reducido su papel al de parámetro del diagrama de rotura. Sin embargo, el Eurocódigo 3 extrapola ese significado manteniendo las fórmulas de cálculo para tales combinaciones. Los valores de la tenacidad  $K_C$  del Eurocódigo 3 resultan de aplicar las siguientes condiciones:

- Para cada temperatura y velocidad de deformación hay un espesor mínimo  $B_m$  por debajo del cual la tenacidad  $K_C$  es igual a la tenacidad de fractura en defor-

mación plana  $K_{IC}$  y no depende del espesor. El espesor mínimo  $B_m$ , la tenacidad de fractura en deformación plana  $K_{IC}$  y el límite elástico al 0,2%  $f_Y$  están relacionados por la igualdad:

$$B_m = 2,5 \left( \frac{K_{IC}}{f_Y} \right)^2 \quad (3)$$

- La tenacidad de fractura en deformación plana  $K_{IC}$  depende de la temperatura  $T$  y de la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$  de acuerdo con la expresión:

$$K_{IC} = K_0 e^{\alpha(T-T_0)} \quad (4)$$

siendo  $K_0 = 100 \text{ MPam}^{1/2}$ ,  $\alpha = 0,01 (\text{°C})^{-1}$  y  $T_0$  una temperatura cuyo valor en  $\text{°C}$  es:

$$T_0 = 25\text{°C} + 1,4T_{27} + (83 - 0,08f_Y)\dot{\epsilon}^{0,17} \quad (5)$$

donde la temperatura de transición del ensayo Charpy  $T_{27}$  debe expresarse en  $\text{°C}$ , el límite elástico  $f_Y$  en MPa y la velocidad de deformación  $\dot{\epsilon}$  en  $\text{s}^{-1}$ . El sumando de  $25\text{°C}$  que aparece en la definición de  $T_0$  es un margen de seguridad añadido por el Eurocódigo 3 a la definición original de  $T_0$  dada en [2].

- Para espesores superiores a  $B_m$  la tenacidad  $K_C$  varía con el espesor  $B$  según:

$$K_C = K_{IC} \left( \frac{B_m}{B} \right)^{0,4} = 1,4427 \frac{K_{IC}^{1,8}}{B^{0,4} f_Y^{0,8}} \quad (6)$$

#### 4. ANALISIS DE RESULTADOS

Un primer análisis de los resultados experimentales en relación con el método del Eurocódigo 3 consistiría en comparar los valores de la tenacidad medidos en el acero ensayado con los de proyecto que le asigna el Eurocódigo. La comparación no puede ser directa salvo en el caso de rotura frágil, porque para roturas dúctiles o de transición la tenacidad de proyecto del Eurocódigo es un valor extrapolado. Sin embargo, lo que sí se puede hacer es comprobar si los valores experimentales siguen una tendencia que converja hacia los valores del Eurocódigo cuando éstos no son extrapolaciones, es decir, cuando la rotura es frágil. La tenacidad tiene en este caso el significado de valor crítico del factor de intensidad de tensiones, por lo cual parece apropiado hacer la comparación con los valores experimentales de rotura o de iniciación de la rotura del factor de intensidad de tensiones.

La Figura 4 muestra el resultado de la comparación. La curva continua es la tenacidad de proyecto del Eurocódigo obtenida al particularizar las ecuaciones (3) a (6) para el espesor de laminación del acero ( $B = 80 \text{ mm}$ ), la temperatura de transición medida en los ensayos Charpy ( $T_{27} = -52\text{°C}$ ), la velocidad de deformación típica de ensayos estáticos ( $\dot{\epsilon} = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ), y el límite elástico  $f_Y$  de

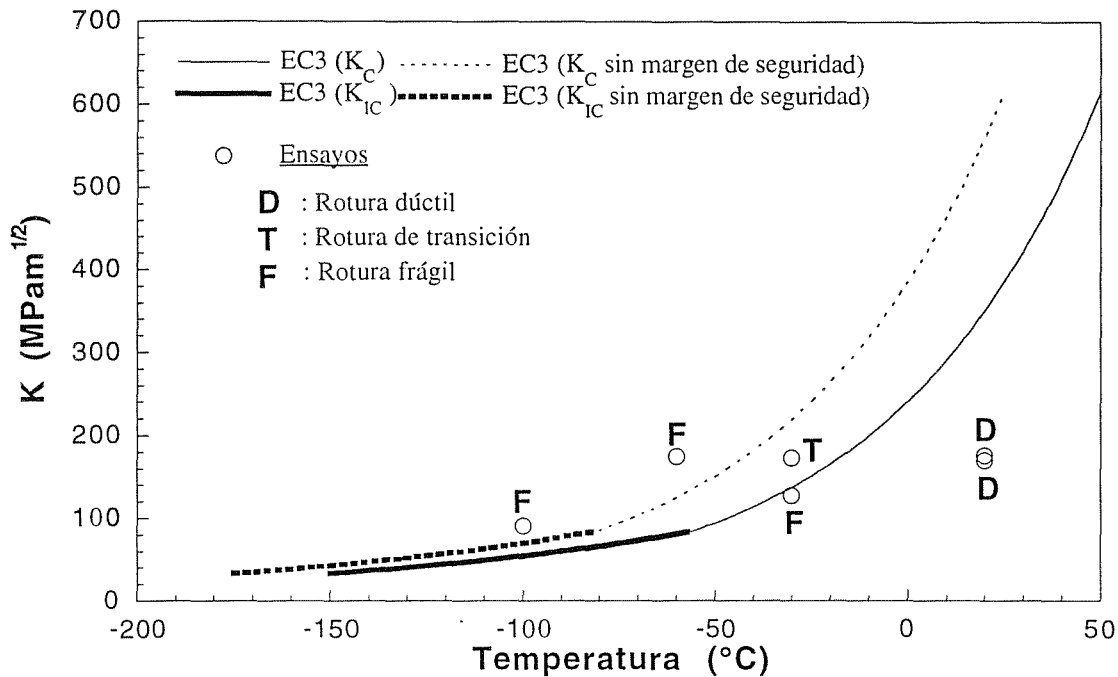


Fig. 4. Tenacidad del Eurocódigo 3 y factores de intensidad de tensiones de rotura del acero ensayado.

la tabla 2 extrapolado linealmente por debajo de  $-30^{\circ}\text{C}$ . El tramo de la curva en que la tenacidad es la tenacidad de fractura en deformación plana aparece destacado del resto. La curva discontinua es la continua trasladada  $25^{\circ}\text{C}$  a la izquierda, es decir, representa la tenacidad de proyecto para el acero ensayado sin margen de seguridad.

Como puede verse en la Figura 4, los puntos correspondientes a los datos de rotura reales se sitúan claramente por debajo de la curva de tenacidades del Eurocódigo 3 cuando la rotura es dúctil y tienden a aproximarse a la curva cuando es de transición o frágil. Por la propia naturaleza del fenómeno, en el intervalo de transición entre la rotura dúctil y la rotura frágil, se produce una gran dispersión de resultados. Teniendo en cuenta esto, la tenacidad de proyecto del Eurocódigo 3 para la rotura frágil del acero ensayado puede considerarse una predicción acertada. Para las roturas dúctiles y de transición la tenacidad del Eurocódigo 3 es un parámetro del diagrama de rotura cuya comprobación requiere comparar el diagrama con los datos reales de rotura.

La comparación con el diagrama de rotura aparece en la Figura 5. La fórmula empleada para calcular la carga de colapso plástico de las probetas CT [8] se basa en la teoría de líneas de deslizamiento y se ha calculado con arreglo al Eurocódigo, esto es, adoptando el límite elástico al 0,2% (extrapolado linealmente para las temperaturas inferiores a  $-30^{\circ}\text{C}$ ) como límite elástico ideal. Todos los puntos de rotura real quedan fuera de la zona que delimita el diagrama y confirman la validez de éste como frontera de seguridad para el acero ensayado. Sin embargo conviene analizar por separado los distintos tipos de rotura.

Los puntos correspondientes a las roturas dúctiles están fuera de la zona de seguridad, pero próximos a ella porque la carga de iniciación de la rotura sólo es ligeramente superior a la de colapso plástico calculada con el límite elástico convencional. La situación no varía aunque la rotura dúctil se identifique con el agotamiento de la probeta y no con la iniciación del desgarramiento, porque la diferencia entre ambas cargas de acuerdo con la Figura 2. Para rotura dúctil el margen de seguridad que ofrece el diagrama es pequeño y confirma el acierto del Eurocódigo 3 despreciando la capacidad de endurecimiento de los aceros estructurales al adoptar el límite elástico convencional para calcular las cargas de colapso plástico. No obstante, incluso así el margen de seguridad podría agotarse para el acero ensayado a temperaturas de servicio por encima de la máxima de ensayo si el desgarramiento dúctil se produce con más facilidad y el agotamiento de la probeta se acelera.

Los puntos que representan las roturas frágiles y de transición están muy alejados de la zona de seguridad, con excepción de la rotura frágil producida a  $-30^{\circ}\text{C}$ . Este caso puede ser significativo dado el reducido número de ensayos realizados y la componente probabilística que tienen las roturas de esta clase. Es importante destacar que se ha respetado el margen de seguridad de la ecuación (5) al calcular las tenacidades del Eurocódigo para determinar las coordenadas de los puntos representados, a pesar de lo cual apenas existe margen de seguridad en ese resultado. Si fuese un dato estadísticamente representativo, la reducción del factor de intensidad de tensiones límite con que el diagrama de rotura compensa la contribución del colapso plástico a la rotura, sería insuficiente para una fracción significativa de roturas no dúctiles.

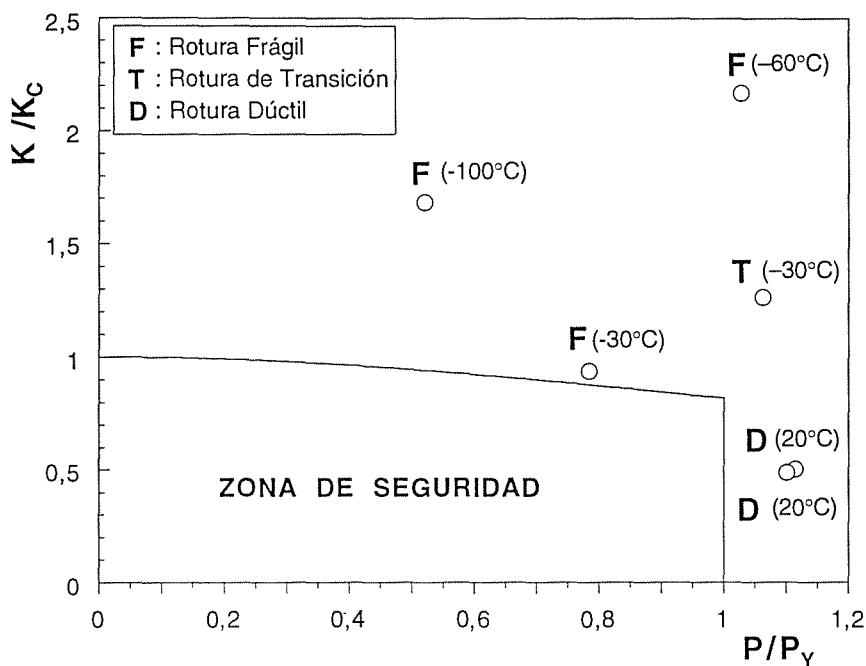


Fig. 5. Situación de los datos de ensayo en el diagrama de rotura del Eurocódigo 3.

5. CONCLUSIONES

Las hipótesis del Eurocódigo 3 sobre el comportamiento en rotura de los aceros estructurales tipificados para construcción metálica han sido contrastadas con el comportamiento real de un acero S460NL de 80 mm de espesor de laminación. A las temperaturas que originan roturas frágiles y de transición, los valores de tenacidad experimentales coinciden en general con los valores de proyecto que el Eurocódigo asigna al acero. El margen de seguridad que el Eurocódigo establece mediante un diagrama de rotura es ajustado para roturas dúctiles y amplio para roturas no dúctiles, si bien para una fracción de estas últimas podría ser insuficiente de confirmarse estadísticamente la validez de todos los resultados experimentales obtenidos.

6. REFERENCIAS

[1] Comité Europeo de Normalización (CEN), "Prenorma Europea ENV 1993-1-1/A1: Eurocódigo 3: Diseño de Estructuras Metálicas", Comité Europeo de Normalización, Bruselas (1994).

[2] Marandet, B. y Sanz, G., "Etude par la mécanique de la rupture de la ténacité d'aciers à résistance moyenne fournis en forte épaisseur", *Revue de Metallurgie* **April 1976**, 359-383 (1976).

[3] Barsom, J. M. y Rolfe, S. T., "Correlations between  $K_{Ic}$  and Charpy V-Notch Test Results in the Transition-Temperature Range", *ASTM STP 466*, ASTM, Philadelphia, 281-382 (1970).

[4] Milne, I., Ainsworth, R. A., Dowling, A. R. y

Stewart, A.T., "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects" Report R/H/R6-rev 3, Central Electricity Generating Board, Londres (1984).

[5] Comité Europeo de Normalización (CEN), "Euronorma EN 10113: Productos laminados en caliente para construcciones metálicas. Acero soldable de grano fino", Comité Europeo de Normalización, Bruselas (1993).

[6] Schwalbe, K. H., Neale, B. K., y Heerens, J., "The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials: EFAM GTP 94", GKSS-Forschungszentrum, Geesthacht (1994).

[7] Brozzetti, J., Sedlacek, G. y Hensen, W., "Fondements des règles de l'Eurocode 3 en vue de se garantir du risque de rupture fragile", *Construction Métallique* **1**, 15-28 (1991).

[8] Ming Hu, J. y Albrecht, P., "Limit Load solution and loading behavior of CT fracture specimen", *International Journal of Fracture* **52**, 19-45 (1991).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección General de Enseñanza Superior por la financiación recibida a través del proyecto PB95-0238. Igualmente agradecen las facilidades concedidas en el suministro del material por parte del fabricante DILLINGER HÜTTE y del distribuidor en España SOLAC, con especial reconocimiento a D. Antonio Díaz. La valiosa colaboración del Departamento de Ciencia de Materiales de la Universidad de Oviedo realizando los ensayos de resiliencia bajo la dirección de la Dra. Cristina Rodríguez es asimismo reconocida.