

# ANÁLISIS DE LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA MEDIANTE EL ENSAYO SPT

I. Peñuelas, C. Rodríguez, F.J. Belzunce y C. Betegón

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidad de Oviedo, Campus Universitario, 33203 Gijón, Tfno: 985181980

e-mail: penuelasines@uniovi.es

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como objeto la comparación del comportamiento a fractura de distintas probetas SPT entalladas tras la realización del ensayo miniatura de punzonado o Small Punch Test (SPT), con objeto de definir la configuración más apropiada para la determinación de la tenacidad a fractura de aceros estructurales utilizando probetas miniatura. Para ello se han ensayado experimentalmente cuatro configuraciones de entalla distintas: entalla centrada pasante y entalla lateral pasante en probetas de 0.5 mm de espesor, y entallas circulares no pasantes de distinto diámetro, estas dos últimas sobre probetas de mayor espesor (1 mm).

Además del programa experimental, se ha llevado a cabo el análisis numérico consistente en la simulación tridimensional mediante el código comercial de elementos finitos ABAQUS, de las distintas configuraciones ensayadas. De este modo se han determinado las curvas teóricas fuerza-desplazamiento y la triaxialidad operativa en la región de fractura de cada una de las probetas.

## ABSTRACT

A comparison among the fracture behaviour of different notched small punch test (SPT) specimens has been carried out in order to define the most appropriate notch configuration for the determination of the fracture toughness of structural steels. Four different configurations have been tested: a central and a lateral notch produced in samples with a thickness of 0.5 mm and two circumferencial notches of different diameters practiced in samples with a thickness of 1 mm.

A numerical analysis of the four specimens has also been performed by means of a tridimensional finite element simulation using the ABAQUS code. The load versus the displacement curves were obtained and the triaxiality existing in the fracture region.

**Palabras Claves:** Ensayo miniatura de punzonado (SPT), probetas agrietadas, tenacidad a fractura

## 1.- INTRODUCCIÓN

La caracterización mecánica de los materiales mediante el uso de probetas miniatura tiene una gran importancia bien porque la región a caracterizar sea muy pequeña (zonas afectadas térmicamente en procesos de soldeo o recargues, p.e.) o bien porque se disponga de cantidades muy pequeñas de material (p.e., en componentes en servicio no es posible más que extraer un pequeña muestra representativa). En estas situaciones el ensayo miniatura de punzonado o Small Puch Test (SPT) se ha revelado ya como un ensayo efectivo a la hora de determinar las propiedades mecánicas convencionales de los aceros [1], pero sin embargo, hasta ahora, no ha sido posible determinar con una fiabilidad suficiente la tenacidad a la fractura de estos mismos materiales.

## 2. – ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO

El ensayo miniatura de punzonado es un ensayo que puede considerarse como no destructivo debido al reducido tamaño de las probetas que utiliza (10x10x0.5 mm de espesor), a partir del cual se pueden obtener parámetros que permiten predecir directamente las propiedades mecánicas fundamentales del material, como el límite elástico, la resistencia a la tracción, la ductilidad y la energía de rotura [2,3].

El ensayo consiste en la aplicación de una carga con la ayuda de un punzón de cabeza semiesférica de 2.5mm de diámetro, con objeto de obligar a la probeta, que está firmemente sujeta en todo su contorno, a deformarse en el interior de un orificio de 4mm de diámetro

(expansión biaxial) hasta su rotura. La Figura 1 muestra un esquema del dispositivo de ensayo [4].

Con la ayuda de un extensómetro que se coloca entre la matriz fija y la móvil se obtiene el desplazamiento del punzón que, previa corrección de la flexibilidad del dispositivo de ensayo, permite calcular el desplazamiento del punto central de la probeta.

Los datos de carga y de desplazamiento generados, nos permiten obtener la curva característica del ensayo, que para un material dúctil muestra la forma que se expone en la Figura 2.

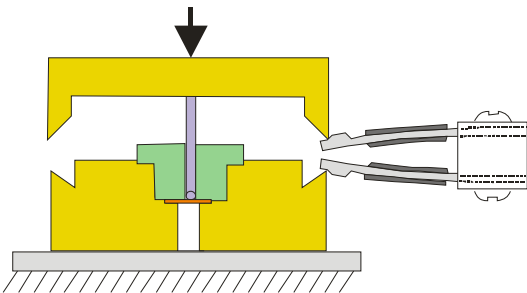


Fig. 1. Esquema del ensayo miniatura de punzonado (EMP).

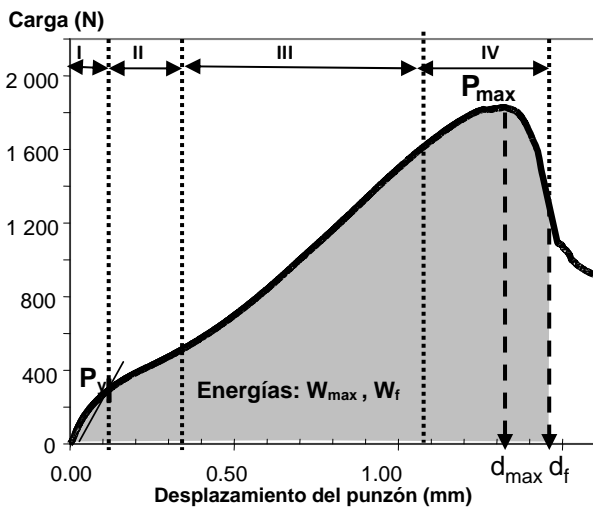


Fig. 2: Curva característica obtenida en un ensayo SPT sobre un material dúctil

El gráfico de la figura 2 muestra las siguientes zonas características [5]: la zona I, que corresponde a la deformación inicial predominantemente elástica, la zona II representativa de deformación mayoritariamente plástica, una zona III en la que la deformación plástica es generalizada y se extiende a toda la zona de proceso hasta que, en las proximidades del máximo de carga se inicia una grieta, momento en el que comienza la zona IV, caracterizada por el crecimiento de la grieta hasta que sobreviene la fractura total de la probeta.

A partir de estas curvas se obtienen parámetros característicos que están directamente relacionados con propiedades mecánicas tales como el límite elástico, la resistencia a la tracción y el alargamiento [6-9]. Otros parámetros que se relacionan esta vez con la tenacidad, ya que miden la energía de fractura en el ensayo, son  $W_{max}/t^2$  y  $W_f/t^2$ , siendo  $W_{max}$  y  $W_f$  las energías absorbidas en el punto de carga máxima y en el de rotura (área encerrada debajo de la curva SPT hasta los desplazamientos citados anteriormente) y  $t$  el espesor de la probeta. No obstante para poder determinar numéricamente las propiedades mecánicas y de fractura del material ensayado, es necesario recurrir a métodos numéricos inversos [1] y, de cualquier manera, estos parámetros no nos permiten evaluar la tenacidad a la fractura del material, ya que para ello resulta imprescindible realizar el ensayo sobre una probeta agrietada.

En este trabajo se han ensayado diferentes configuraciones de probetas SPT entalladas con objeto de definir una probeta miniatura capaz de permitir la medida de la tenacidad a la fractura de los aceros estructurales.

### 3.- MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se ha utilizado como material de ensayo un acero tipo S460N (EN 10113-2), con 0.18%C, laminado en forma de chapa de 15mm de espesor, que tras la laminación en caliente y posterior normalizado mostraba una microestructura ferrito-perlítica. El material fue caracterizado convencionalmente a temperatura ambiente mediante ensayos de tracción, dureza y tenacidad a la fractura. La Tabla 1 recoge las principales características mecánicas del acero obtenidas tras estos ensayos.

Tabla 1: Propiedades mecánicas fundamentales del acero AE460

E (GPa)	$\sigma_{ys}$ (MPa)	$\sigma_R$ (MPa)	A (%)	HV10	$J_{IC}^*$ (kJ/m <sup>2</sup> )
200	480	680	22	208	270

\* Ensayos realizados según ASTM E 1820 [10] sobre probetas C(T)

Al objeto de identificar la configuración agrietada más apropiada para la determinación de la tenacidad a la fractura a partir del ensayo SPT se han preparado mediante micromecanizado cuatro configuraciones distintas. Así y partiendo de una probeta Charpy de 55x10x10 mm<sup>3</sup> con una orientación LT, se realizaron cortes transversales con una cortadora metalográfica de precisión con la que se obtuvieron láminas de 10x10 mm<sup>2</sup> de sección y de espesor igual a 1mm en el caso de las probetas destinadas a contener entallas

circunferenciales no pasantes (figura 3) y de 0.5mm para el caso de las probetas con entallas pasantes (figura 4). Una vez extraídas las muestras y tras comprobar que sus dimensiones entraban dentro de las estrechas tolerancias exigidas para la ejecución de este tipo de ensayo, se procedió al mecanizado de las entallas con la ayuda de una máquina de micromecanizado. Las configuraciones analizadas fueron las siguientes:

- Probeta 0.5mm de espesor con entalla lateral pasante de longitud  $a=3.8\text{mm}$  y un radio en la punta de la entalla de 0.2mm
- Probeta de 0.5mm de espesor con entalla central pasante de longitud  $a=1\text{mm}$  y un radio en la punta de la entalla de 0.2mm
- Probeta de 1mm de espesor con entalla central no pasante (0.1 mm de profundidad,  $a/t = 0.1$ ), de forma circular con un diámetro de 1 mm
- Probeta de 1mm de espesor con entalla central no pasante (0.1 mm de profundidad,  $a/t = 0.1$ ), de forma circular con un diámetro de 3 mm

También fueron ensayadas, a modo de comparación, probetas SPT carentes de entalla de 0.5mm y 1 mm de espesor.

Los ensayos se realizaron en control de desplazamiento a una velocidad de 0.2 mm/min, utilizando un dispositivo experimental diseñado y fabricado en la EPSIG acoplado a una máquina estática dotada de una célula de carga de 10 kN y en el que el desplazamiento se mide de forma muy precisa a través de un extensómetro tipo COD colocado entre las partes superior e inferior del dispositivo de ensayo, tal y como se esquematiza en la Figura 1. Esta disposición del extensómetro hace que junto con el desplazamiento del punto de carga se esté contabilizando el desplazamiento debido a la deformación de otras partes del dispositivo de ensayo (bola y punzón). Por esta razón, y al objeto de corregir estos desplazamientos, se determinó la flexibilidad del dispositivo de ensayo a través de la realización de una serie de cargas y descargas sobre un patrón suficientemente rígido. Esta curva de flexibilidad nos ha permitido corregir las obtenidas en los ensayos SPT, y obtener de este modo la curva carga-desplazamiento del punto de carga real de cada probeta.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS FEM UTILIZADOS

Se han desarrollado distintos modelos para reproducir el ensayo mediante cálculo numérico. Para ello se ha utilizado el código comercial de elementos finitos ABAQUS [11]. Al tratarse de probetas agrietadas ha sido necesario recurrir a mallas tridimensionales, si bien se ha utilizado simetría para disminuir el tiempo de computación. La probeta se ha discretizado mediante una malla de elementos sólidos de ocho nodos con integración reducida. La matriz y el punzón se han

modelizado como sólidos rígidos y se han considerado contactos entre superficies. Los cálculos se han realizado bajo el supuesto de grandes deformaciones y cálculo explícito. Las propiedades macroscópicas del material que se han introducido en el modelo se han obtenido a partir de ensayos convencionales. Se ha considerado asimismo que la fractura dúctil del material se produce de acuerdo con el modelo micromecánico de daño de Gurson-Tvergaard-Needleman, en el que se considera la nucleación, el crecimiento y la coalescencia de cavidades, de modo que es posible simular el comportamiento del material hasta la rotura. Por otra parte, se ha supuesto que el coeficiente de rozamiento durante el ensayo es aproximadamente  $\mu=0.1$ , ya que además este valor es adecuado para un contacto acero-acero inicialmente lubricado, que es el que se produce en el ensayo. La Figura 3 muestra las geometrías utilizadas para la simulación.

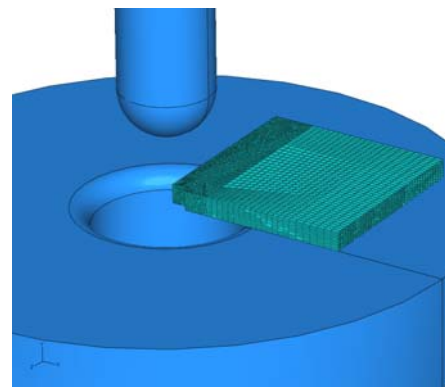


Fig. 3: Geometrías y malla utilizada para la simulación

#### 5.- RESULTADOS Y DISCUSION

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos miniatura de punzonado sobre las probetas de 0.5mm y de 1mm de espesor, respectivamente.

En los cuatro casos analizados puede observarse que en las primeras regiones de la curva, y hasta que no se desarrolla una amplia deformación plástica generalizada, las curvas correspondientes a las probetas entalladas coinciden perfectamente con las de las probetas sin entallas. En el caso de las probetas con entallas rectas pasantes (Figura 4), es la correspondiente a la entalla centrada la que primero se desvía de la trayectoria de la probeta no entallada, pero también la que muestra un comportamiento aparentemente más dúctil, caracterizado por una caída muy suave desde el punto de carga máxima. Por el contrario, la probeta con la entalla lateral larga muestra un comportamiento anómalo en el sentido de ser capaz de soportar una carga incluso mayor que la de la probeta no entallada. Este comportamiento es debido al cierre de la grieta que se produce como consecuencia de un pequeño desplazamiento de la probeta sobre la matriz, y ha sido

verificado mediante distintas simulaciones numéricas en las que se ha fijado o liberado el desplazamiento de la

probeta en determinados grados de libertad.

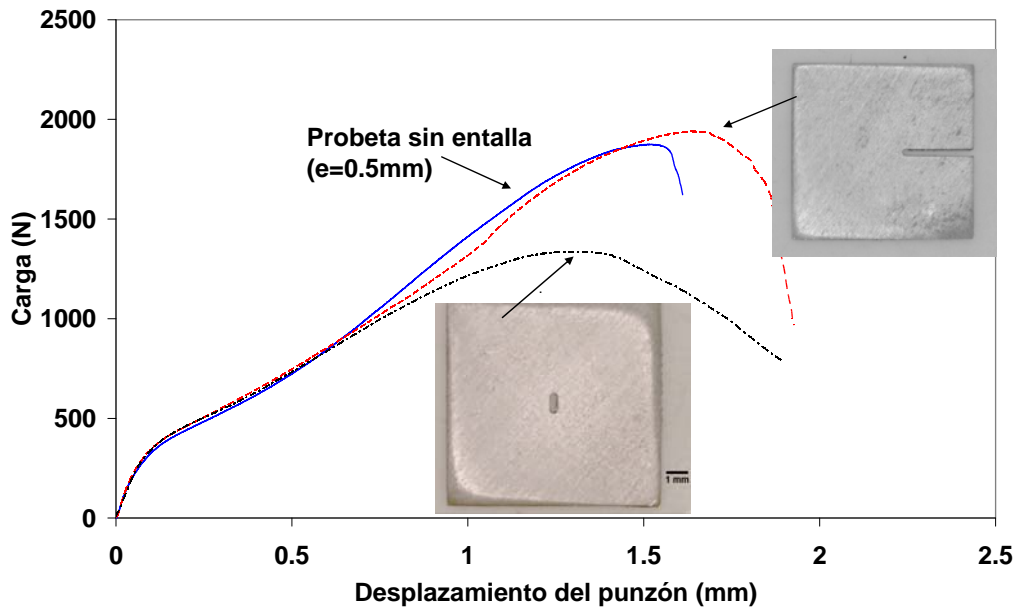


Fig. 4: Curvas SPT correspondientes a las probetas de 0.5 mm de espesor con entallas rectas pasantes

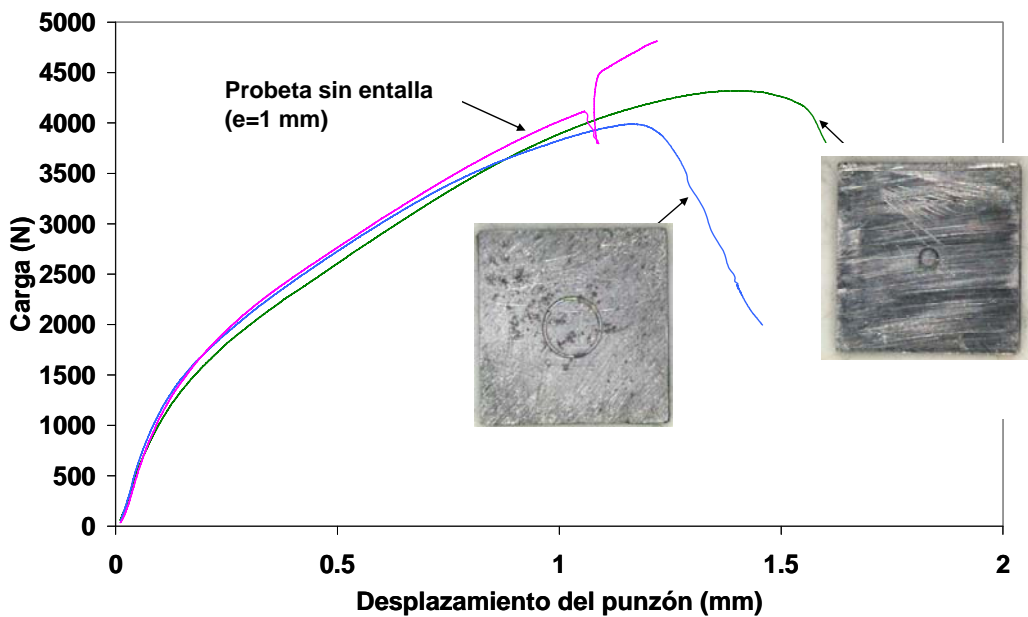


Fig. 5: Curvas SPT correspondientes a las probetas de 1 mm de espesor con entallas circulares no pasantes

Las curvas obtenidas con las probetas con entallas circulares no pasantes ( $a/t = 0.1$ ), Figura 5, han dado lugar a curvas fuerza-desplazamiento claramente diferentes de las anteriores, que solo se han desviado de la curva correspondiente a la probeta sin entalla en el estadio final del proceso, es decir en el momento mismo de su rotura. Nótese además que la probeta que soporta una carga mayor fue la que tenía el diámetro de entalla menor.

Las Figuras 6a, 6b, 7a y, 7b muestran las roturas de estas cuatro probetas. En el caso de la probeta con la entalla pasante central (Figura 6a), que mostraba el comportamiento aparentemente más dúctil, vemos que la entalla se abre completamente antes de que finalmente se desarrolle una grieta en dirección radial que es la que da lugar al fallo.

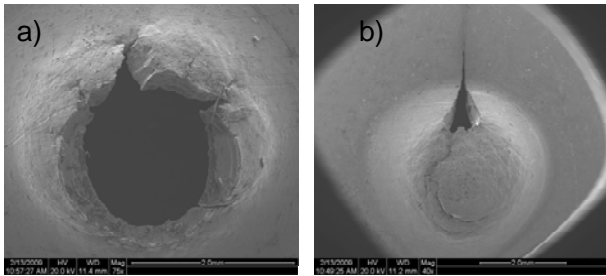


Fig. 6. Rotura de las probetas con entallas pasantes

La Figura 6b muestra la rotura de la probeta con la entalla pasante lateral, en la que se destaca la amplia apertura que tiene lugar en el frente de la entalla así como el cierre de la grieta en las proximidades de la región de sujeción.

Las Figuras 7a y 7b dan cuenta de la rotura de las probetas con las entallas circunferenciales no pasantes, en las que el punto de mayor interés, que debe destacarse, es que la región central de la probeta con la entalla de menor diámetro no se ha deformado en absoluto y ha permanecido perfectamente plana hasta el final del ensayo (Figura 7b).

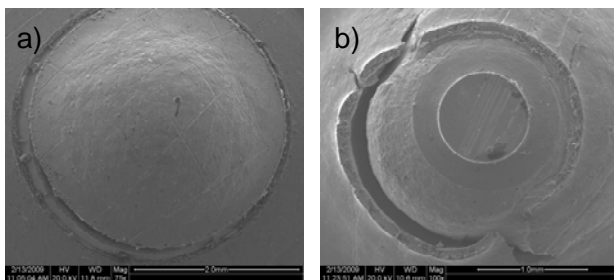


Figura 7. Rotura de las probetas con entallas circulares no pasantes

Mediante la simulación numérica se ha podido comprobar que los métodos numéricos son válidos para la reproducción del comportamiento a fractura de distintas probetas SPT agrietadas.

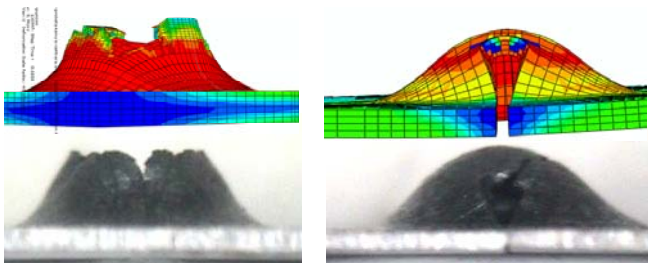


Fig. 8. Rotura de las probetas con entallas pasantes

En las Figuras 8 y 9 se muestra la comparación de la rotura experimental y numérica obtenida para algunas de las probetas estudiadas. Hay que destacar la buena correspondencia observada en todos los casos.

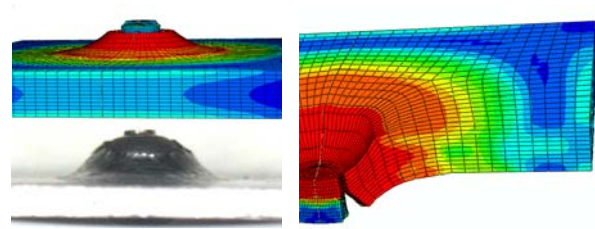


Fig. 9. Rotura de la probeta con entalla circular no pasante de diámetro 1 mm

Por su parte, de cara a obtener la configuración más idónea para la determinación de la tenacidad a fractura, es necesario determinar la triaxialidad de cada una de las geometrías estudiadas, ya que se necesitan geometrías de ensayo que conduzcan a estados de alta triaxialidad para poder estimar la tenacidad del lado de la seguridad. La triaxialidad de cada configuración puede obtenerse mediante simulaciones numéricas a partir de la presión hidrostática y de la tensión de von Mises.

Las Figuras 10 y 11 muestran la distribución de presiones hidrostáticas en dos de las geometrías estudiadas. En estas figuras se aprecia la clara diferencia que presentan estas distribuciones, siendo la probeta con la entalla no pasante la que proporciona una triaxialidad apreciablemente mayor.

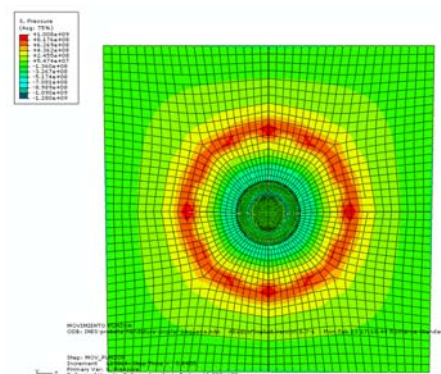


Fig. 10. Presión hidrostática para la probeta con grieta circular de 1 mm de diámetro no pasante

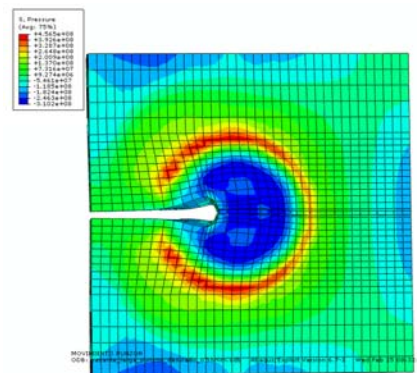


Fig. 11. Presión hidrostática para la probeta con grieta lateral pasante

## 5.- CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado la comparación del comportamiento a fractura de distintas probetas SPT agrietadas.

Se ha puesto en evidencia que la combinación de los métodos experimentales y numéricos constituye una potente herramienta a la hora de caracterizar la fractura de los aceros estructurales.

Las simulaciones realizadas permiten definir correctamente la deformación de la probeta en el curso del ensayo y conocer la distribución de tensiones que se producen en la misma. Por otra parte también permiten determinar la triaxialidad de las distintas geometrías agrietadas.

De las cuatro geometrías agrietadas, las que tienen grietas pasantes muestran triaxialidades inferiores que las dos geometrías con grieta circular no pasantes, por lo que éstas últimas serían las que, en principio, y a falta de realizar un estudio más profundo, habría que utilizar para la determinación de la tenacidad a fractura mediante el ensayo miniatura de punzonado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación obtenida del Ministerio de Educación y Ciencia (Plan Nacional I+D+I), mediante los proyectos MEC-04-MAT2004-06992-C02-01 y MAT2008-06879-C03-00, a Hibbit, Karlsson y Sorensen por el acceso a ABAQUS mediante la licencia educacional, y al Centro Tecnológico para el diseño y la producción industrial de Asturias (PRODINTEC) por la realización de las entallas en todas geometrías agrietadas analizadas. Sin el apoyo de todas estas instituciones no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

[1] Peñuelas I., Cuesta I.I., Betegón C., Rodríguez C., Belzunce F.J., *Determinación de los parámetros elastoplásticos y de daño mediante métodos inversos sobre ensayos SPT*, Anales de Mecánica de la Fractura, **25**, 492-497, 2006

[2] Lucas G.E. et al., Recent progress in small specimen test technology, J. Nucl. Mater., 307-311, 2002, 1600-1608.

[3] Contreras M.A., Tesis doctoral, universidad de Oviedo, 2007.

[4] Autillo J., Contreras M.A., Betegón C., Rodríguez C., Belzunce F.J., *Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento en la caracterización mecánica de*

*aceros*, Anales de Mecánica de la Fractura, **23**, 77-83, 2006.

[5] M.A. Contreras, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Betegón, *Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels*, Fatigue Fract Engng Mater Struct, 31, 727-737, 2008.

[6] Fleury E. y Ha J.S., Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plants, Int. J. Press. Vessels and Piping, 75, 699-706, 1998

[7] Vorlicek et al., Evaluation of a miniaturized disc test for establishing the mechanical properties of low-alloy steels, J. Mater. Scie., 30, 2936-2943, 1995.

[8] Foulds J. y Viswanathan R., Determination of the toughness of in-service steam turbine disks using small punch testing, J. Mater. Perform., 10, 5, 614-619, 2001

[9] Ruan Y., Spätig P. and Victoria M., Assessment of mechanical properties of the martensitic steel Eurofer97 by means of punch tests, J. Nucl. Mater., 307-311, 236-239, 2002.

[10] ASTM E 1820, Standard test method for measurement of fracture toughness, ASTM, 1999.

[11] ABAQUS 6.4., Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2003.