

# ESTUDIO DE LAS TÉCNICAS PARA LA OBTENCIÓN DE PROBETAS SPT PREFISURADAS

I.I. Cuesta<sup>1</sup>, C. Rodríguez<sup>2</sup>, F.J. Belzunce<sup>2</sup>, J.M. Alegre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Integridad Estructural. Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. C/Villadiego s/n, 09001, Burgos  
E-mail: [iiquesta@ubu.es](mailto:iiquesta@ubu.es)

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo. Campus de Gijón, 33203, Gijón

## RESUMEN

En aquellos casos en los que no se dispone de material suficiente para llevar a cabo ensayos convencionales, con los que poder determinar las propiedades mecánicas del material analizado, existen en la actualidad diferentes ensayos no normalizados para tal fin. Uno de éstos, es el ensayo de probetas miniatura o small punch test (SPT), el cuál consiste básicamente en un punzonado sobre una probeta pequeña, mediante un punzón de gran rigidez, estando la periferia de la probeta empotrada por una matriz. Uno de los grandes retos en estos momentos es la posibilidad de obtener las propiedades a fractura del material con el ensayo de este tipo de probetas miniatura. La gran mayoría de los trabajos sobre este tema hasta el momento han sido realizados con probetas convencionales de SPT, siendo muy pocos los autores que han utilizado probetas prefisuradas. Para la realización de esta fisura inicial en la probeta SPT, previa al ensayo, se están utilizando en la actualidad dos procedimientos principalmente, el primero de ellos mediante micromecanizado de alta precisión y el segundo a través de microfisuración por láser. El objetivo principal del presente trabajo es estudiar el efecto en los resultados obtenidos con estos dos procedimientos experimentales.

## ABSTRACT

In those cases where there is not enough material for conducting conventional tests to determine the mechanical properties of the material analyzed, there are now several non-standard tests for this purpose. One of these is the Small Punch Test (SPT), which basically consists of deforming a miniature specimen using a high-strength punch. The sides of the specimen are firmly held between two dies. One of the greatest challenges at present is the possibility of obtaining the fracture properties of a material with this type of SPT specimens. The vast majority of papers on this topic to date have involved conventional SPT specimens. Very few authors have utilized pre-cracked specimens. To achieve this initial crack in the SPT specimen prior to testing, two procedures are at present mainly being used. The first of them use high-precision micromachining, and the second using laser-induced microcracking. The main objective of this paper is to study the effect of these procedures on the obtained results.

**KEY WORDS:** Ensayo Small Punch, Micromecanizado, Microfisuración por láser.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la década de los 80, en el campo nuclear, para solventar el problema que suponía caracterizar material irradiado de componentes en servicio, donde la escasez de material para mecanizar probetas convencionales era un serio inconveniente, se desarrolló el ensayo miniatura de punzonado o small punch test (SPT).

Dicho ensayo consiste básicamente en la ejecución de un punzonado sobre una probeta miniatura, con un punzón de gran rigidez, estando la periferia de la probeta empotrada en una matriz. Estas probetas miniatura generalmente son cuadradas de dimensiones 10x10mm, o bien son circulares de diámetro 3mm, este reducido tamaño de probeta supone que el ensayo SPT

se pueda considerar como un ensayo no destructivo del componente en servicio analizado.

En las últimas décadas han sido numerosos los autores que han centrado sus investigaciones en la utilización del SPT con el fin de obtener las propiedades mecánicas del material, en los casos que no se dispone de una cantidad suficiente de material para poder realizar ensayos normalizados. Extendiendo su aplicabilidad a otros campos a parte del nuclear como, por ejemplo, a los procesos de soldadura para la evaluación de las propiedades del material en las zonas afectadas térmicamente.

Actualmente, uno de los grandes retos es la posibilidad de obtener las propiedades a fractura del material con el

ensayo de este tipo de probetas miniatura. La gran mayoría de los trabajos [1-3] sobre este tema hasta el momento han sido realizados con probetas convencionales de SPT, siendo muy pocos los autores que han utilizado probetas prefisuradas [4-6].

En este sentido, el ensayo SPT convencional, donde no existe una fisura inicial, no parece adecuado para la determinación directa de los parámetros de fractura convencionales ( $K$  ó  $J$ ). Puede ser utilizado, eso sí, para determinar parámetros de daño, que inician y desarrollan la rotura final de la pieza. A priori, la utilización de probetas prefisuradas, por el hecho de tener mecanizada una grieta inicial, podría suponer una mejor opción a la hora de estimar las propiedades a fractura, ya que tienen una mayor similitud con las probetas convencionales (Charpy o CT) usadas para tal fin. Han sido varias las geometrías analizadas en el entorno de trabajo en el que se ha desarrollado el presente estudio. Inicialmente, las opciones que se han barajado aparecen reflejadas en la Figura 1.

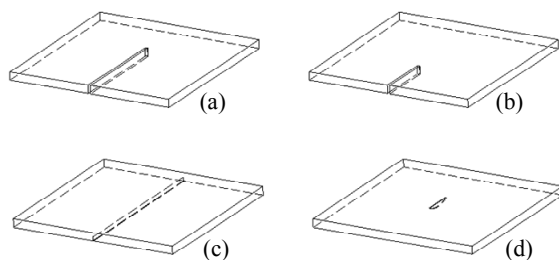


Figura 1. Tipos de fisura inicial en probetas SPT.

Se han considerado fisuras pasantes en todo el espesor, de diferentes longitudes, sobrepasando el eje de carga (a) y sin llegar al citado eje (b). Evidentemente, la elección de un tipo u otro de fisura debe obedecer a criterios científicos, pero también deben considerarse criterios de viabilidad. La fisura tipo (d), central no pasante, en unas dimensiones tan reducidas de probeta resulta a priori de muy difícil ejecución.

Las fisuras tipo (a) y (b) no han resultado muy prácticas desde el punto de vista de la longitud de propagación, y en cualquier caso el espesor de la probeta haría que el valor de  $K$  fuese muy cercano a condiciones de tensión plana. La fisura tipo (c), longitudinal no pasante, parece en primera instancia una de las opciones factibles, aunque evidentemente también presenta sus limitaciones (reducido espesor e inicio de propagación de fisura en la zona cercana al punzón). Sin embargo, se estima que podría utilizarse para estimar las condiciones de inicio, con las particularidades que los resultados obtenidos puedan presentar.

La prefisura tipo (c) en la probeta SPT se puede realizar principalmente mediante dos procedimientos, el primero de ellos mediante micromecanizado de alta precisión y el segundo a través de microfisuración por láser. El objetivo principal del presente trabajo es estudiar el

efecto en los resultados obtenidos con estos dos procedimientos experimentales, para determinar las ventajas e inconvenientes, que podrían presentar cada uno de ellos a la hora de utilizarlos para estimar las propiedades a fractura del material.

## 2. PROBETAS SPT PREFISURADAS

El material utilizado en el presente estudio es un acero inoxidable martensítico endurecido por precipitación. Sus principales características son alto límite elástico (1100 MPa), buena resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas a temperaturas superiores a 316°C y alta tenacidad tanto en la dirección longitudinal como en la transversal. Presenta un comportamiento isotrópico cercano a un material elástico-perfectamente plástico, por lo que puede ser considerado como un material con elevado grado de ductilidad.

A priori, los resultados obtenidos con este material podrán ser extrapolados a otros tipos de aceros, siempre que su comportamiento no sea muy disimilar al de este acero. En caso contrario, habría que realizar un nuevo estudio con el material deseado.

Las probetas SPT empleadas, han sido obtenidas a partir del corte en rebanadas de una probeta tipo Charpy, resultando directamente probetas cuadradas de 10 mm de lado. Se han empleado dos técnicas para la realización de dicho corte, la primera por corte con disco de alta precisión y la segunda por electroerosión. En el corte por disco el tiempo de preparación de la probeta es mucho mayor, ya que después de realizar el corte, en el que se obtiene una probeta SPT de espesor mayor del deseado, hay que reducirlo mediante desbaste y pulido.

Por otro lado, en el corte por electroerosión, tras los ajustes necesarios, el espesor de la probeta es el deseado y no es necesario realizar ninguna operación adicional. Una vez obtenidas las probetas SPT de dimensiones 10x10 mm y espesor 0.5 mm, se procede a mecanizar la fisura inicial de tipo longitudinal no pasante (Figura 1.c). Para ello, como ya se ha comentado anteriormente, se ha empleado el micromecanizado de alta precisión y la microfisuración por láser.

En el micromecanizado se ha empleado una herramienta en forma de V con ángulo de 37° y radio de redondeo en la punta de 100 μm. La profundidad de fisura deseada se obtiene aplicando la herramienta longitudinalmente a partir de la cara inferior, desde el centro de un lado de la probeta hacia el centro del lado opuesto. La geometría de la fisura inicial que se obtiene con esta técnica se puede ver en la Figura 2, la cuál reproduce fielmente la forma de la herramienta con la que se ha mecanizado. Cabe destacar el buen acabado superficial de la fisura y la homogeneidad conseguida de la profundidad de fisura a lo largo de toda su longitud.

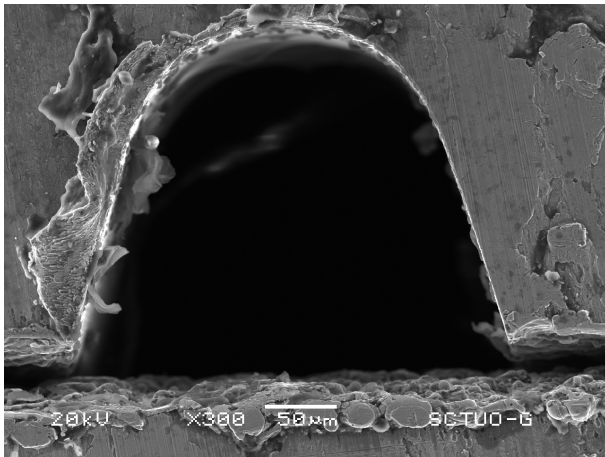


Figura 2. Sección de la fisura inicial obtenida con el micromecanizado de alta precisión.

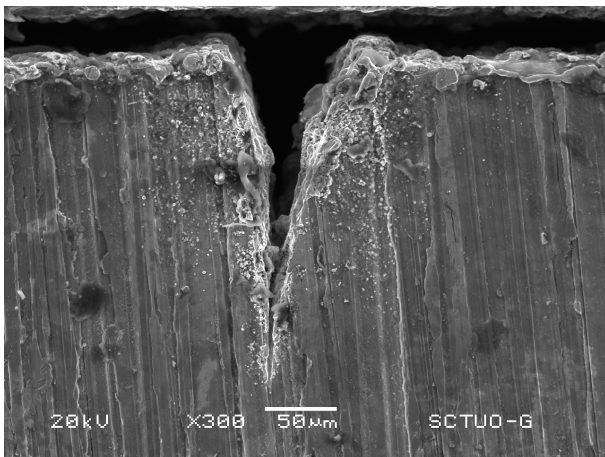


Figura 3. Sección de la fisura inicial obtenida con la microfisuración por láser.

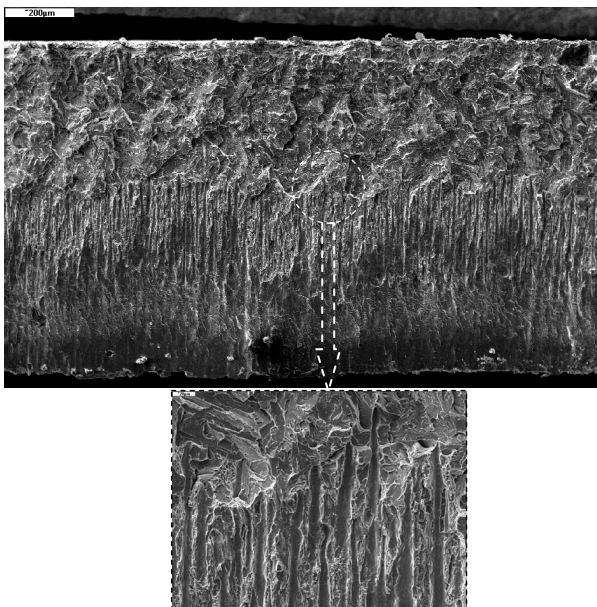


Figura 4. Frente de fisura obtenido con la microfisuración por láser.

En la microfisuración por láser, tras una calibración inicial, el láser, es aplicado en forma de haz de pulsos de  $30\mu\text{m}$  de diámetro. Al igual que en la técnica anterior, la fisura se realiza de forma longitudinal, a partir de la cara inferior, desde el centro de un lado de la probeta hacia el centro del lado opuesto.

En la Figura 3 se muestra la sección de la fisura inicial obtenida con esta técnica, donde se puede observar que en este caso es mucho más aguda, y la punta de fisura es afilada, asemejándose más a una fisura perfecta sin redondeo en la punta. Sin embargo, presenta el inconveniente de conseguir un frente de fisura más irregular, como se puede ver en la Figura 4, donde la profundidad de fisura es ligeramente variable en longitud, ya que los pulsos láser van dejando picos y valles a lo largo del extremo de fisura conforme ha ido avanzando, como se puede ver en el detalle de la Figura 4. Los ensayos realizados requerirán una medida posterior de la fisura obtenida, y un ajuste de los mismos en función de las diferencias observadas respecto de la medida nominal.

En los ensayos SPT se pueden utilizar probetas SPT prefisuradas con diferentes profundidades de fisura ( $a$ ). Dicha profundidad se puede adimensionalizar con respecto al espesor de probeta ( $t$ ), obteniendo de esta manera diferentes valores de la relación  $a/t$ , siendo los más habituales valores teóricos de  $a/t$  entre 0.2 y 0.5. En el presente trabajo se ha utilizado una relación  $a/t = 0.5$ , por lo que la profundidad de fisura teórica fue de  $0.25\text{ mm}$ , ya que el espesor de probeta era  $0.5\text{ mm}$ . Una vez realizadas las fisuras iniciales en las probetas SPT se ha procedido a medir mediante SEM los valores de la profundidad real en los dos extremos de la fisura, para cada una de las probetas. Con el micromecanizado la media de  $a$  fue de  $252\mu\text{m}$  ( $a/t = 0.5$ ), mientras que con la microfisuración por láser se obtuvo un valor medio de  $225\mu\text{m}$  ( $a/t = 0.45$ ).

### 3. ENSAYO SPT

Una vez medidas las fisuras iniciales en las probetas SPT se procedió a ensayarlas, obteniendo para cada una de las probetas la curva carga-desplazamiento del punzón. La Figura 5 presenta las curvas típicas carga-desplazamiento obtenidas en el ensayo SPT con probetas prefisuradas, en función de si la relación  $a/t$  es mayor o menor de 0.5, para el material considerado en el presente trabajo. Analizando la forma de las curvas, es posible distinguir diferentes regiones en cada una de ellas. Para una mayor comprensión de estas curvas, también se han representado las obtenidas en un ensayo SPT sin fisura y la simulación de una fisura completamente pasante, es decir, como si estuviese formada por dos mitades unidas sólo por las fuerzas de contacto (probeta rota en dos mitades).

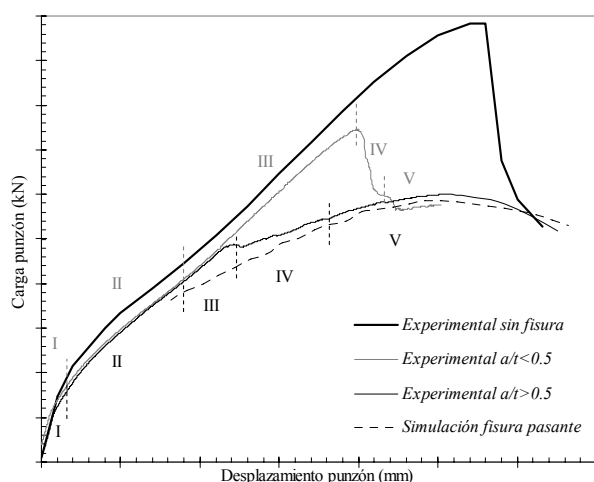


Figura 5. Curvas carga-desplazamiento del ensayo SPT sobre probeta prefisurada.

Para la curva correspondiente a una relación  $a/t > 0.5$ , la región I correspondería al comportamiento puramente elástico de la probeta. En esta región tanto la probeta como el utillaje se reposicionan ligeramente y se produce el fenómeno de indentación. La región II correspondería con la transición elastoplástica, ya que en algunas zonas de la probeta comienza a predominar la deformación plástica, especialmente la zona en contacto con el punzón. En la tercera región tiene lugar la progresiva abertura de los labios de la fisura y la plastificación creciente de la probeta, y como consecuencia final de esto, el comienzo y propagación de la fisura, hasta llegar al quiebro que se produce en la curva, entre la región III y IV, en el cuál la fisura se hace pasante a lo largo del espesor de la probeta. A partir del inicio de la región IV se produce rápidamente el desgarro de la probeta hasta alcanzar los bordes de la matriz, instante en el que la probeta tiende a comportarse como dos mitades desacopladas (fisura pasante). La quinta y última región se puede decir que comienza cuando la curva carga-desplazamiento se ajusta al comportamiento de dos mitades, como se puede ver en la Figura 5.

En la curva correspondiente a una relación  $a/t < 0.5$  se puede llegar a distinguir de nuevo hasta cinco regiones más o menos diferenciadas. Las tres primeras se corresponderían con las de la curva anterior, con la salvedad de que la región III es mucho mayor en este caso, alcanzando la probeta una mayor capacidad de carga al ser mayor el ligamento resistente. A lo largo de la región III se inicia la fisura y crece hasta hacerse pasante, cuyo valor en este caso coincide con el máximo de la curva carga-desplazamiento. En ese instante se produce un descenso brusco de la capacidad resistente de la probeta. La región IV comprende dicho decremento, y en ella la fisura propaga en ambos sentidos por todo el espesor, hasta llegar a la zona de empotramiento, momento en el que la probeta, al igual que antes, se comporta como dos mitades desacopladas.

La última región correspondería al traspaso total del punzón, a través de las dos mitades desacopladas.

Como se ha podido intuir, la diferencia existente entre las dos curvas radica principalmente en la capacidad de carga que puede soportar la probeta hasta el instante en el que la fisura se hace pasante a lo largo del espesor, propagando rápidamente hasta la zona del empotramiento. Una vez alcanzado este instante el comportamiento de la probeta se intenta estabilizar de una forma u otra, asemejándose al exhibido por dos mitades desacopladas.

Se ha podido comprobar que el instante de inicio de la propagación no queda claramente manifestado en la curva carga-desplazamiento de la probeta SPT prefisurada. En cambio, el instante en el que la fisura se hace pasante en todo el espesor si que se identifica en ambas curvas, por el quiebro de la curva en la primera y por el descenso brusco de la capacidad resistente en la segunda.

La Tabla 1 recoge tanto la técnica de generación de la fisura inicial, como el tipo de corte realizado y el espesor de cada una de las probetas SPT prefisuradas utilizadas en el presente trabajo. Como se puede observar en dicha tabla, también se han realizado ensayos SPT sobre probetas sin fisura inicial. Debido a la escasez de material, en esta primera comparación, no se han realizado excesivos ensayos para salvaguardar el mayor número de probetas SPT prefisuradas para ensayos posteriores, que se llevarán a cabo en función de las conclusiones alcanzadas en este trabajo.

Tabla 1. Probetas SPT ensayadas.

Probeta SPT	Tipo de corte	Técnica de fisuración	Espesor (mm)
GI03	Disco	Sin fisura	0.501
GI04	Disco	Sin fisura	0.503
BU01	Electroerosión	Sin fisura	0.479
BU21	Electroerosión	Láser	0.488
BU22	Electroerosión	Láser	0.480
GI12	Disco	Láser	0.503
BU09	Electroerosión	Micromecanizado	0.489
BU14	Electroerosión	Micromecanizado	0.489
BU17	Electroerosión	Micromecanizado	0.488

#### 4. RESULTADOS

Tras el ensayo de todas las probetas de la Tabla 1, se han obtenido las curvas carga-desplazamiento que se pueden ver en las siguientes figuras, resultados que se discutirán en el apartado siguiente.

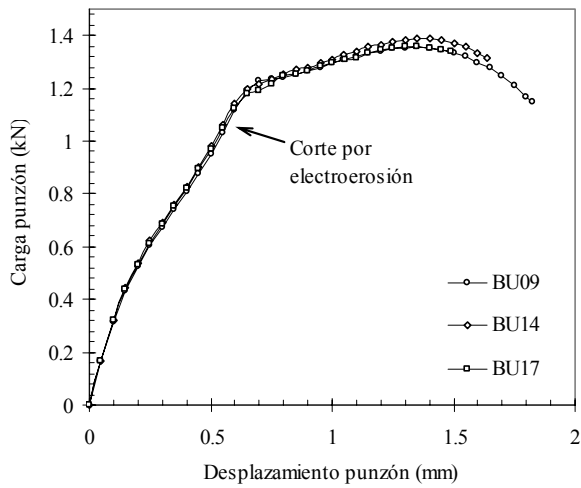


Figura 6. Curvas carga-desplazamiento del ensayo SPT sobre probetas prefisuradas por micromecanizado.

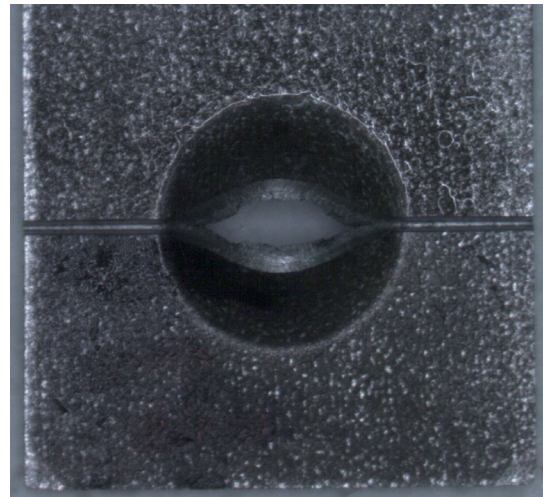


Figura 9. Probeta SPT BU17 ensayada, cortada por electroerosión y prefisurada por micromecanizado.

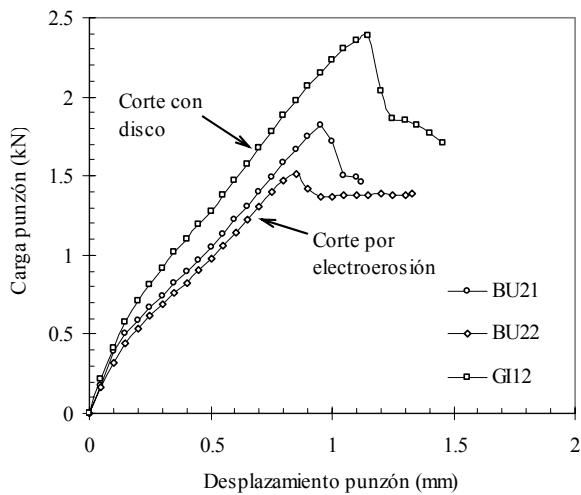


Figura 7. Curvas carga-desplazamiento del ensayo SPT sobre probetas prefisuradas por láser.

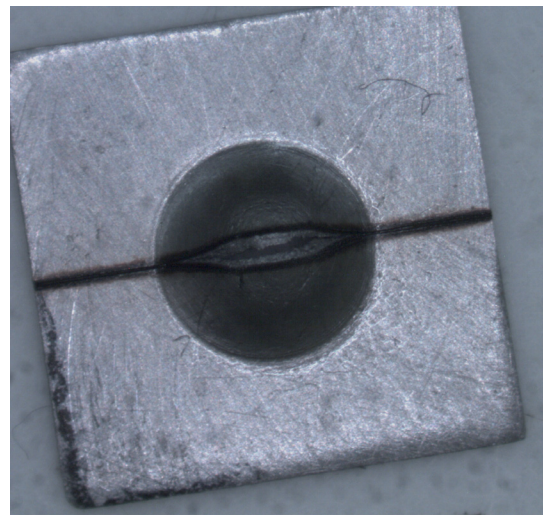


Figura 10. Probeta SPT GI12, cortada con disco y prefisurada por láser, tras el ensayo.

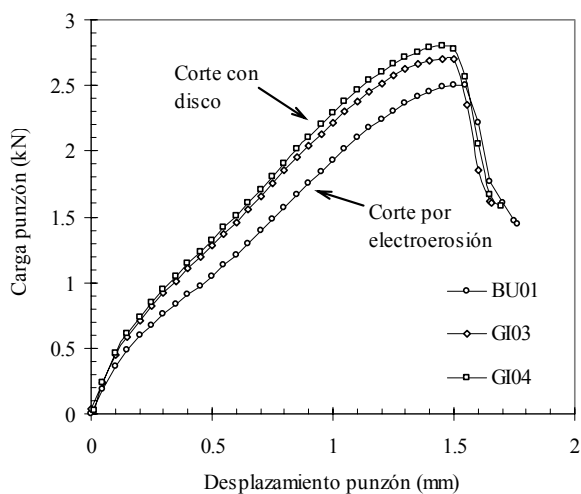


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento del ensayo SPT sobre probetas sin fisura inicial.

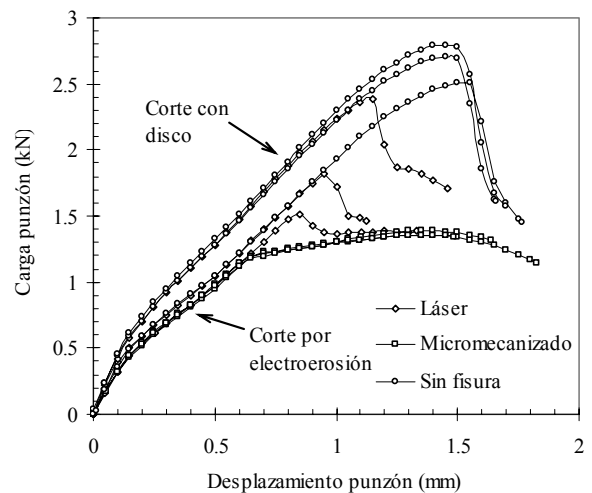


Figura 11. Comparación de las curvas carga-desplazamiento de los ensayos SPT realizados.

## 5. DISCUSIÓN

En la Figura 6 se puede observar la buena repetibilidad que presenta el ensayo SPT con probetas prefisuradas por micromecanizado, hecho que se justifica en virtud de la homogeneidad de la fisura obtenida con la herramienta utilizada. También el comportamiento de las curvas mostradas en esta figura se ajusta al típicamente observado en probetas SPT prefisuradas con una relación  $a/t > 0.5$  (Figura 5), por lo que se deduce que la profundidad de fisura real coincide con la que se deseaba en un principio, que se recuerda era de  $0.25\text{mm}$ .

La Figura 7 muestra los resultados obtenidos con las probetas SPT prefisuradas por láser. Se puede ver que la dispersión es mayor y que el comportamiento de dichas probetas se ajusta más al correspondiente a una relación  $a/t < 0.5$ , lo que hace suponer que la profundidad de fisura real es menor que en las probetas prefisuradas por micromecanizado. Esto hace que el ligamento resistente de la probeta sea mayor, implicando una mayor capacidad de carga. En esta figura queda también de manifiesto que el comportamiento de las probetas también depende del tipo de corte empleado para obtenerlas (corte por disco o corte por electroerosión).

La Figura 8 recoge las curvas carga-desplazamiento obtenidas en los ensayos SPT con las probetas sin fisura inicial y de nuevo se observa una diferencia en el comportamiento de las probetas en función del tipo de corte con el que se han obtenido. Dicha diferencia también se hace patente visualmente como se puede apreciar en las Figuras 9 y 10, que muestran dos de las probetas ensayadas hasta la rotura. Se trata de la probeta BU17, cortada por electroerosión y prefisurada por micromecanizado, y de la probeta GI12, cortada con disco y prefisurada por láser, respectivamente. En la primera (BU17) se puede distinguir el aspecto rugoso que deja el corte por electroerosión y el buen acabado de la fisura mecanizada, mientras que la segunda (GI12) tiene un aspecto brillante debido al pulido realizado, y en ella se observa una pequeña zona que corresponde a la región afectada térmicamente por el láser.

Por último, en la Figura 11 se han representado conjuntamente todas las curvas de las figuras anteriores, observando claramente que el tipo de corte con el que se obtiene la probeta influye notablemente sobre la capacidad resistente de la probeta. En dicha figura se pueden diferenciar dos conjuntos de curvas en función del tipo de corte, pudiendo destacar en cada uno de ellos, la pequeña dispersión existente en las primeras regiones de las curvas. Por otro lado, se puede observar como todas las curvas correspondientes a las probetas SPT prefisuradas y cortadas por electroerosión, una vez que la fisura se ha hecho pasante y ha propagado hasta la zona de empotramiento, tienden a estabilizar su comportamiento al de dos mitades desacopladas. En las primeras regiones de dichas curvas no se aprecian diferencias notables debidas a la técnica de

prefisuración, sin embargo en las últimas regiones si que se aprecia una diferencia notable, debida principalmente a que la profundidad de fisura en las probetas prefisuradas por láser es menor que en las prefisuradas por micromecanizado, por lo que su capacidad de carga, como se observa en la figura, es mayor.

## 6. CONCLUSIONES

Las dos técnicas estudiadas para la prefisuración de la probeta SPT presentan ventajas e inconvenientes en ambos casos. Del micromecanizado se puede destacar el buen acabado superficial de la fisura y la homogeneidad conseguida de la profundidad de fisura, implicando esto la repetibilidad de las curvas obtenidas en el ensayo. Como desventaja se podría decir que la forma de la fisura inicial se asemeja más al de una entalla que al de una fisura afilada. Todo lo contrario sucede con la prefisuración por láser, donde la fisura lograda si es afilada, pero presenta el inconveniente de no conseguir una profundidad de fisura homogénea y del valor deseado, por lo que es necesario un posterior análisis SEM de la fisura. A pesar de todo esto, se ha comprobado que el tipo de corte, con el que se obtienen las probetas SPT, tiene una mayor influencia en los resultados obtenidos que la técnica con la que se realiza la fisura inicial en la probeta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida del proyecto MCI Ref: MAT2008-06879-C03-03/MAT.

## REFERENCIAS

- [1] X. Mao and H. Takahashi, *Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk small punch tests*, Journal of Nuclear Materials 150 (1987), 42-52.
- [2] X. Mao, H. Takahashi and T. Kodaira, *Supersmall punch test to estimate fracture toughness Jic and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel*, Materials Science and Engineering, A150 (1992), 231-236.
- [3] Jai-Man Baik, J. Kameda, and O. Back, *Small Punch Test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel*, Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 17 (1983), 1443-1447.
- [4] Jang-Bog Ju, Jae-il Jang, Dongil Kwon, *Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80 (2003), 221-228.
- [5] I. I. Cuesta, J. M. Alegre, R. Lacalle, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, *Cálculo de la integral J en probetas SPT para la estimación de la tenacidad a fractura*, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II (2008), 486-491.
- [6] I. I. Cuesta, J. M. Alegre, P.M. Bravo, *Evaluación de la tenacidad a fractura mediante la combinación del diagrama FAD y de ensayos SPT sobre probetas fisuradas*, Anales de Mecánica de la Fractura Vol. II (2009), 382-387.