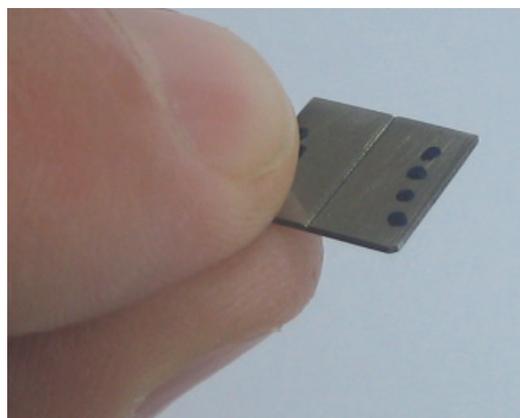


Inicio de fisuración en probetas miniatura de punzonado



Isidoro Iván Cuesta-Segura
Jesús Manuel Alegre-Calderón

Ingeniero de Organización Industrial
Ingeniero Industrial

Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior. C/Villadiego, s/n – 09001 Burgos.
Tfno: +34 947 259073. iicuesta@ubu.es

Recibido: 17/03/2011 • Aceptado: 05/07/2011

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4107>

Crack initiation in small punch specimens

ABSTRACT

• The main objective of the Small Punch Test on pre-cracked specimens is to obtain the fracture properties in those cases where there is not enough material for conducting conventional tests. One of the biggest challenges presented in achieving this goal is the accurate determination of the applied load at the onset of the crack initiation (P_{apl}) during the test, because this point is not clearly reflected in the load-displacement curve obtained. To determine this load, three possible methods have been evaluated: the first one is based on interrupted tests, the second one consists of analyzing the slope of the load-displacement curve and the third one is defined as the compliance method used with compact specimens. The aim of this paper is to present these experimental methods and identify which of them is the most appropriate. As an immediate consequence, the relationship between P_{apl} and the initial crack depth in the pre-cracked SPT specimens has been analyzed.

• **Key words:** Small Punch Test, Failure Assessment Diagram, Pre-cracked specimen, Applied load, Crack propagation.

RESUMEN

El ensayo miniatura de punzonado (SPT) sobre probetas prefisuradas tiene por objetivo la obtención de las propiedades a fractura cuando no se dispone de suficiente material para la realización de ensayos convencionales. Una de las mayores dificultades que se presenta en la consecución de este objetivo es la correcta determinación de la carga aplicada en el inicio de propagación de fisura (P_{apl}) durante el ensayo, ya que este instante no queda claramente reflejado en la curva carga-desplazamiento obtenida. Para determinar el valor de la carga de inicio de la propagación de fisura, se han evaluado tres posibles métodos: el primero de ellos está basado en la realización de ensayos interrumpidos, el segundo consiste en el análisis de la pendiente de la curva carga-desplazamiento y en el tercero se ha aplicado el método de las descargas elásticas utilizado con probetas compactas convencionales. El objetivo del presente trabajo es presentar los diferentes métodos experimentales e identificar el más adecuado. Como consecuencia inmediata se ha analizado la relación

existente entre P_{apl} y la profundidad de fisura inicial en las probetas SPT prefisuradas.

Palabras clave: Ensayo miniatura de punzonado, Diagrama de fallo, Probeta prefisurada, Carga aplicada, Propagación de fisura.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO

La determinación de las propiedades mecánicas y de fractura de un material, se realiza de forma convencional mediante ensayos normalizados, los cuales utilizan probetas estándar, como pueden ser las de tracción, *Charpy* o compactas (CT). 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

camente en un punzonado sobre una probeta miniatura, mediante un punzón de cabeza esférica de gran rigidez, estando la periferia de la probeta empotrada por dos matrices. Estas probetas miniatura generalmente son cuadradas de dimensiones 10 x 10 x 0,5 mm, o bien son circulares de diámetro 3 mm. 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. Su aplicabilidad se ha extendido 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 [1-5] sobre este tema hasta el momento han sido realizados con probetas convencionales de SPT, siendo muy pocos los autores que han utilizado probetas prefisuradas [6-9]. A priori, estas probetas prefisuradas, por tener mecanizada una grieta inicial, podrían 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 presente estudio. Se han considerado fisuras pasantes en todo el espesor, de diferentes longitudes, sobrepasando el eje de carga, Fig. (1a) y sin llegar al citado eje, Fig. (1b). La fisura central no pasante, Fig. (1d), en unas dimensiones tan reducidas de probeta resulta a priori de muy difícil ejecución

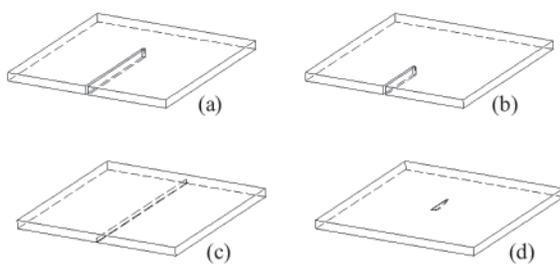


Figura 1: Tipos de fisura inicial en probetas SPT.

Las fisuras de la Fig. (1a) y (1b) no han resultado muy prácticas desde el punto de vista de la longitud disponible para la propagación de la grieta, y en cualquier caso el espesor de la probeta haría que el valor de tenacidad fuese muy cercano a condiciones de tensión plana. La fisura longitudinal no pasante, Fig. (1c), parece una de las opciones factibles, aunque también presenta sus limitaciones (reducido espesor e inicio de propagación de fisura en la zona cercana

al punzón). Sin embargo, se considera que podría utilizarse para estimar las condiciones de inicio en situaciones de bajo confinamiento tensional.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS PROBETAS MINIATURA PREFISURADAS

Para mecanizar este tipo de fisura inicial, Fig. (1c), se han empleado dos técnicas diferentes: el micromecanizado de alta precisión y la microfisuración por láser. El micromecanizado emplea una herramienta en forma de V con ángulo de 37° y radio de redondeo en la punta de 100 μm. La profundidad de la entalla 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 entalla que se obtiene con esta técnica se puede ver en la Fig. (2a), la cuál reproduce fielmente la forma de la herramienta con la que se mecaniza. Cabe destacar el buen acabado superficial de la misma y la homogeneidad de su profundidad a lo largo de toda la longitud.

En la microfisuración por láser, tras una calibración inicial, el láser es aplicado en forma de haz de pulsos de 30 μm de diámetro. Al igual que en la técnica anterior, la entalla 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 Fig. (2b) se muestra la sección de la entalla obtenida con esta técnica, donde se puede observar como la punta de la misma es afilada, asemejándose más a una fisura perfecta sin redondeo en la punta. Debido a esto, para prefisurar las probetas SPT, en el presente trabajo se ha empleado la técnica de microfisuración por láser.

Con el objetivo de obtener las propiedades a fractura, utilizando las probetas prefisuradas SPT, se han ensayado diferentes probetas variando la profundidad de la fisura. Los parámetros de fractura (K_{IC} , J_{IC} , energía de rotura, etc.) estarán relacionados con el punto de inicio de la rotura. El uso de estas probetas de reducido tamaño complica la identificación de dicho punto.

En el desarrollo del presente trabajo se han evaluado tres posibles métodos experimentales para determinar el valor de la carga aplicada sobre la probeta en el instante de inicio de la propagación de fisura. El primero de ellos basado en la realización de ensayos interrumpidos, el segundo consiste en el análisis de la pendiente de la curva carga-desplazamiento y el tercero aplica el método de las descargas elásticas. El objetivo final consiste en identificar el método más adecuado para determinar P_{apl} en las probetas SPT prefisuradas,

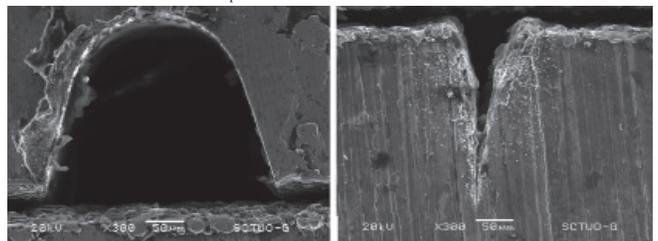


Figura 2: Sección de la fisura inicial obtenida con: a) micromecanizado de alta precisión (derecha) y b) microfisuración por láser (izquierda).

permitiendo de esta manera su uso en la estimación de las propiedades a fractura del material empleado. También se analizará la relación existente entre P_{apl} y la profundidad de fisura inicial en la probeta SPT prefisurada.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El material utilizado en el presente trabajo es un acero inoxidable martensítico endurecido por precipitación conocido como acero 15.5 PH (condición 1025). Está también caracterizado por la temperatura del tratamiento térmico al que se somete, en este caso condición 1025 (calentamiento de cuatro horas a una temperatura de $1025^{\circ}\text{F} \pm 15^{\circ}\text{F}$ y enfriamiento al aire).

2.1. EL ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO SOBRE PROBETAS PREFISURADAS

En este trabajo se han utilizado probetas SPT prefisuradas, de dimensiones $20 \times 20 \times 1 \text{ mm}$, en lugar del tamaño convencional $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}$, con una fisura inicial de tipo longitudinal no pasante, como se puede ver en la Fig. (3). El uso de probetas de 1 mm de espesor permite trabajar de manera factible con diferentes profundidades de prefisuración y analizar de manera más exacta el efecto de la profundidad inicial de la misma en los resultados obtenidos. Dicha profundidad se puede ha adimensionalizado con respecto al espesor de probeta (t), obteniendo de esta manera diferentes valores de la relación a/t . Los valores teóricos considerados para a/t se encuentran entre 0.2 y 0.5. Para la ejecución del ensayo se ha utilizado un diámetro del punzón $d_p = 5 \text{ mm}$, una matriz inferior de diámetro $D_d = 8 \text{ mm}$ y un radio de acuerdo de la matriz inferior $r = 1 \text{ mm}$. El ensayo se ha realizado a temperatura ambiente. La velocidad de ensayo ha sido $v = 0.2 \text{ mm/min}$.

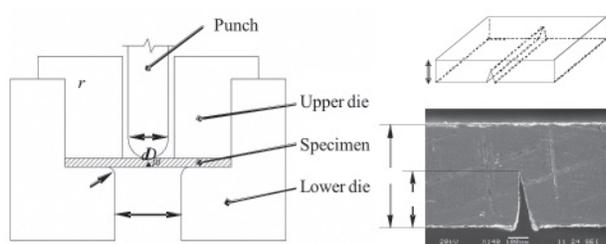


Figura 3: Probeta SPT prefisurada.

Durante el ensayo se recoge la curva carga-desplazamiento del punzón. En la Fig. (4) se presentan las curvas obtenidas en el ensayo SPT con probetas prefisuradas de dimensiones $20 \times 20 \times 1 \text{ mm}$, para el material analizado, en función de si la relación a/t es mayor o menor de 0.5. El comportamiento exhibido por estas probetas es el mismo que el observado en probetas SPT del tamaño convencional $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}$, [9], es decir, que las conclusiones alcanzadas en el presente trabajo serán extrapolables a este tamaño de probeta. Analizando

la forma que presentan dichas 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 en la simulación de una fisura completamente pasante ($a/t=1$), es decir, como si estuviese formada por dos mitades separadas.

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, se produce el fenómeno de indentación, e incluso la rotura de pequeños ligamentos dejados por el láser durante el mecanizado de la fisura. 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 región III tiene lugar la progresiva apertura 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 desgarramiento 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 Fig. (4).

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

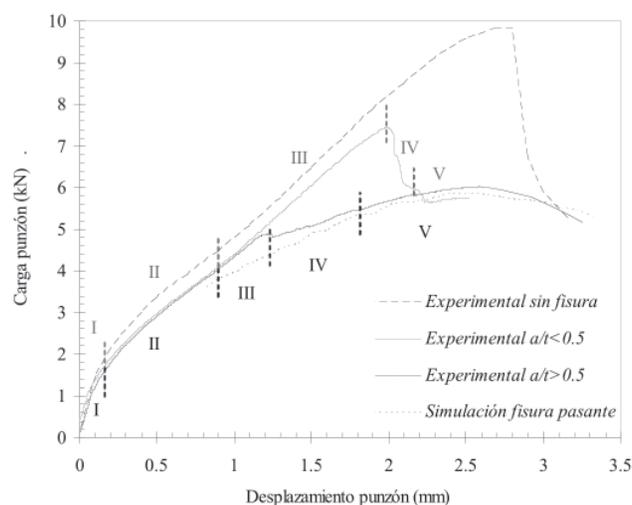


Figura 4: Curvas carga-desplazamiento del SPT sobre probeta prefisurada.

la probeta. La región IV comprende dicho decremento, 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. 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, obteniendo de esta manera las curvas anteriores en función de la relación a/t . En ambos casos, la evolución de la propagación de fisura en la probeta SPT prefisurada se corresponde con el representado en la Fig. (5), donde comenzaría en el centro del frente de grieta inicial, conforme va avanzando el ensayo se convierte en pasante, generando de esta manera dos frentes de grieta que avanzarían en sentidos opuestos hasta la zona de empotramiento de la probeta.

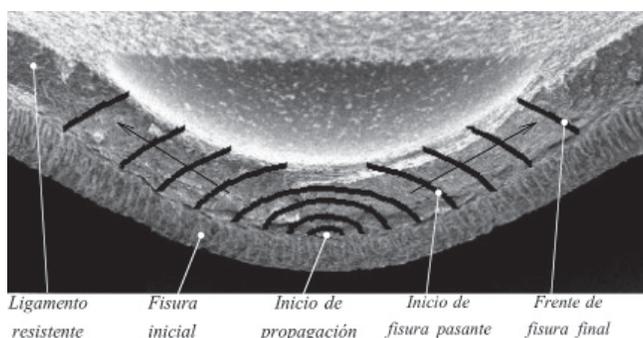


Figura 5: Esquema de la propagación de fisura en probetas SPT prefisuradas.

Se puede concluir 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 sí que está identificado en ambas curvas, por el quiebro de la curva en la primera y por el descenso brusco de la capacidad resistente en la segunda.

Tal y como se ha comentado anteriormente, para la determinación de P_{apl} es posible emplear tres métodos experimentales diferentes entre sí. Cada uno de ellos presenta una serie de ventajas e inconvenientes que serán puestos de manifiesto a continuación.

2.2. ENSAYOS INTERRUMPIDOS

Este método consiste en realizar al menos una batería de ensayos interrumpidos a diferentes niveles de carga sobre probetas SPT prefisuradas del material estudiado, en el entorno del punto donde se prevé la iniciación. Una vez alcanzado el nivel de carga deseado, se interrumpe el ensayo y se descarga la probeta. Se efectúa un primer análisis visual

y un posterior análisis SEM de las probetas para determinar si la fisura se ha iniciado o no en el punto en el que se ha detenido el ensayo. La rotura de la probeta de forma frágil, mediante nitrógeno líquido, es necesaria para favorecer el análisis fractográfico. El inconveniente que presenta este método es la laboriosidad del ensayo y la complejidad de interrumpir el ensayo en el punto de iniciación.

En el supuesto de realizar varias baterías de SPT's interrumpidos con diferentes valores de la profundidad de fisura inicial a , a cada una de ellas le corresponderá un valor de P_{apl} diferente. En general se ha observado que el inicio de la fisuración está entorno al 85% de la carga que produce la fisura pasante ($P_{quiebro}$ o P_{max}). Para no tener que realizar un elevado número de ensayos se puede efectuar un primer ensayo completo, identificar el instante en el que la fisura se hace pasante, es decir, el quiebro de la curva $P_{quiebro}$ si la relación $a/t > 0.5$ o el descenso brusco de la capacidad resistente P_{max} si la relación $a/t < 0.5$ y realizar ensayos interrumpidos en el entorno del 85% de la carga correspondiente a la fisura pasante ($P_{quiebro}$ o P_{max}). En la Fig. (6) se presenta un esquema de una batería de ensayos interrumpidos mostrando los niveles de carga y la deformación en la probeta.

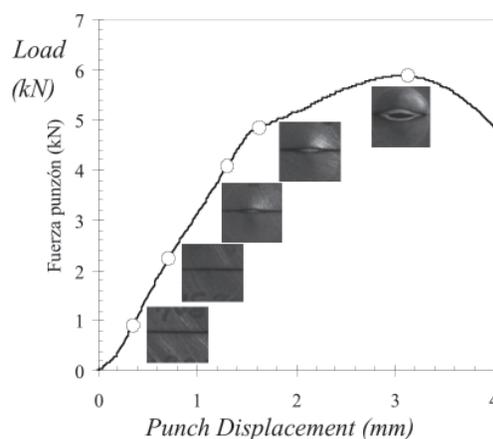


Figura 6: Batería de ensayos interrumpidos con relación $a/t > 0.5$.

2.3. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LA PENDIENTE DE LA CURVA

Este método consiste en analizar la variación de la pendiente en la curva carga-desplazamiento a lo largo de la región III. Al igual que sucede en la curva correspondiente a las probetas convencionales de SPT, el comportamiento observado en esta región se puede considerar lineal y en consecuencia es posible ajustarlo mediante una recta (pendiente constante), a excepción del último tramo a partir del inicio de propagación de fisura, en donde se produce el decremento de la pendiente en la curva conforme la fisura va creciendo hasta hacerse pasante a lo largo del espesor. Este descenso en la pendiente puede estar también condicionado por la elevada plastificación de la probeta.

La pendiente en cada punto se calcula como el incremento de carga frente al incremento de desplazamiento con respecto

al punto anterior. Para evitar los problemas de ruido, típicos de la adquisición de datos, y favorecer la visualización de la variación de la pendiente, se ha utilizado como valor de la pendiente en un punto la media de los valores de los cinco puntos anteriores y posteriores, además del suyo propio. Representando este valor frente al desplazamiento del punzón se obtiene la curva típica mostrada en la Fig. (7), en la que se puede identificar el valor del desplazamiento del punzón donde la pendiente de la curva deja de ser constante. Este punto correspondería con el inicio de propagación de fisura, por lo que quedaría determinado el valor de carga que se alcanza en este punto, o lo que es lo mismo, el valor de P_{apl} .

La ventaja de este ensayo radica en que sólo es necesaria la curva carga-desplazamiento para estimar el punto de inicio. Los valores obtenidos concuerdan con los proporcionados por los ensayos interrumpidos.

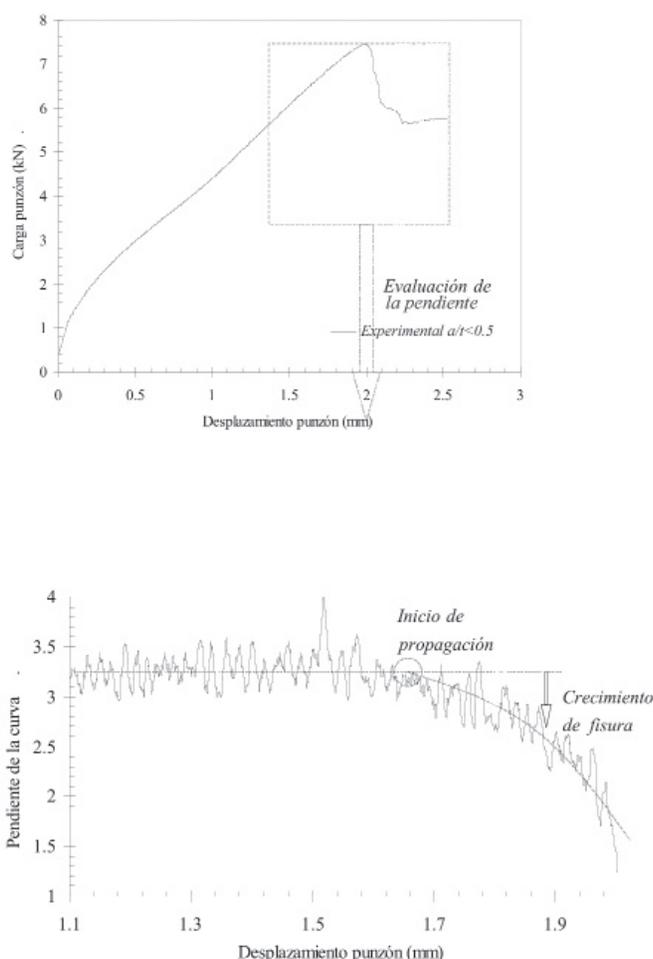


Figura 7: Método de evaluación de la pendiente de la curva.

2.4. MÉTODO DE LA FLEXIBILIDAD O DE LAS DESCARGAS ELÁSTICAS

Este método es similar al utilizado con probetas compactas (CT), y es considerado en principio el más fiable dado que

al basarse en las descargas elásticas se evita el efecto de la plastificación en la detección del inicio de propagación de fisura. Consiste en la realización de un SPT prefisurado en el que se llevan a cabo una serie de cargas y descargas, para la posterior evaluación de la variación de la pendiente de cada una de las descargas realizadas. La curva característica del ensayo se muestra en la Fig. (8), donde también se puede ver la variación de la pendiente de las diferentes cargas realizadas. Esta variación es linealmente creciente, dado que la geometría de la probeta varía continuamente debido al alto grado de plastificación, a diferencia de lo que ocurre en la probeta CT donde la variación es constante (la geometría no varía) hasta el instante en el que se produce el inicio de propagación de fisura, donde se observa una pérdida progresiva de rigidez de la probeta. En nuestro caso, el inicio de la propagación está relacionado con la pérdida de linealidad de la variación de la pendiente de las descargas, como se puede ver en la Fig. (8), por lo que de nuevo quedaría

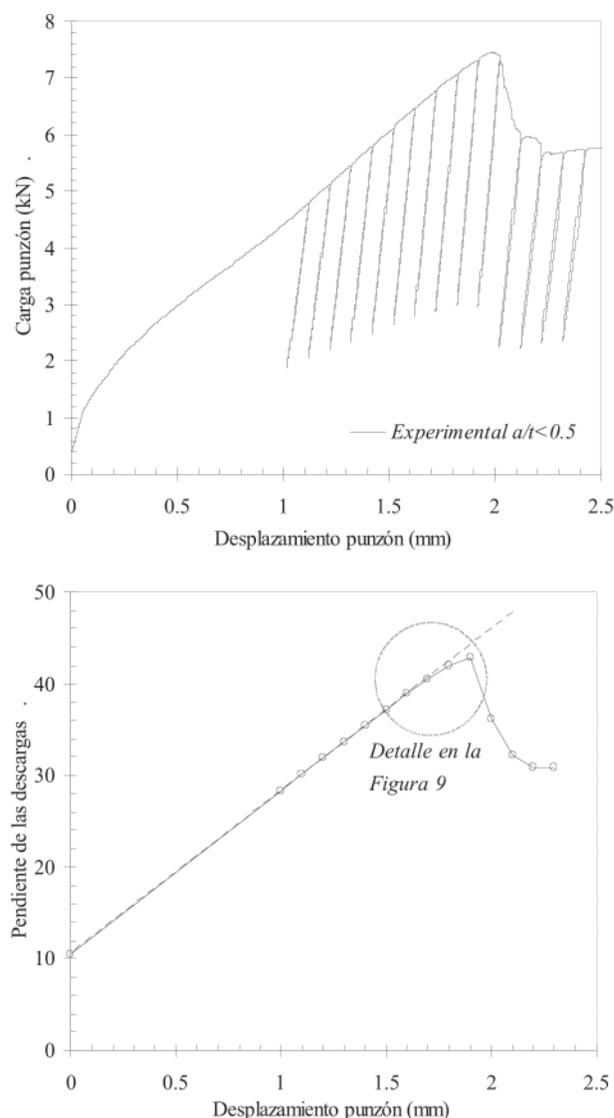


Figura 8: Método de la flexibilidad

determinado el valor de carga P_{apl} que se alcanza en este punto.

Obsérvese el hecho importante de que la pendiente de las descargas elásticas es independiente de la forma de la curva carga-desplazamiento hasta el momento de iniciación. Es decir, no se ve influida por el tramo I, II o III de la curva carga-desplazamiento. Únicamente se detecta la variación en el instante de inicio de la fisuración. El método de obtener la pendiente de las descargas es importante dado que debe efectuarse de la manera más exacta posible, para ello se ha calculado ajustando los datos de cada una de las descargas elásticas ($d.e.$) a una recta definida por la expresión (1),

$$P = m_{d.e.} \cdot \Delta p + n_{0d.e.} \quad (1)$$

donde P y Δp son la carga y el desplazamiento del punzón, y $m_{d.e.}$ y $n_{0d.e.}$ son la pendiente y la ordenada en el origen de la recta respectivamente. Por lo tanto, el valor de $m_{d.e.}$ es el que se toma como valor de la pendiente en cada una de las descargas realizadas en el ensayo. Representando los diferentes valores de $m_{d.e.}$ frente al desplazamiento del punzón, es posible identificar la pérdida de linealidad comentada anteriormente, con lo que el inicio de propagación quedaría determinado, Fig. (9).

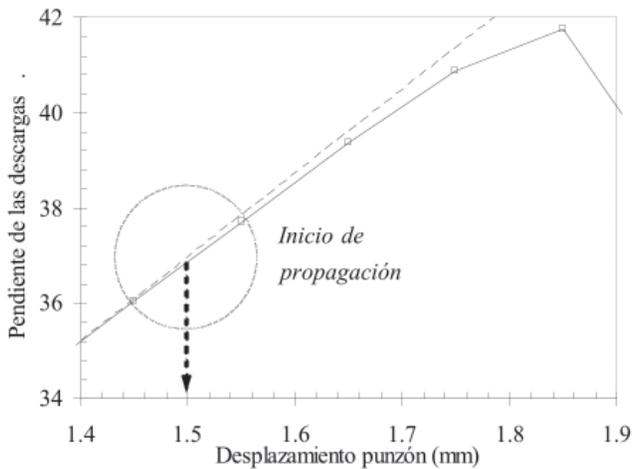


Figura 9: Detalle de la curva pendiente-desplazamiento de la Fig. (8).

3. RESULTADOS

Para la determinación de la carga aplicada sobre la probeta en el instante de inicio de la propagación de fisura P_{apl} , se han propuesto tres métodos diferentes. A pesar de las diferencias existentes entre ellos, con todos se ha estimado

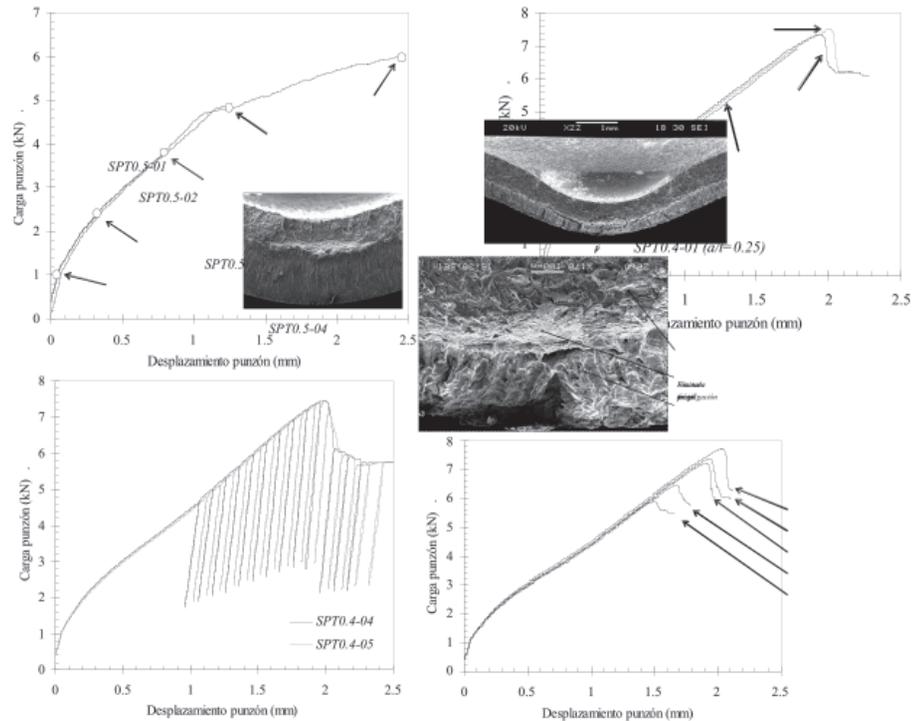


Figura 10: Curvas carga-desplazamiento del SPT sobre probetas prefisuradas de 20x20x1 mm.

un valor de P_{apl} para cada una de las probetas SPT ensayadas. Los ensayos se han llevado a cabo con probetas SPT prefisuradas con diferentes relaciones a/t , entre 0.2 y 0.55. Las curvas carga-desplazamiento obtenidas se recogen en la Fig. (10) en función del método empleado para determinar P_{apl} . En general, es posible establecer que el ratio entre P_{apl} y la carga que produce la fisura pasante (P_{max} o $P_{quiebro}$) está entorno al 85%. La Fig. (11) muestra el valor de P_{apl} de cada probeta ensayada respecto a su correspondiente valor real de la relación a/t . Como se puede observar se ha incidido en el estudio de relaciones a/t bajas, ya que presentan un mayor ligamento resistente y por ende una mayor constricción en la punta de fisura, lo que permitirá una estimación más realista de las propiedades a fractura. Además, cuanto mayor sea la

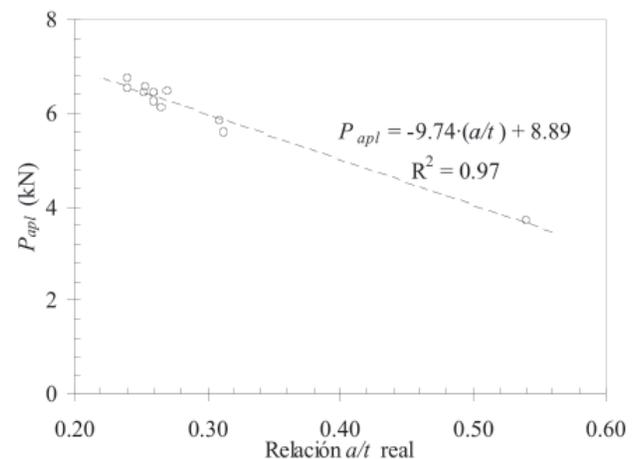


Figura 11: Valores de P_{apl} respecto a la relación a/t real.

fisura inicial más afectada se verá la zona del frente de grieta por la indentación producida por el punzón.

4. DISCUSIÓN

En la Fig. (11) se puede apreciar el buen ajuste lineal obtenido entre P_{apl} y la relación a/t , por lo que en futuros ensayos sobre probetas SPT prefisuradas del material analizado será posible estimar a priori, el valor de la carga de inicio de fisuración P_{apl} para cada valor de a/t , mediante la expresión (2).

$$P_{apl} = -9.74 \cdot (a/t) + 8.89 \quad (2)$$

La realización de ensayos interrumpidos ha permitido conocer en detalle el proceso de fisuración de este tipo de probetas SPT prefisuradas. Gracias al análisis SEM y a los ensayos interrumpidos realizados, es posible hacerse una idea de como es realmente la evolución de la propagación de fisura en la probeta SPT prefigurada; dicha propagación se ha podido observar en la Fig. (5).

Se han aplicado diferentes métodos para determinar la carga de inicio de fisuración en las probetas SPT prefisuradas. En particular se han realizado ensayos interrumpidos, se ha analizado la pendiente de la curva carga-desplazamiento y se ha efectuado un ensayo con descargas elásticas (método de la flexibilidad). De los tres métodos presentados para tal fin, el método de ensayos interrumpidos no permite determinar el inicio de fisuración con exactitud, además es necesario ensayar varias probetas, con la misma relación a/t , para establecer un solo valor de P_{apl} y requiere para su aplicación un análisis SEM de las probetas SPT ensayadas, lo que supondría un coste adicional. Por otro lado, el método de evaluación de la pendiente de la curva presenta el inconveniente de poder ser usado sólo con probetas con una relación $a/t < 0.5$, donde la región III de la curva es lo suficientemente amplia para poder ser ajustada linealmente. En consecuencia, el método de la flexibilidad puede ser considerado como el más adecuado para este análisis, dado que presenta la ventaja de que la pendiente de las descargas elásticas es independiente de la forma de la curva carga-desplazamiento hasta el momento de iniciación. Es decir, no se ve influida por las diferentes regiones iniciales de la curva carga-desplazamiento y únicamente se detecta la variación en el instante de inicio de propagación de fisura.

Finalmente, cabe destacar que la correcta identificación del valor de P_{apl} en las probetas SPT prefisuradas permitirá su utilización en la estimación de propiedades de fractura del material analizado, como por ejemplo en la obtención de la integral J en el instante de inicio de propagación de fisura a partir de simulaciones numéricas [7] o en la determinación de la tenacidad a fractura del material (K_{mat}) a partir de diagramas de análisis de fallo, tales como los utilizados en los procedimientos de integridad estructural [8]. En estos diagramas se representa, de forma adimensional, la relación

entre la carga de inicio de la rotura de un componente frente al valor de tenacidad a fractura del material.

5. AGRADECIMIENTOS

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

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mao X, Takahashi H. "Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk small punch tests". *Journal of Nuclear Materials*. 1987. Vol.150 p.42-52.
[http://dx.doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4)
- [2] Baik JM, Kameda J, Back O. "Small Punch Test evaluation of intergranular embrittlement of an alloy steel". *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1983. Vol.17 p.1443-1447
- [3] Mao X, Takahashi H, Kodaira T. "Supersmall punch test to estimate fracture toughness J_{ic} and its application to radiation embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel". *Materials Science and Engineering*. 1992. Vol. A150 p.231-236
- [4] Saucedo-Muñoz ML, Liu SC, Hashida T *et al*. "Correlationship between JIC and equivalent fracture strain determined by small-punch tests in JN1, JJ1 and JK2 austenitic stainless steels". *Cryogenics*. 2001. Vol.41 p.713-719.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0011-2275\(01\)00135-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-2275(01)00135-7)
- [5] Shekhter A, Kim S, Carr DG *et al*. "Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr-1Mo-0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, K_{Ic} fracture toughness and small punch test". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2002. Vol.79 p.611-615.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00087-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00087-X)
- [6] Ju JB, Jang J, Kwon D. "Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2003. Vol.80 p.221-228
- [7] Cuesta II, Alegre JM, Lacalle R *et al*. "Cálculo de la integral J en probetas SPT para la estimación de la tenacidad a fractura". *Anales de Mecánica de la Fractura*. 2008. Vol.25 p.486-491
- [8] Cuesta II, Alegre JM, Bravo PM. "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*. 2009. Vol.26 p.382-387
- [9] Cárdenas-Paredes DE. "Caracterización del comportamiento a fractura de un acero para gasoductos mediante el ensayo miniatura de punzonado". Directores: Belzunce-Varela FJ, Rodríguez-González MC. Universidad de Oviedo, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, 2010