

DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA MEDIANTE EL ENSAYO SMALL PUNCH Y CURVAS ISO-A

R. Lacalle¹, D. Ferreño¹, J. García¹, J.A. Álvarez¹, F. Gutiérrez-Solana¹

¹Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Avenida de los Castros s/n 39005 Santander

E-mail: lacaller@unican.es

RESUMEN

El ensayo Small Punch representa una de las alternativas a la caracterización convencional de materiales metálicos, con particular interés en aquellas situaciones donde el material es escaso. En este trabajo, se propone una nueva metodología para la estimación de la tenacidad a fractura de materiales metálicos mediante el uso exclusivo de probetas Small Punch entalladas. El método planteado se basa en una combinación del ensayo de probetas Small Punch entalladas y de curvas iso-a, obtenidas mediante sencillas simulaciones por elementos finitos. La técnica desarrollada ha sido aplicada a dos aceros distintos (acero naval Grade A y acero estructural E690), utilizando además probetas con distintas longitudes de entalla inicial. Los resultados obtenidos, muestran la adecuación de este método y además permiten realizar recomendaciones sobre la longitud de entalla óptima a emplear en los ensayos.

PALABRAS CLAVE: Small Punch, Tenacidad a Fractura, Curvas iso-a

ABSTRACT

The Small Punch Test represents one of the alternative ways to the conventional characterisation of metallic materials, with a particular interest in those situations with a limited amount of available material. In this paper, a new methodology for the estimation of fracture toughness of metallic materials by means of notched Small Punch specimens is proposed. This method is based on a combination of Small Punch Test on notched specimens plus iso-a curves obtained in simple Finite Element simulations. The developed technique has been applied to two different steels (Grade A ship building steel and E690 structural steel), using specimens with different initial notch lengths. The obtained results show the suitability of this method and, in addition to that, some key recommendations about the optimum notch length to be used in the tests can be done.

KEYWORDS: Small Punch Test, Fracture Toughness, iso-a Curves

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo miniatura de punzonamiento, o *Small Punch* se enmarca dentro de la familia de técnicas alternativas para la caracterización mecánica de materiales metálicos. Por sus reducidas dimensiones puede ser considerado como un ensayo de naturaleza quasi-no-destructiva, lo que le hace idóneo para la caracterización de aquellas situaciones [1,2] donde la escasez del material impide el empleo de probetas con las dimensiones requeridas por las metodologías de ensayo convencionales [3-5].

El ensayo *Small Punch* ha sido empleado con éxito, entre otros ámbitos, en la caracterización de las propiedades de tracción de materiales metálicos [6,7]. Se han realizado además numerosos intentos para la

estimación de la tenacidad a fractura a partir exclusivamente de ensayos de tipo *Small Punch* [8-10]. Sin embargo, la mayoría de las aproximaciones propuestas para la determinación de la tenacidad presentan, o bien una notable dificultad analítica (complejos modelos de elementos finitos), o bien su aplicación queda reducida a situaciones de carácter muy concreto.

En este trabajo se propone una nueva vía para la estimación de la tenacidad a fractura en régimen Elasto Plástico de materiales metálicos en base a ensayos tipo *Small Punch*. Esta nueva aproximación se basa en el ensayo de probetas *Small Punch* con una entalla lateral [11], y el empleo posterior de curvas iso-a [12] obtenidas tras una simulación por el método de los elementos finitos. La técnica desarrollada ha sido

aplicada a dos materiales distintos, un acero naval Grade A y un acero estructural E690, valorándose además el efecto sobre los resultados de la longitud de la entalla inicial.

2. EL ENSAYO SMALL PUNCH

El ensayo *Small Punch* puede definirse de forma simple como un punzonado hasta rotura de una probeta plana de pequeñas dimensiones. Durante el transcurso de la prueba se registra de forma continua tanto la carga ejercida por el punzón como el desplazamiento experimentado por éste, obteniendo, de este modo, una curva carga-desplazamiento característica de cada ensayo.

Las probetas empleadas en este trabajo presentan unas dimensiones de 10x10 mm y un espesor de referencia de 0.5 mm. Además en cada una de las probetas y previamente a la realización del ensayo, se practicó una entalla lateral mediante electroerosión por hilo (Figura 1). La misión de esta entalla es crear en la probeta un defecto preexistente, al igual que en los ensayos convencionales de tenacidad a fractura [5]. La presencia de esta entalla permite, además, la caracterización del material según la orientación deseada, situación imposible en el caso de ensayar probetas *Small Punch* convencionales sin entalla [13]. El radio de la entalla realizada en las probetas es igual a 0.15 mm, que según [14] en el ámbito de la Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica, puede asimilarse sin consecuencias a un defecto tipo fisura.

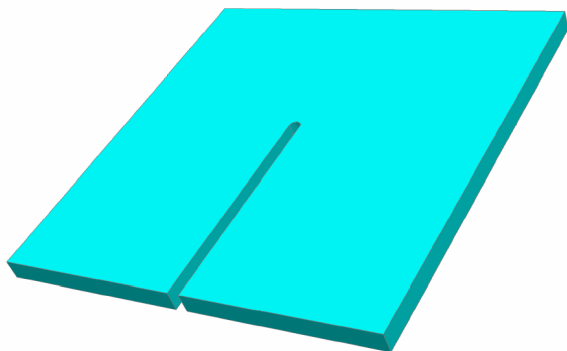


Figura 1. Esquema de las probetas *Small Punch* con entalla lateral.

Por otra parte en la Figura 2, puede observarse un esquema del utillaje que, acoplado a una máquina universal de ensayos mecánicos, se ha empleado para la realización de estos ensayos. En la Figura 2, se plasman además las dimensiones más relevantes de este útil de ensayo.

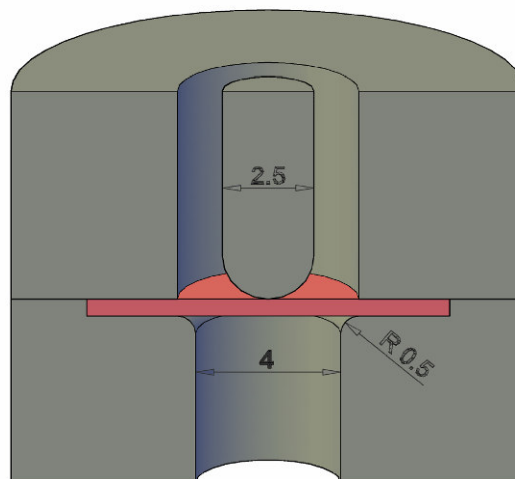


Figura 2. Esquema del utillaje de los ensayos *Small Punch*. Dimensiones en mm.

3. MATERIALES

En este trabajo han sido empleados dos materiales con propiedades mecánicas bien diferenciadas, un acero naval grade A y un acero estructural E690. Las composiciones químicas de estos materiales pueden consultarse en la Tabla 1. La Tabla 2 muestra, por su parte, los parámetros característicos del comportamiento en tracción de estos materiales. Con el objeto de disponer de materiales con tenacidades a fractura claramente diferenciadas se seleccionaron para ser caracterizadas la orientación T-L en el acero Grade A y la orientación L-T en el acero E690. Las curvas J correspondientes a estos materiales y orientaciones, obtenidas por el procedimiento convencional [5] empleando para ello probetas CT, pueden observarse en la Figura 3.

Tabla 1. Composición química de los aceros empleados en este trabajo (resultados en % en peso).

	Grade A	E690
C	0.13	0.135
Si	0.24	0.241
Mn	0.66	1.1
Ni	<0.02	1.518
Cr	<0.02	0.496
Mo	<0.005	0.465
Cu	<0.02	0.18

Tabla 2. Parámetros característicos del comportamiento a tracción de los aceros empleados.

	Grade A	E690
s_y (MPa)	288	840
s_u (MPa)	450	940
E (GPa)	210	200

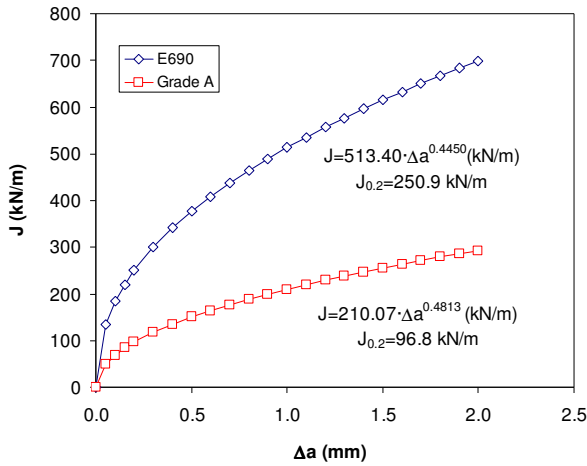


Figura 3. Curvas J de los aceros Grade A y E690.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y ANÁLITICA

4.1 Ensayos sobre probetas entalladas

De cada uno de los dos aceros se prepararon un total de 4 probetas Small Punch sobre las que se practicaron entallas laterales con las dimensiones que se indican en la Tabla 3. En la Figura 4 se muestran las 4 curvas obtenidas para las probetas de acero Grade A, mientras que la Figura 5 muestra las curvas correspondientes al acero E690.

Tabla 3. Longitudes de entalla inicial (mm).

Probeta	Grade A	E690
1	3.78	3.84
2	4.36	4.29
3	4.81	4.86
4	5.22	5.45

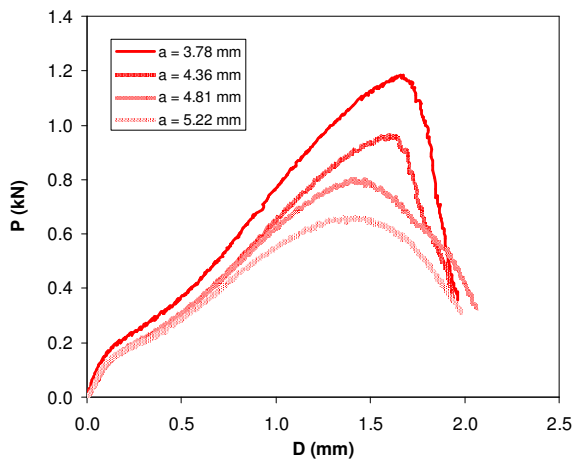


Figura 4. Curvas Small Punch experimentales (Grade A).

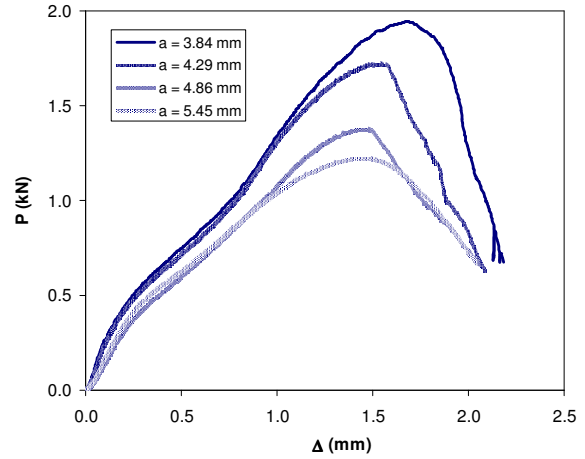


Figura 5. Curvas Small Punch experimentales (E690).

4.2 Metodología para la obtención de la curva J-Δa

Para la determinación de la tenacidad a fractura en términos de la curva J-Δa, directamente se empleó la definición de la integral J como tasa de liberación de energía [15] dada por la expresión (1).

$$J = -\frac{1}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right)_\Delta \quad (1)$$

Donde “B” es el espesor de la probeta, “U” es la energía de deformación, “a” es la longitud de fisura y “Δ” es el desplazamiento. De esta forma, la expresión (1) puede interpretarse como el incremento de energía por unidad de espesor para un incremento diferencial de la longitud de fisura siendo constante el desplazamiento.

Si se dispone de curvas iso-a (como su nombre indica sin crecimiento de grieta) de la geometría y material de interés, es posible, tras una serie de pasos [12] llegar a la expresión (1) que define la resistencia a fractura en rango elasto-plástico. Dichas curvas iso-a, no pueden, en principio, ser obtenidas por vía experimental, ya que en el transcurso del ensayo, inevitablemente se produciría crecimiento de grieta. Por ello se debe recurrir al método de los elementos finitos. En este caso, partiendo del modelo que se muestra en la Figura 6 y empleando el código ANSYS [16], se obtuvieron para cada uno de los dos materiales las curvas iso-a mostradas en las Figuras 7 y 8 que cubren un espectro de fisuras desde 4.15 hasta 5.95 mm, contando desde el borde lateral de la probeta. En la simulación, de carácter elástoplástica, se emplearon elementos tipo SOLID95, habiéndose simulado además los contactos entre punzón y probeta y probeta y utillaje.

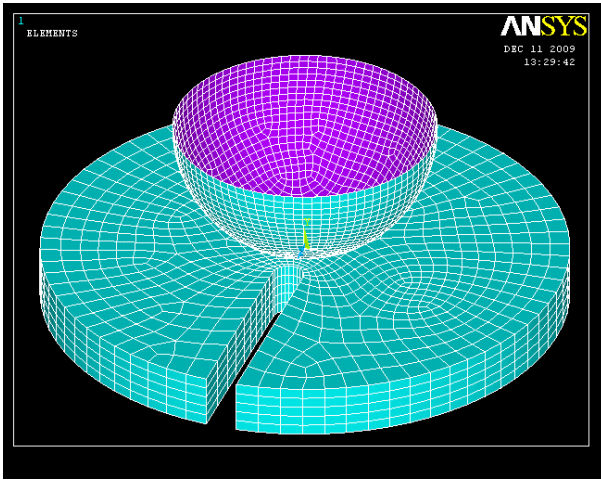


Figura 6. Modelo de elementos finitos utilizado para la obtención de las curvas iso-a. Se simula simplemente la zona de proceso, ya que el resto de la probeta permanece empotrada (Figura 1).

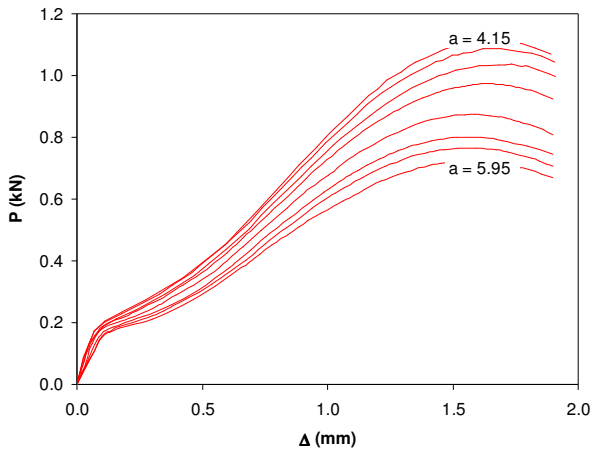


Figura 7. Curvas iso-a correspondientes al acero Grade A.

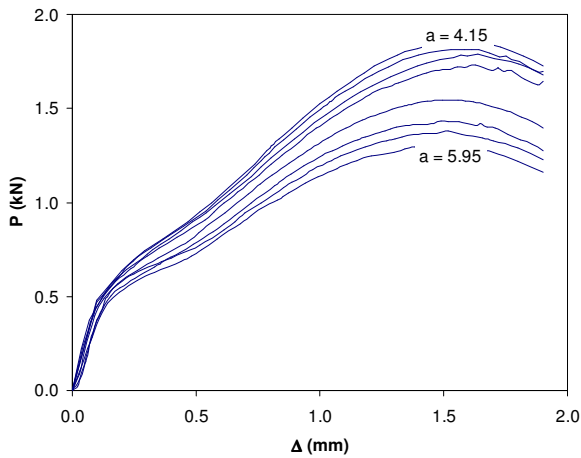


Figura 8. Curvas iso-a correspondientes al acero E690.

Una vez que se dispone de las curvas iso-a, la integral J, para cada valor de crecimiento de grieta, puede ser calculada mediante la siguiente secuencia de pasos [12]:

1. La curva $U(\Delta)$ debe ser obtenida para cada valor de "a" simplemente por integración de las curvas iso-a.
2. Las intersecciones entre las curvas de ensayo y las curvas iso-a (Figura 9) ofrecen pares de valores de interés Δ - Δa .
3. Para cada valor de interés de Δ es posible, acudiendo a las curvas estimadas en el punto 1, obtener curvas $U(a)$.
4. Las curvas $U(a)$, características de cada valor de Δ , pueden ser derivadas en función de "a" sin más que ajustarlas una función que en el caso analizado respondió al tipo de la propuesta en (2).

$$U = A_0 + A_1 \cdot \ln(a) \quad (2)$$

5. Una vez se dispone del incremento diferencial de "U" frente a "a" para un desplazamiento y valor de fisura dados, el valor de J se puede calcular sin más que recurrir a (1).

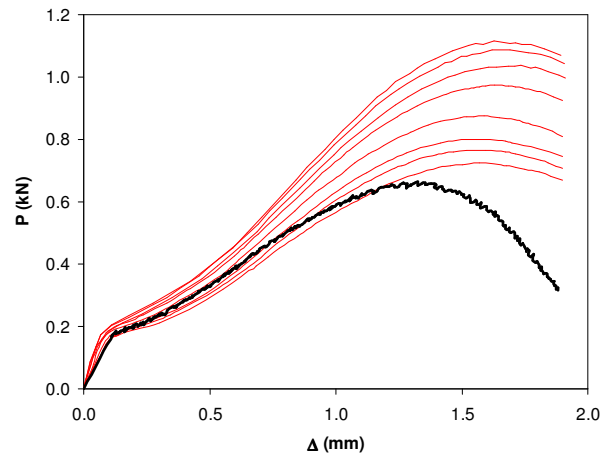


Figura 9. Ejemplo de curva experimental frente a curvas iso-a.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Aplicando el procedimiento que acaba de ser descrito a cada una de las probetas de los dos materiales, se obtuvieron las curvas J- Δa que se muestran en las Figuras 10 y 11, donde también se incluyen, a modo de referencia, las curvas J- Δa obtenidas por métodos convencionales mediante probetas CT. En todos los casos, los puntos obtenidos experimentalmente fueron ajustados según una ley potencial del tipo (3).

$$J = C_1 \cdot \Delta a^{C_2} \quad (3)$$

Como se aprecia en las Figuras 10 y 11, el comportamiento observado es claramente función de la longitud de entalla inicial. Así, para fisuras “cortas” se aprecian altos valores de resistencia, en consonancia con las teorías generales de Mecánica de la Fractura, pero no crecientes con el incremento de la longitud de fisura. Este hecho puede ser explicado atendiendo a que, si bien para que se produzca la iniciación de grieta se necesitan altos valores energéticos, no es posible suministrar dicha energía exclusivamente al fondo de la entalla, sino que parte de la energía contribuye al daño del resto de la probeta. Por ello, cuando la grieta se inicia, su propagación resulta más sencilla en un material tanto o más dañado cuanto más corta es la entalla inicial.

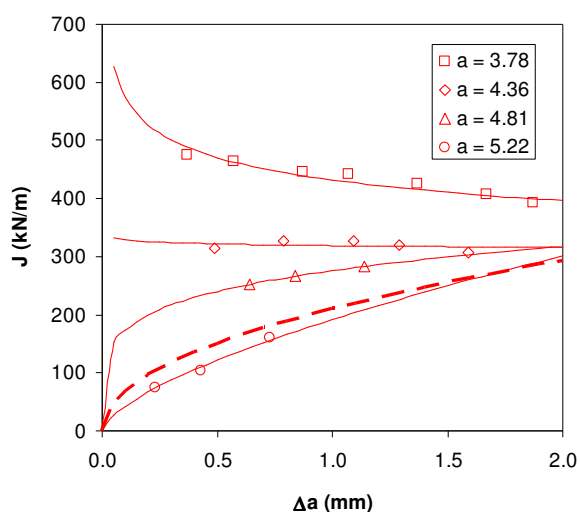


Figura 10. Curvas J - Δa para distintas longitudes de entalla (Grade A).

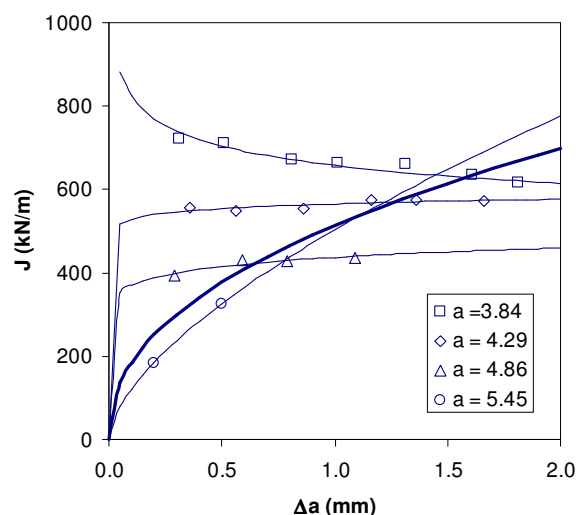


Figura 11. Curvas J - Δa para distintas longitudes de entalla (E690).

Si, para cada uno de los casos se representan los valores de los coeficientes de ajuste C_1 y C_2 , se observa que se obtienen valores equivalentes a los obtenidos por la vía

convencional para longitudes de entallas iniciales cercanas a 5 mm (Figuras 12 y 13).

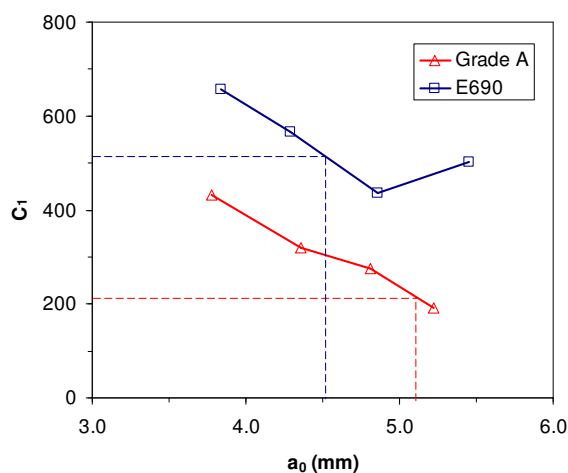


Figura 12. Evolución del parámetro de ajuste C_1 con la longitud de entalla inicial.

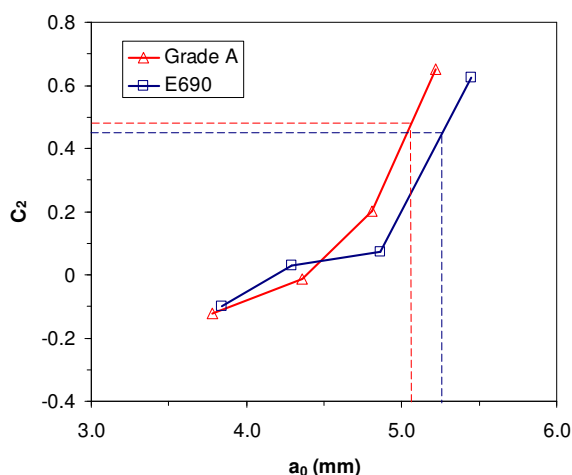


Figura 13. Evolución del parámetro de ajuste C_2 con la longitud de entalla inicial.

Puede representarse también el valor de tenacidad de iniciación $J_{0.2}$, definido como el valor de J correspondiente a un crecimiento de grieta de 0.2 mm, frente a las distintas longitudes de entalla iniciales. Se comprueba nuevamente, que para entallas ligeramente superiores a 5 mm se alcanzan valores semejantes a los obtenidos en ensayos normalizados de fractura. Partiendo de los resultados mostrados, y atendiendo a la semejante tendencia que presentan las curvas de la Figura 14, puede proponerse la expresión (4) para la determinación de $J_{0.2}$ con independencia de la longitud de entalla empleada.

$$J_{0.2} = J_{0.2,a_0} + 333 \cdot (a_0 - 5.1) \quad (4)$$

En (4), “ J ” viene expresada en kN/m y “ a ” en mm. Por otro lado, $J_{0.2,a_0}$ representa la tenacidad de iniciación aparente calculada con una probeta con entalla inicial a_0 .

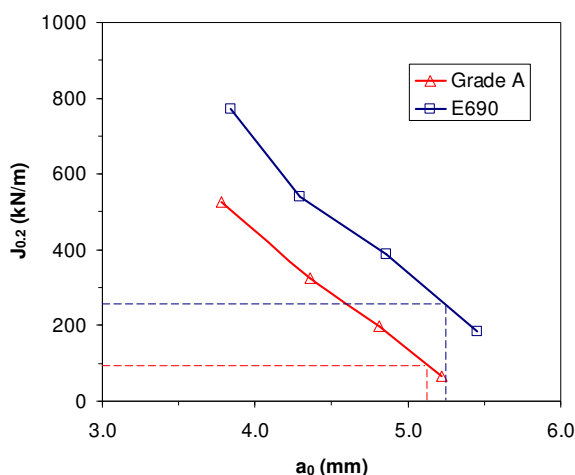


Figura 14. Evolución del valor de $J_{0.2}$ con la longitud de entalla inicial.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado una nueva metodología para la estimación de la tenacidad a fractura a partir de probetas Small Punch con una entalla lateral. El método propuesto se basa en superponer a las curvas experimentales obtenidas con probetas entalladas una colección de curvas iso- a . Las curvas iso- a son obtenidas mediante simulaciones elasto-plásticas por elementos finitos.

La metodología ha sido aplicada a dos materiales distintos -un acero Grade A y un acero estructural E690- empleando en ambos casos distintas longitudes de entalla inicial en las probetas ensayadas en laboratorio. Tras analizar los resultados, pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Para valores de entallas “cortas” se obtienen valores de resistencia a fractura elevados (claramente por encima de los estimados mediante ensayos convencionales), con curvas de J decrecientes.
- Los valores de entalla entre 5 y 5.2 mm ofrecen resultados equivalentes a los obtenidos en los ensayos normalizados.
- Para el caso de los valores de tenacidad ligados a la iniciación, $J_{0.2}$, se ha propuesto una expresión que permite su estimación con independencia de la longitud de entalla inicial empleada.

En base a todo lo anterior, se propone el empleo de probetas con entallas iniciales comprendidas entre 5.0 y 5.2 mm siempre que se pretenda determinar la curva completa J - Δa . Cuando simplemente se busque el valor de iniciación, puede ahorrarse, sin embargo, el coste ligado a la precisión a la hora de materializar la entalla y emplear cualquier longitud comprendida entre 4 y 5.5 mm.

REFERENCIAS

- [1] S. Cicero, R. Lacalle, F. Gutiérrez-Solana, “Application of Small Punch Techniques for the Determination of Gold Mechanical Properties”, *Strain*, in press.
- [2] D. Finarelli, M. Roedig, F. Carsughi, “Small Punch Test on Austenitic and Martensitic Steels Irradiated in a Spallation Environment with 530 MeV Protons” *Journal of Nuclear Materials*, 328, 2004, pp. 146-150.
- [3] ASTM E8-00, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, *Annual Book of ASTM Standards*, 2000.
- [4] ASTM E23-01, “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”, *Annual Book of ASTM Standards*, 2000.
- [5] ASTM E1820-99a, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, *Annual Book of ASTM Standards*, 1999.
- [6] M. Eskner, R. Sandström, “Mechanical property using the small punch test”, *Journal of Testing and Evaluation*, vol 32, N° 4, January 1995, pp. 282-289.
- [7] R. Lacalle, J. García, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, “Obtención Mediante el Ensayo Small Punch de las Propiedades de Tracción de Materiales Metálicos”, *Anales de Mecánica de la Fractura* 26, 2009.
- [8] A. Shekhtel, A.B. Croker, A.K. Hellier, “Towards the correlation of fracture toughness in an exservice power generator rotor”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol 77, 2000, pp. 113-116.
- [9] J.S. Ha, E. Fleury, “Small Punch test to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II Fracture Toughness”, *Internacional Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol 75, 1998, pp. 707-713.
- [10] I.I. Cuesta, J.M. Alegre, P. 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* 26, (2009)
- [11] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, “Use of Small Punch Notched Samples in the Determination of Fracture Toughness”, *Proceedings of ASME PVP 2008*, Chicago.
- [12] D. Ferreño, S. Cicero, R. Lacalle, I. Gorrochategui, F. Gutiérrez-Solana, “Obtaining the J - Δa curves of an X-750 alloy from rising load test results and iso- a curves obtained by means of finite elements model”, *Engineering Failure Analysis* 16 (2009), pp. 409-420.
- [13] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, “Analysis of Key Factors for the Interpretation of Small Punch Test Results”, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 31, 2008, pp. 841-849.
- [14] O. Akourri, M. Louah, A. Kifani, G. Gilgert, G. Pluvinaige, “The Effect of Notch Radius on Fracture Toughness J_{Ic} ”, *Engineering Fracture Mechanics* 65, 2000, p. 491-505.
- [15] T.L. Anderson, “Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications”, CRC Press, 1991.
- [16] ANSYS Inc., 2008, Release 11.0.