

ESTIMACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA A PARTIR DE PROBETAS “SMALL PUNCH” ENTALLADAS

R. Lacalle, J.A. Álvarez, J. García y F. Gutiérrez-Solana

Departamento 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, cuyo desarrollo se inició a comienzos de los 80, ha sido empleado hasta la fecha como una herramienta para la estimación de las propiedades mecánicas, para caracterizar la transición dúctil-frágil de aceros o para conocer la evolución de esas propiedades con fenómenos de envejecimiento como la irradiación neutrónica. Este ensayo ha sido incluso empleado para determinar la tenacidad a fractura de materiales metálicos, utilizando para ello correlaciones indirectas o complejas metodologías basadas en modelos de daño y simulaciones por Elementos Finitos.

En este trabajo se desarrolla una metodología para la obtención directa de la tenacidad a fractura a partir de ensayos Small Punch, basada en el empleo de probetas con una entalla lateral. Atendiendo a consideraciones energéticas, se han establecido las bases para la determinación de la curva J- Δa de materiales metálicos mediante el empleo de probetas Small Punch entalladas. Esta metodología ha sido aplicada posteriormente al cálculo de la tenacidad a fractura de un acero naval Grade A y de un acero estructural E690 y los resultados han sido comparados con los obtenidos mediante ensayos de tenacidad normalizados.

PALABRAS CLAVE: Small Punch, probetas entalladas, tenacidad a fractura

ABSTRACT

Small Punch Test, first developed in the early 80's, has been used till now as a tool for estimating mechanical properties, for characterising ductile-brittle transition or for knowing the evolution of all these properties with ageing phenomena as neutron irradiation. This test has even been used in the determination of fracture toughness by means of indirect correlations or complex methodologies based on damage models and Finite Element simulations.

In this paper a direct methodology for the determination of fracture toughness from Small Punch tests is developed, based on the use of specimens with a lateral notch. Attending to energy considerations, the basics for obtaining J- Δa curve by using Small Punch specimens have been established. This methodology has been applied to the calculation of fracture toughness of a ship building Grade A steel, as well as an structural steel E690, and the results have been compared with the ones estimated from conventional tests.

KEYWORDS: Small Punch, notched specimens, fracture toughness

1. INTRODUCCIÓN

En sus más de 30 años de recorrido, el ensayo “Small Punch” (en adelante SP) ha sido empleado con éxito para la estimación de las propiedades de tracción [1,2] así como en la determinación de la temperatura de transición dúctil-frágil de materiales metálicos [3]. Por sus reducidas dimensiones y por su sencillez, esta técnica ha sido aplicada fundamentalmente en el ámbito nuclear, para conocer la evolución de las propiedades de los materiales con la irradiación neutrónica [4,5], y en la caracterización de las propiedades de materiales de estructuras en servicio [6], ya que la extracción de una muestra del tamaño necesario para llevar a cabo este

ensayo generalmente no compromete la integridad del componente.

Existen igualmente desarrollos encaminados a la determinación de la tenacidad a fractura de materiales metálicos a partir de los resultados del ensayo SP. Estas metodologías presentan, sin embargo, el inconveniente de la incertidumbre asociada a correlaciones empíricas en algunos casos [7,8], o de la complejidad inherente a los procesos de simulación por elementos finitos incorporando modelos de daño en otros casos [9,10], lo que sin duda contrarresta algunas de las ventajas comparativas del SP -sencillez y rapidez fundamentalmente-, frente a otras técnicas.

En este trabajo se abre una nueva vía para la determinación de la tenacidad a fractura a través del ensayo SP, basada en el empleo de probetas con una simple entalla lateral practicada mediante electroerosión. Esta configuración de probeta, al tiempo que permite establecer una metodología para la obtención de la curva J- Δa atendiendo a simples consideraciones energéticas, solventa una de las principales deficiencias del ensayo SP convencional, incapaz de caracterizar determinadas orientaciones del material [11].

Dos materiales, un acero ordinario Grade A de construcción naval y un acero estructural E690, han sido caracterizados siguiendo esta nueva técnica y los resultados han sido comparados con los obtenidos según ensayos de tenacidad normalizados.

2. EL ENSAYO “SMALL PUNCH” Y LA TENACIDAD A FRACTURA

El ensayo SP consiste básicamente en punzonar una probeta plana de pequeñas dimensiones, deformándola hasta rotura y registrando durante el ensayo la carga frente al desplazamiento experimentado por el punzón. La figura 1 muestra un esquema del útil empleado para la realización de estos ensayos [11].

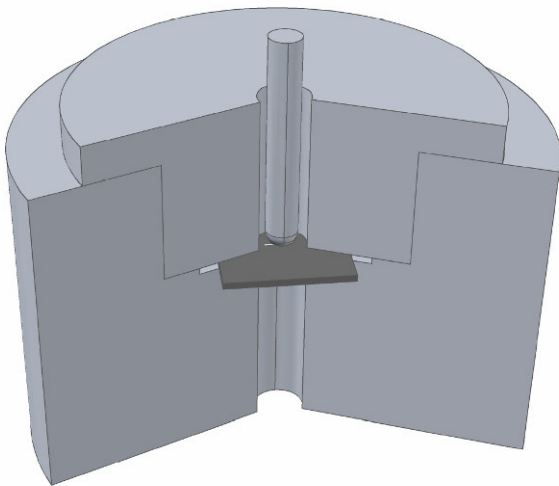


Figura 1. Esquema del dispositivo empleado

Los trabajos existentes hasta la fecha encaminados a la determinación de la tenacidad a fractura a partir del ensayo SP pueden clasificarse en tres grandes grupos: correlaciones empíricas indirectas, aproximaciones analíticas y metodologías basadas en la implementación de modelos de daño en simulaciones por elementos finitos.

-Correlaciones indirectas: se basan fundamentalmente en correlacionar la temperatura de transición dúctil frágil del ensayo SP y la temperatura de transición Charpy y posteriormente emplean las correlaciones existentes en la bibliografía entre esta última temperatura y los valores de tenacidad a fractura [7,8]. Presentan el inconveniente de las incertidumbres asociadas a estas dos correlaciones empíricas, así como

la dificultad existente para alcanzar la temperatura de transición SP, incluso 300 K inferior a la temperatura de transición Charpy [12].

-Aproximaciones analíticas: son metodologías fundamentadas en el uso de expresiones y formulaciones clásicas para el cálculo de la tenacidad a fractura [13,14]. La principal limitación es que dichas formulaciones consideran siempre la presencia de un defecto de características conocidas, que en el caso del ensayo SP convencional no siempre son fáciles de determinar (ej. longitud y crecimiento de fisura).

-Metodologías basadas en modelos de daño y simulaciones por Elementos Finitos: se basan en la determinación de los parámetros de un modelo de daño mediante ensayos SP, para lo cual se precisa la realización física del ensayo y su posterior simulación. Una vez se determinan esos parámetros, es posible simular un ensayo convencional de tenacidad, implementando el modelo de daño [9,10]. Las principales desventajas de esta aproximación son la complejidad -implica la realización y simulación de ensayos SP y la simulación de ensayos de tenacidad-, así como la dificultad para ajustar los numerosos parámetros del modelo de daño.

3. MATERIALES

En este trabajo han sido empleados dos aceros: un acero ordinario de construcción naval Grade A y un acero estructural E690. La tabla 1 resume las principales propiedades mecánicas de estos dos aceros a temperatura ambiente, mientras que en la figura 2 se recogen sus curvas J- Δa obtenidas según el procedimiento convencional [15] correspondientes a la orientación LT, también a temperatura ambiente.

Tabla 1. Propiedades de los materiales empleados

Acero	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	$J_{0.2}$ (KN/m)
Grade A	274	446	143.6
E690	840	915	250.7

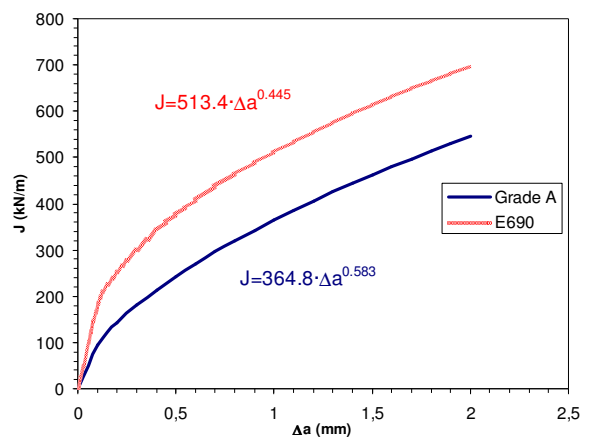


Figura 2. Curvas J- Δa , Grade A y E690

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este trabajo se propone una alternativa para la determinación de la tenacidad a fractura en condiciones dúctiles mediante el ensayo SP basada en los estándares convencionales para la obtención de las propiedades a fractura de materiales metálicos [15]. La idea fundamental consiste en partir de probetas SP modificadas, a las que, mediante electroerosión por hilo, se las ha practicado una entalla lateral de dimensiones conocidas (figura 3). Esta entalla además de actuar como concentrador de tensiones, facilita el crecimiento de una fisura según la dirección deseada, pudiendo, de esta forma, caracterizar cualquiera de las orientaciones del material y resolviendo así una de las principales carencias del ensayo SP convencional. La entalla presenta, por otra parte, un radio de 0.15 mm, dimensión que en condiciones de ductilidad se halla por debajo del valor que, de modo efectivo, puede asimilarse a una fisura [16].



Figura 3. Probeta SP con entalla lateral

Siguiendo el esquema de la figura 4, que es el empleado en la caracterización convencional de la tenacidad a fractura, y evaluando el área bajo la curva 2 ($a=cte.$) es posible determinar el valor de J asociado al crecimiento de fisura desde a_0 hasta a_f .

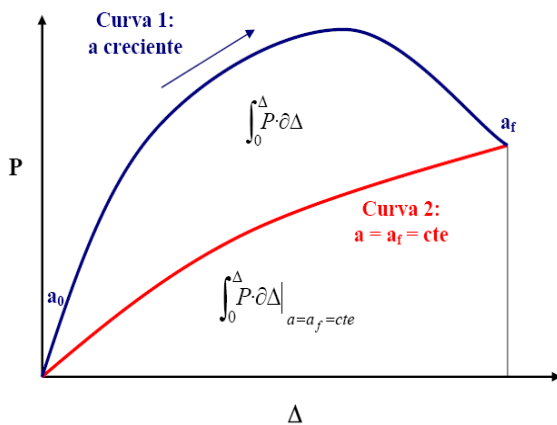


Figura 4. Esquema obtención de J

Trasladando el esquema de la figura 4 a la situación de los ensayos SP, se llegaría a la situación plasmada en la figura 5, donde la curva 1 de la figura 4 correspondería a un ensayo SP con una entalla lateral de valor inicial a_0 que en el transcurso del ensayo iría creciendo. Para la determinación del valor de J asociado al crecimiento de fisura es preciso conocer la curva 2 ($a=a_f=cte.$). Con tal fin se llevaron a cabo observaciones sobre la evolución del defecto durante el transcurso de un ensayo SP sobre una probeta entallada de acero Grade A (figura 5). Teniendo en cuenta que el comienzo de la propagación de la grieta se localizó en torno al máximo de la curva SP, la curva 2 de la figura 4 ($a=a_f=cte.$), podrá aproximarse, hasta su máximo, por una curva experimental SP de una probeta con entalla inicial de valor a_f . Para la determinación del tramo restante de la curva 2, bastaría con unir la región del máximo con el punto de la curva 1 en el que $a=a_f$. No obstante, desde el punto de vista práctico, no se han observado diferencias significativas en los resultados si se prolonga dicha curva mediante una recta horizontal trazada desde el máximo (figura 5).

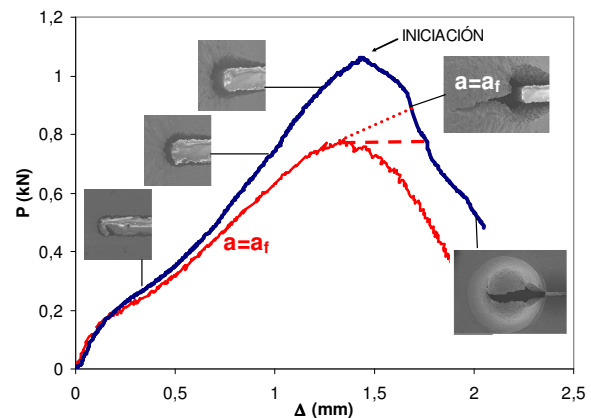


Figura 5. Curva $a=cte$ a partir de ensayos SP

De esta forma, y realizando ensayos con distintas longitudes iniciales de entalla es posible obtener una colección de valores energéticos relacionados con distintos crecimientos de grieta, y aplicando la ecuación (1) [15], se obtendrían los correspondientes valores de J .

$$J = \frac{\eta U}{B-b} \quad (1)$$

siendo, η un factor dependiente exclusivamente de la geometría, U la energía bajo la curva 2 (figura 4), B el espesor de la probeta y b el ligamento remanente.

En esencia, el procedimiento propuesto, análogo al convencional multi-probeta descrito en [15], consiste realizar un ensayo SP sobre una probeta con valor inicial de entalla a_0 y determinar varias curvas $a=cte$ mediante el ensayo de probetas SP con una entalla inicial de valor $a > a_0$.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con la metodología descrita en el apartado anterior, fueron caracterizados los dos aceros indicados en el apartado 3. Para ello se mecanizaron en cada caso 5 probetas SP de dimensiones 10x10x0.5 mm según el plano LT [17], y se materializó en cada una de ellas una entalla siguiendo la dirección T, de modo que al final la orientación caracterizada fuese la LT. La figura 6 y la figura 7 muestran las probetas antes de ser ensayadas mientras que en las tablas 2 y 3 se indican las longitudes iniciales de entalla presentes en cada probeta.



Figura 6. Probetas SP entalladas, Grade A



Figura 7. Probetas SP entalladas, E690

Tabla 2. Longitudes de entalla, Grade A

Probeta	a_0 (mm)
GradeA-1	3.88
GradeA-2	4.25
GradeA-3	4.89
GradeA-4	5.21
GradeA-5	5.98

Tabla 3. Longitudes de entalla, E690

Probeta	a_0 (mm)
E690-1	3.84
E690-2	4.29
E690-3	4.86
E690-4	5.45
E690-5	5.91

Posteriormente todas estas probetas fueron ensayadas con velocidad de desplazamiento del punzón constante e igual a 0.01 mm/seg y las curvas obtenidas son las que se observan en la figura 8 y en la figura 9.

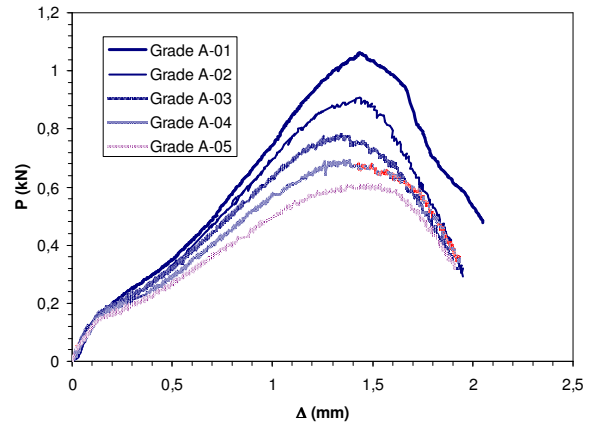


Figura 8. Curvas SP, probetas entalladas, Grade A

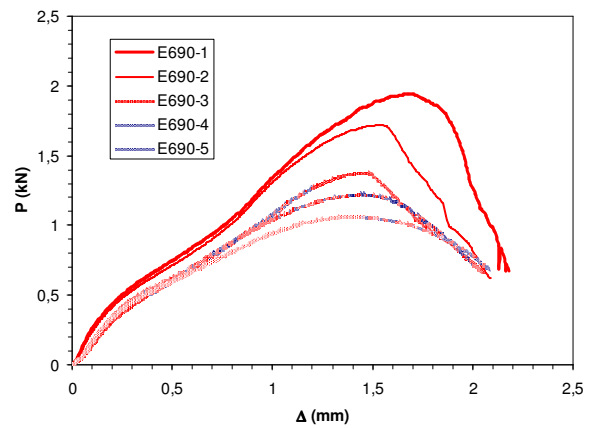


Figura 9. Curvas SP, probetas entalladas, E690

Partiendo de las curvas experimentales de la figura 8 y de la figura 9, es posible aproximar las curvas $a=cte$ de acuerdo con la metodología previamente propuesta. De esta forma, para cada uno de los dos materiales se ha tomado como ensayo de referencia para la obtención de la curva $J-\Delta a$ aquél con una longitud inicial de fisura menor, mientras que el resto han sido empleados para la determinación de las curvas $a=cte$ (figuras 10 y 11)

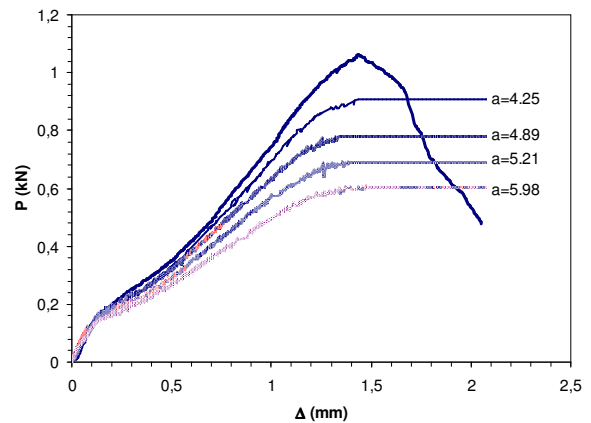


Figura 10. Curvas SP $a=cte$, Grade A

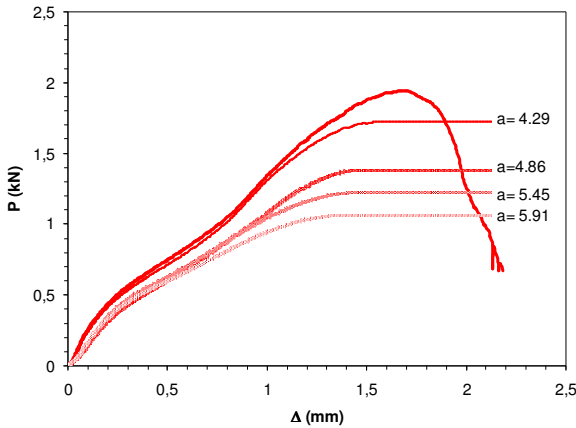


Figura 11. Curvas SP a=cte, E690

Determinando en cada caso el área contenida bajo las curvas a=cte, de modo análogo a lo reflejado por la figura 4, se obtiene la energía asociada a cada crecimiento de grieta. Estos valores han sido expresados en términos de J según la expresión (2).

$$J = \frac{C \cdot U}{B \cdot b} \quad (2)$$

donde el coeficiente C (3), ha sido ajustado experimentalmente y engloba al factor η y al porcentaje de energía consumido en deformar otras zonas de la probeta no asociadas al crecimiento de grieta, por lo que resulta función, además de del tamaño de fisura, de la tensión de flujo del material, que puede definirse como la media entre el límite elástico y la tensión de rotura.

$$C = 0.12 + \frac{58 \cdot (a - 3.0)}{\sigma_Y} \quad (3)$$

En (3), σ_Y representa la tensión de flujo, en MPa, mientras que el término (a-3.0) representa la longitud efectiva de fisura en mm (resultante de restar a longitud total de fisura aquél tramo que permanece amordazado entre las matrices del utillaje empleado).

Por otro lado, el valor de J de iniciación, de modo análogo al resto, puede ser obtenido estimando el área contenida bajo la curva de ensayo hasta el punto identificado precisamente con la iniciación (figura 5) y aplicando de nuevo la relación (2). Por analogía con los estándares convencionales [15] a este valor se le hizo corresponder un crecimiento de grieta de 0.2 mm.

Las tablas 4 y 5 resumen los resultados obtenidos para cada material y valor de crecimiento de entalla contemplado, mientras que en la figura 12 y figura 13 se han representado las curvas J- Δa calculadas según el procedimiento convencional y según la metodología desarrollada en este trabajo, quedando de manifiesto el buen comportamiento de la aproximación propuesta. En la representación se ha prescindido en ambos casos del

valor correspondiente al crecimiento más alto de fisura, ya que, debido a los efectos de borde, los resultados obtenidos no pueden considerarse significativos. Por ello, en futuros trabajos, se recomienda limitar la longitud inicial de fisura a valores por debajo de 5.5 mm.

Tabla 4. Resultados J, Grade A

Δa (mm)	J (KN/m)
0.20	159.0
0.37	219.7
1.01	362.1
1.33	446.8
2.10	953.1

Tabla 5. Resultados J, E690

Δa (mm)	J (KN/m)
0.20	244.1
0.50	329.5
1.00	501.0
1.50	664.4
2.00	960.8

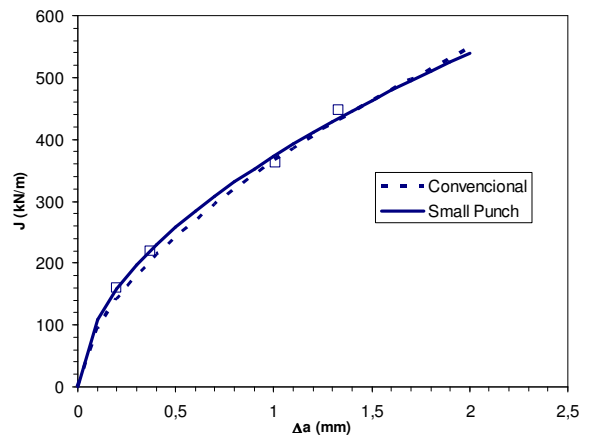


Figura 12. Curvas J- Δa , Grade A

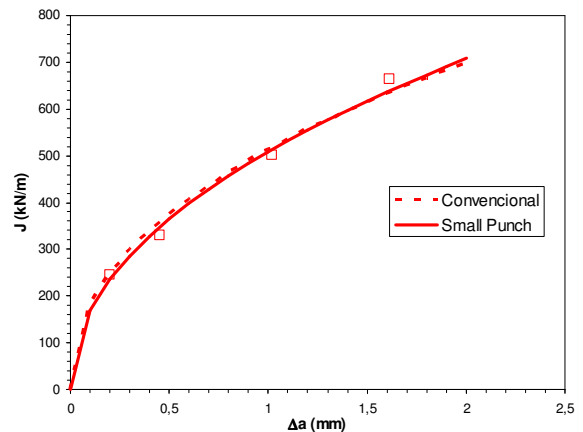


Figura 13. Curvas J- Δa , E690

6. CONCLUSIONES

En este trabajo una nueva metodología para la determinación de la tenacidad a fractura en condiciones dúctiles mediante el ensayo SP ha sido desarrollada. Dicha aproximación, análoga a la técnica multi-probeta recogida en las normas convencionales para la determinación de la tenacidad [15], se basa en la realización de ensayos SP sobre probetas con una entalla lateral mecanizada mediante electroerosión. Realizando ensayos sobre probetas con distintas longitudes de entalla es posible determinar la energía asociada a distintos crecimientos del defecto y de esa manera definir la curva J-Aa del material.

Este procedimiento ha sido validado mediante la caracterización de dos aceros, un acero naval Grade A y un acero estructural E690, habiéndose obtenido resultados plenamente consistentes con aquéllos derivados de ensayos de tenacidad convencionales.

La metodología propuesta, además de superar los inconvenientes de las aproximaciones existentes para la estimación de la tenacidad a través de ensayos de tipo SP, conserva la esencia y simplicidad del ensayo sin entalla y solventa una de las principales carencias del ensayo SP convencional como era la dificultad para caracterizar determinadas orientaciones del material, en particular las de mayor capacidad resistente [11].

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer al MEC la financiación al proyecto MAT-2004-06992-C02-02: "Estudio y validación del ensayo Small Punch para la obtención de las propiedades de fractura de materiales metálicos", de cuyos resultados se deriva este artículo.

REFERENCIAS

- [1] J.S.Ha, E. Fleury, "Small Punch test to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I Mechanical Strength", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol 75, 1998, pp. 699-706.
- [2] M. Eskner, R. Sandstrom, "Mechanical property using the small punch test", *Journal of Testing and Evaluation*, vol 32, N° 4, January 1995, pp. 282-289.
- [3] M.L. Saucedo-Muñoz, T. Matsushita, T. Hashida, T. Shoji, H. Takahasi, "Development of a Multiple Linear Regression Model to Estimate the Ductile-Brittle Transition Temperatura of Ferritic Low-Alloy Steels Based on the Relationship Between Small Punch and Charpy V-Notch Tests", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 28, No. 5, September 2000, pp. 352-358.
- [4] M-C.Kim, Y.J.Oh, B.S.Lee, "Evaluation of ductile-brittle transition temperature before and after neutron irradiation for RPV steels using Small Punch tests" *Nuclear Engineering and Design* 235, 2005, pp. 1799-1805.
- [5] D. Finarelli, M. Roedig, F. Carsughi, "Small Punch Tests on Austenitic and Martensitic Steels Irradiated in a Spallation Environment with 530 MeV Protons", *Journal of Nuclear Materials* 328, 2004, pp. 146-150.
- [6] J.R. Foulds, R. Viswanathan, "Small Punch testing for Determining the Material Toughness of Low Alloy Steel Components in Service", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1994, pp. 457-464.
- [7] 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.
- [8] J.H. Bulloch, "Toughness Losses in Low Alloy Steels at High Temperatures: An Appraisal of Certain Factors Concerning the Small Punch Test", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 75, 1998, pp. 791-804.
- [9] M. Abendroth, M. Kuna, "Identification of Ductile Damage and Fracture Parameters from the Small Punch Test using Neural Networks", *Engineering Fracture Mechanics* 73, 2006, pp. 710-725.
- [10] Y-S. Chang, J-M. Kim, J-B. Choi, Y-J. Kim, M-C. Kim, B-S. Lee, "Derivation of Ductile Fracture Resistance by Use of Small Punch Specimens", *Engineering Fracture Mechanics*, Article in Press.
- [11] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, "Análisis de Aspectos Fundamentales para la Interpretación de los Resultados del Ensayo Small Punch", *Anales de Mecánica de la Fractura* 24, 2007, pp. 515-520.
- [12] M.A. Contreras, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Betegón, "Uso del Ensayo Miniatura de Punzonado en la Evaluación de la Transición Dúctil-Frágil de Aceros Estructurales", *Anales de Mecánica de la Fractura* 24, 2007, pp. 521-526.
- [13] J.S.Ha, E. Fleury, "Small Punch test to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: II Fracture Toughness", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol 75, 1998, pp. 707-713.
- [14] J-B. Ju, J-I. Jang, D. Kwon, "Evaluation of Fracture Toughness by Small-Punch Testing Techniques using Sharp Notched Specimens", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 80, 2003, pp. 221-228.
- [15] ESIS P2-92, "ESIS Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials", European Structural Integrity Society, ESIS, 1992.
- [16] O.Akourri, M.Louah, A. Kifani, G. Gilgert, G. Pluvinage, "The Effect of Notch Radius on Fracture Toughness J_{Ic} ", *Engineering Fracture Mechanics* 65, 2000, p. 491-505.
- [17] ASTM E399-97, "Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.