

Anales de Mecánica de la Fractura

TEXTO DE LAS COMUNICACIONES PRESENTADAS EN EL
**XXXV ENCUENTRO DEL
GRUPO ESPAÑOL DE FRACTURA**

Número 35

Málaga

14, 15 y 16 de marzo de 2018



Anales de Mecánica de la Fractura

Texto de las comunicaciones presentadas en el
**XXXV ENCUENTRO DEL GRUPO ESPAÑOL DE
FRACTURA**

14, 15 y 16 de marzo de 2018

Málaga

©ANALES DE MECÁNICA DE LA FRACTURA
Editado por la Secretaría del Grupo Español de Fractura

“Reservados todos los derechos para todos los países. Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de la cubierta puede ser reproducida, almacenada o transmitida de ninguna forma, ni por ningún medio, sea electrónico o de cualquier otro, sin previa autorización escrita por parte de la Editorial”

I.S.S.N: 0213-3725
Fecha impresión: Marzo 2018

TECNICAS EXPERIMENTALES	464
ESTUDIO Y MEJORA DE LOS MÉTODOS DE CORRELACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DEL LÍMITE ELÁSTICO DE ACEROS EN LOS ENSAYOS MINIATURA DE PUNZONADO	
J.Calaf Chica, P.M. Bravo Díez, M. Preciado Calzada, D. Ballorca Juez	465
MEDIDA DEL DESGASTE EN UN ENSAYO DE FRETTING MEDIANTE MICROSCOPIO CONFOCAL	
G. Jordano, C. Navarro, J. Vázquez, J. Domínguez	471
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL CTOD EN EL CRECIMIENTO DE GRIETA A FATIGA A PARTIR DE LOS CAMPOS DE DESPLAZAMIENTOS	
J.M. Vasco-Olmo, F.A. Díaz, F.V. Antunes, M.N. James	477
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ZONA PLÁSTICA EN EL VÉRTICE DE GRIETA DEBIDO A LA APLICACIÓN DE UNA SOBRECARGA A PARTIR DEL ANÁLISIS DE LOS CAMPOS DE DESPLAZAMIENTOS	
J.M. Vasco-Olmo, F.A. Díaz, M.N. James	483
APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ANÁLISIS TERMOELÁSTICO DE TENSIONES PARA LA MEDIDA DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES EFECTIVO	
F.A. Díaz, J.M. Vasco Olmo	489
HARDNESS AND STIFFNESS MAP CARTOGRAPHY ON A CBN-TIN COMPOSITE	
G.Besharatloo, J. J. Roa, W. C. Oliver, A. Can, L. Llanes	495
EFFECTO DE LA INCERTIDUMBRE DE LA POSICIÓN DE LA CARGA EN LA VIDA A FATIGA EN COMPRESIÓN DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	
M. Tarifa, G. Ruiz, E. Poveda, X. X. Zhang, M. A. Vicente, D. C. González.....	500
INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL SOBRE EL AUMENTO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE PASTAS Y MORTEROS DE CEMENTO CON NANOSÍLICE EN PRESENCIA DE UN POLICARBOXILATO	
Bazán, Ángela; Gálvez Ruiz, Jaime C., Moragues Terrades, Amparo.....	506
EL ENSAYO SMALL PUNCH: ALCANCE DE LA FUTURA NORMA EUROPEA	
R. Lacalle, D. Andrés, J. A. Álvarez.....	512
ANÁLISIS DE LA FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DE UN ACERO CRMOV MEDIANTE DISTINTAS METODOLOGÍAS DE ENSAYO	
I. Díaz, L.B. Peral, G. Álvarez, B.Arroyo, C. Rodríguez.....	518
OPTIMIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL ANÁLISIS DE LA FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DE ACEROS MEDIANTE EL USO DE ENSAYOS SMALL PUNCH	
G. Álvarez, A. Zafra, T.E. García, F.J. Belzunze, C. Rodríguez	524
COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE CERO	
A. de la Rosa, M. Marques, G. Ruiz, E. Poveda.....	530
ANÁLISIS COMPARATIVO DEL FENÓMENO DE CAVITACIÓN ENTRE CREEP UNIAXIAL Y SPT-CREEP EN ALEACIONES DE Mg-Al INYECTADAS A ALTA PRESIÓN	
M. Preciado, J. Calaf, P. M. Bravo, D. Ballorca.....	535
EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE SOLICITACIÓN Y DEL CONTENIDO DE FIBRA EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE FISURA EN HORMIGONES AUTO-COMPACTANTES REFORZADOS CON FIBRAS DE ACERO	
X. X. Zhang, G. Ruiz, K. M. Pan, M. Tarifa	541
OPTIMIZACIÓN DEL MÉTODO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC) PARA MEDIDAS DE CRECIMIENTO DE GRIETA EN PROBETAS ESTÁNDAR Y COMPARACIÓN CON EL MÉTODO	
Sánchez, Mario; Calvo, Susana; Canales, Margarita; Landaberea, Aitor	545
EL ÁNGULO CRÍTICO DE ENTALLAS EN FORMA DE V EN LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS	
A. Macías, V. Mantič1, A. Sabora, L. Távara, F. París.....	551

EL ENSAYO SMALL PUNCH: ALCANCE DE LA FUTURA NORMA EUROPEA

R. Lacalle^{1,2*}, D. Andrés², J. A. Álvarez²

¹Inesco Ingenieros S.L, Av/ Los Castros 44, 39005, Santander, España

²LADICIM, Universidad de Cantabria, Av/ Los Castros 44, 39005, Santander, España

* Persona de contacto: lacaller@unican.es

RESUMEN

Tras más de 30 años de desarrollo, el ensayo *Small punch* ha alcanzado importantes cotas de popularidad. Las reducidas dimensiones de las probetas empleadas junto con la sencillez en su ejecución y el gran volumen de información que puede obtenerse hacen del ensayo *Small punch* una de las técnicas alternativas de caracterización mecánica con mayor potencial en la actualidad. No obstante, para una completa aceptación del ensayo por parte de la industria, la edición de un documento con rango normativo es requisito indispensable. Con este objetivo, en 2016, se puso en marcha el grupo de trabajo ECISS TC 101-WP1, que recogiendo el testigo del código de buenas prácticas CWA 15627:2007, pretende culminar el proceso de desarrollo de una norma europea EN sobre el ensayo *Small punch*. En este trabajo se realiza un repaso de los aspectos más destacados que cubrirá esta futura norma.

PALABRAS CLAVE: *Small Punch*, Norma Europea, Propiedades Mecánicas

ABSTRACT

After more than 30 years of development, the Small punch has become a very popular test. The reduced dimensions of the test specimens, its simplicity and the high amount of information obtained from it, make the Small punch test one of the most promising alternative test techniques for mechanical characterization of metals. However, in order to be fully accepted by the industry, the development of a standard is an essential requirement. To continue with the work previously done in the European Code of Practice CWA 15627:2007, the working group ECISS TC 101-WP1 was setup in 2016. The objective of this group is the development of an EN standard on Small punch test for the characterization of metallic materials. In this paper the most important issues that will be covered by this standard are reviewed.

KEYWORDS: Small Punch, European Standard, Mechanical Properties

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo *Small punch*, que consiste en un punzonado de una probeta plana de pequeñas dimensiones hasta su rotura, fue ideado en 1981 [1]. En sus orígenes el ensayo se concibió como un mecanismo simple para valorar la fragilización por irradiación de materiales en la industria nuclear. Desde entonces, el ensayo *Small punch* no ha dejado de evolucionar, existiendo metodologías que permiten estimar a partir de los resultados de este ensayo las propiedades de tracción [2-7], la tenacidad a fractura [8-14], el comportamiento en fluencia [15-19] o la respuesta del material frente a procesos de degradación ambiental [20, 21].

La naturaleza de ensayo miniatura del *Small punch* ofrece interesantes posibilidades como son la reutilización de muestras ya ensayadas mediante pruebas convencionales (ej. mitades de ensayos Charpy), la caracterización local de un componente (ej. zonas de uniones soldadas o

recubrimientos) o la determinación de las propiedades de componentes en servicio entre otras.

Por otro lado, la simplicidad del ensayo junto con sus múltiples ventajas ha hecho que el interés por el *Small punch* crezca de forma exponencial en los últimos tiempos. Prueba de ello son los cerca de 100 trabajos anuales añadidos a la base de datos de *Scopus* [22] con los términos *Small punch* en su título o *abstract*. En el mismo sentido, cabe reseñar la existencia de una conferencia internacional monotemática que se viene celebrando regularmente cada dos años desde 2010, estando programada la próxima edición para julio de 2018 en Swansea [23].

Con la madurez alcanzada por el *Small punch*, la edición de un documento con rango normativo es el último requisito para la aceptación y adopción de este método de ensayo por parte del sector industrial. En esa dirección, el código de buenas prácticas CWA 15627:2007 [24]

sentó las bases de lo que en unos meses será la futura norma europea que, bajo la redacción del grupo de trabajo ECISS TC 101-WP1, está previsto que vea la luz en 2019. En este trabajo se avanzan algunos de los aspectos más destacados que incluirá la futura norma, si bien hay que advertir que al no haberse culminado todavía el proceso de estandarización algunos de los puntos comentados pueden ser todavía objeto de modificación.

2. ESTRUCTURA Y ALCANCE DE LA NORMA

Bajo el título “*Metallic materials-Small punch test method*”, la futura norma europea dará cobertura al ensayo *Small punch* realizado tanto en condiciones de desplazamiento a velocidad constante -habitualmente empleado para la obtención de propiedades de tracción y fractura y designado por la norma simplemente como *Small punch test*- como en condiciones de carga constante -empleado normalmente para la estimación de las propiedades de fluencia y al que la norma se refiere como *Small punch creep test*-. La norma dispondrá de un cuerpo principal con los siguientes capítulos:

- *Introduction.*
- *Scope.*
- *Normative references.*
- *Terms and definitions.*
- *Symbols and designations.*
- *Test piece.*
- *Apparatus.*
- *Small punch test.*
- *Small punch creep test.*

Adicionalmente se incluirán los siguientes anexos, todos ellos con rango informativo:

- *Determining compliance of a small punch test rig for displacement measurements.*
- *Procedure for temperature control and measurement during small punch testing.*
- *Estimation of ultimate tensile strength R_m from small punch testing.*
- *Estimation of yield strength $R_{p0.2}$ from small punch testing.*
- *Estimation of DBTT.*
- *Fracture toughness from small punch testing.*
- *Creep.*
- *Post-test examination of test piece.*
- *Machine readable formats.*

Como puede observarse, en la parte normativa del documento figuran todas las instrucciones referentes a procedimientos de ensayo, utillajes o probetas, mientras que los anexos recogen, como aspectos más destacados, metodologías para la estimación de las propiedades de tracción, fractura o *creep*.

3. PROBETAS Y DISPOSITIVO DE ENSAYO

La norma propone el empleo de probetas de ensayo circulares con un radio de 8 mm y un espesor de referencia de 0,5 mm. Se permite el uso de otros tipos de probeta siempre que la zona de proceso sea idéntica y que se garantice el correcto empotramiento de la probeta. Esta cláusula permite el empleo de probetas cuadradas de 10x10 mm, particularmente prácticas si las muestras se obtienen a partir de mitades de probetas Charpy. Adicionalmente, se contempla también como alternativa el uso de probetas circulares de 3 mm de diámetro y 0.25 mm de espesor (mismas dimensiones que las utilizadas en microscopía TEM).

En cuanto al dispositivo de ensayo, éste queda conformado fundamentalmente por dos matrices y un punzón (figura 1). La matriz inferior presenta un agujero de 4 mm y acuerdos achaflanados a 45°. El punzón, de cabeza semiesférica de 2,5 mm de diámetro puede estar constituido por una única pieza o por la combinación de punzón más bola. La ventaja de la primera configuración radica en una mayor fiabilidad del centrado de la aplicación de carga sobre la probeta, mientras que la segunda posibilidad aporta una mayor versatilidad, ya que permite una fácil sustitución de la bola en caso de encontrarse dañada o haber arrastrado material (situación habitual en ensayos *Small punch creep test*).

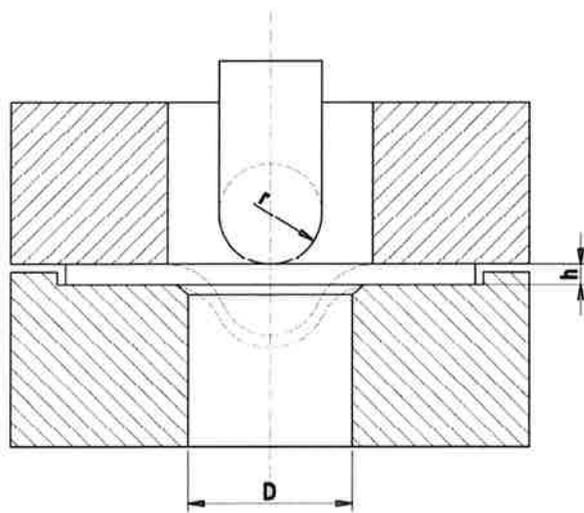


Figura 1. Dispositivo de ensayo. Para la probeta estándar, $h_0=0,5$ mm, $r=1,25$ mm y $D=4$ mm.

4. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En primer lugar, es conveniente aclarar que la norma contempla 3 parámetros asociados a movimientos o desplazamientos (figura 2). Estos parámetros son:

- u , deflexión de la probeta en el punto central de su cara inferior. Puede ser directamente medido

a través de un dispositivo de contacto tipo LVDT.

- w , desplazamiento del cabezal de la máquina de ensayo y que por lo tanto se corresponde con el valor registrado directamente por ésta.
- v , desplazamiento de la punta del punzón. En la práctica se determina restando de w el desplazamiento asociado a la flexibilidad del útil.

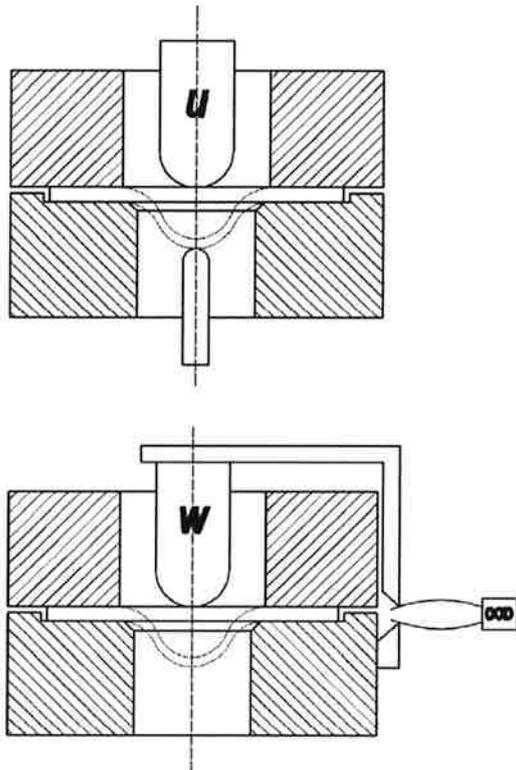


Figura 2. Esquema de medida de desplazamientos en ensayo Small punch. El desplazamiento del punzón “v” se determina restando de “w” la flexibilidad del punzón y/o utillaje correspondiente.

Aunque u es una medida más directa de la deformación de la probeta, es admisible expresar alternativamente los resultados obtenidos en los ensayos en términos de v , lo que resulta práctico en situaciones en las que es complicado disponer un LVDT dentro del útil de ensayo (ej. ensayos a altas o bajas temperaturas, ensayos en ambiente).

4.1 Small punch test

El resultado directo del ensayo realizado a velocidad de desplazamiento constante \dot{w} , es la curva $F(u)$ o alternativamente la curva $F(v)$, figura 3. A partir de esta curva pueden determinarse los siguientes parámetros característicos:

- F_e , fuerza que marca el tránsito entre condiciones elásticas y plásticas. Se calcula

como la fuerza correspondiente al cambio de pendiente en un ajuste bilineal (figura 4) en el tramo inicial de la curva (en caso de emplear la curva $F(v)$ debe usarse un ajuste trilineal).

- F_m , fuerza máxima registrada en el ensayo.
- F_i , fuerza que marca el inicio de la inestabilidad plástica. En la práctica se corresponde con un valor de deflexión, u , de 0,552 o de desplazamiento, v , de 0.645 [5] para probeta estándar de $h_0=0,5$ mm
- u_e, u_i, u_m (o alternativamente v_e, v_i, v_m), valores de deflexión asociados a las fuerzas F_e, F_i y F_m respectivamente.
- E_{SP} , energía absorbida por la probeta de ensayo, computada como el área bajo la curva de ensayo hasta el valor de F_m .

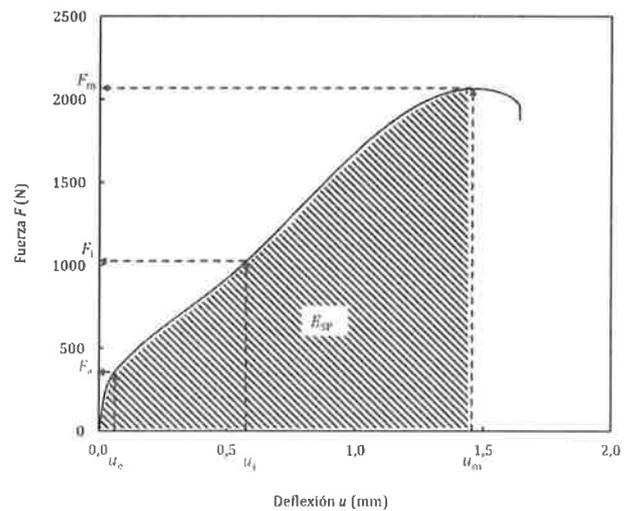


Figura 3. Curva $F(u)$ obtenida en un ensayo tipo Small punch test.

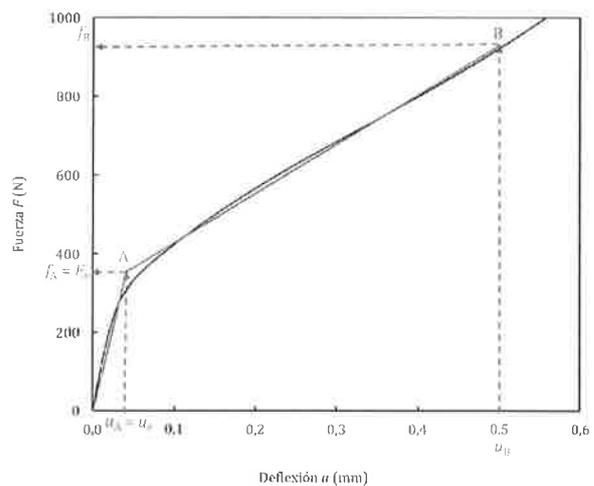


Figura 4. Determinación de F_e a partir de ajuste bilineal en el comienzo de la curva $F(u)$.

4.2 Small punch creep test

Para la estimación de las propiedades de fluencia se recurre a la modalidad de ensayo *Small punch* realizado en condiciones de Fuerza F constante. En el transcurso del ensayo se registra el valor de la deflexión u acumulada (se permite también el empleo del valor de desplazamiento de punzón, v) frente al tiempo (figura 5). A partir de estos registros, pueden determinarse los siguientes parámetros relevantes:

- t_r , tiempo hasta rotura.
- \dot{u}_{min} (o alternativamente \dot{v}_{min}), mínima velocidad de deflexión registrada en el ensayo.
- u_{min} (o alternativamente, v_{min}), deflexión correspondiente a la mínima velocidad de deflexión registrada en el ensayo, \dot{u}_{min} .

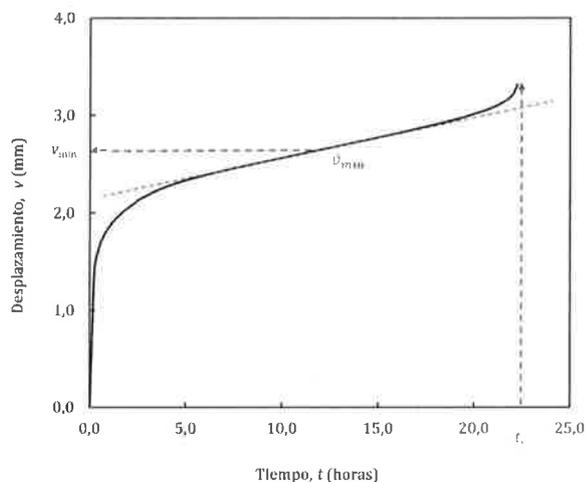


Figura 5. Curva $v(t)$ en un ensayo tipo *Small punch creep test*.

5. ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

A continuación, se enuncian algunas de las principales características de las metodologías propuestas para vincular los datos de los ensayos *Small punch* y *Small punch creep* con las propiedades mecánicas de los materiales.

5.1 Límite elástico

Se propone la estimación del límite elástico, $R_{p0.2}$, ligando este valor al de la Fuerza F_e que marca el tránsito entre condiciones elásticas y plásticas mediante el empleo de la expresión (1), donde h_0 es el espesor inicial de la probeta y $\beta_{Rp0.2}$ el coeficiente de ajuste. La norma incluye valores para este coeficiente de ajuste $\beta_{Rp0.2}$.

$$R_{p0.2} = \beta_{Rp0.2} \frac{F_e}{h_0^2} \quad (1)$$

5.2 Resistencia a tracción

Para el caso de la resistencia a tracción, se propone una expresión análoga a la empleada para el límite elástico. En esta ocasión se correlaciona el valor de Fuerza correspondiente al inicio de la inestabilidad plástica, F_i , con la resistencia a tracción, R_m (2) [7]. La norma también incluye valores para el coeficiente de ajuste β_{Rm} .

$$R_m = \beta_{Rm} \frac{F_i}{h_0^2} \quad (2)$$

5.3 Temperatura de transición dúctil-frágil

La temperatura de transición dúctil-frágil también puede ser calculada mediante la realización de ensayos *Small punch* a diferentes temperaturas, computando para cada uno de ellos el valor de E_{sp} . En general, debido a las diferentes condiciones de carga y triaxialidad, la temperatura de transición obtenida mediante ensayos *Small punch*, T_{sp} , es significativamente más baja que la determinada mediante ensayos Charpy, T_{CVN} . En la futura norma europea se propondrá relacionar ambos valores, expresados en temperaturas absolutas, mediante la ecuación (3).

$$T_{SP} = \alpha \cdot T_{CVN} \quad (3)$$

5.4 Tenacidad a fractura

Las importantes diferencias en términos de espesor de probeta, triaxialidad o modo de carga entre los ensayos convencionales de tenacidad a fractura [25] y los ensayos *Small punch* hacen compleja la tarea de desarrollar una metodología para la estimación de las propiedades de fractura. En este sentido, las propuestas recogidas por la norma deben entenderse más como aproximaciones de corte semi-cuantitativo, pero que en cualquier caso constituyen una alternativa valiosa a los ensayos convencionales en situaciones en las que resulta imposible conseguir muestras estándar. Conviene señalar, en cualquier caso, que la fiabilidad o incertidumbre en las predicciones sobre la tenacidad realizadas mediante ensayos *Small punch* son del orden de magnitud de las conseguidas mediante ensayos Charpy, éstas sí ampliamente aceptadas por los códigos de integridad estructural en uso.

La futura norma europea incorpora tres metodologías para la estimación de la tenacidad a fractura. La primera de ellas consiste primero en correlacionar las temperaturas de transición *Small punch* y Charpy mediante expresiones del tipo (3) para posteriormente emplear correlaciones existentes en la literatura [10] entre la temperatura de transición dúctil-frágil Charpy y la tenacidad a fractura K_{Ic} .

La segunda de las propuestas estima la tenacidad en términos de J_{Ic} , empleado la deformación equivalente en fractura, ε_f mediante expresiones del tipo (4).

$$J_{Ic} = k \cdot \varepsilon_f - J_0 \quad (4)$$

En (4), k y J_0 son los parámetros de ajuste de la ley, mientras que ε_f puede determinarse a partir de la relación entre el espesor inicial de la probeta, h_0 , y el espesor en fractura, h_f , mediante la relación (5). El anexo H de la norma (*Post-test examination of test piece*) ofrece información para la correcta determinación del espesor en fractura, h_f .

$$\varepsilon_f = \ln \left(\frac{h_0}{h_f} \right) \quad (5)$$

La última de las metodologías incluidas para la estimación de la tenacidad a fractura, emplea probetas con una entalla lateral (figura 6). La existencia de esta entalla permite la caracterización de cualquier orientación del material, y al tiempo facilita la aplicación de los principios de la mecánica de fractura, que requieren de algún tipo de defecto preexistente. El procedimiento para la estimación de la tenacidad con este tipo de probetas se basa en la determinación de la apertura de entalla en el momento en que se inicia una grieta. Este valor puede identificarse con el valor de δ o CTOD crítico del material [13].

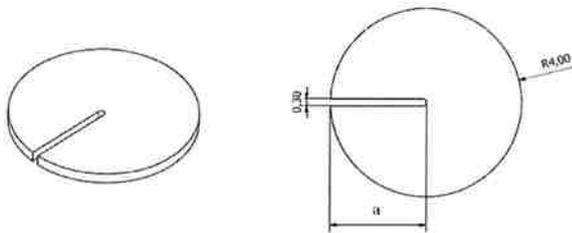


Figura 6. Propuesta de probeta Small punch entallada para la estimación de la tenacidad a fractura.

5.5 Creep

Para que los resultados de un ensayo *Small punch creep test* puedan ser interpretados en los mismos términos que un ensayo convencional de fluencia uniaxial es fundamental disponer de la relación que liga la fuerza aplicada en el ensayo *Small punch creep*, F , con su valor de tensión equivalente en ensayo uniaxial, σ . Como aspecto más destacado de la futura norma europea, cabe resaltar la propuesta de una novedosa formulación para establecer la relación entre F y σ a partir del valor del desplazamiento u registrado cuando el valor de velocidad de desplazamiento, \dot{u} es mínimo. Esta formulación no depende del material y tampoco precisa de ensayos

uniaxiales para su calibración, lo que constituye una notable ventaja frente a otros métodos.

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el estado de desarrollo en que se encuentra actualmente la futura norma europea *Metallic materials-Small punch test method* elaborada por el grupo de trabajo ECISS TC 101/WG 1 del Comité Europeo de Normalización (CEN). Se espera que el documento final esté disponible en 2019.

La norma incluirá en un único documento tanto los procedimientos para la realización del ensayo a velocidad de desplazamiento constante como a fuerza constante. El primero de los casos suele emplearse para la estimación de las propiedades de tracción y/o fractura mientras que el segundo se emplea para la caracterización del comportamiento en condiciones de *creep*. La propia norma incluye anexos informativos con metodologías y formulaciones para correlacionar los resultados del ensayo con las propiedades mecánicas referidas.

Cabe resaltar por último, que, con la futura norma europea, el *Small punch* se convertirá en el método de ensayo estandarizado que mayor número de propiedades mecánicas permite estimar. Este hecho unido al resto de conocidas ventajas del ensayo (carácter cuasi-no destructivo, simplicidad, poca dosis en materiales irradiados, etc.) augura un prometedor futuro a esta técnica de caracterización de materiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todas las instituciones europeas directamente implicadas en la redacción de la norma: Academy of Sciences (República Checa), Bay Zoltan Nonprofit Ltd. (Hungria), CIEMAT (España), European Commission – JRC (Países Bajos), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (Alemania), Inesco Ingenieros (España), Material & Metallurgical Research, Ltd. (República Checa), UJV (República Checa), UKAEA (Reino Unido), Universidad de Cantabria (España), Swansea University (Reino Unido) y VUJE (Eslovaquia). Desean manifestar también su agradecimiento a la Comisión de Normalización de los Países Bajos (NEN), que es la entidad que ostenta la secretaría del grupo de trabajo y al Dr. Matthias Bruchhausen (JRC) por la coordinación técnica.

REFERENCIAS

- [1] Manahan, M.P., Argon, A.S., Harling, O.K., "The Development of a Miniaturized Disk Bend Test for the Determination of Postirradiation Mechanical Properties", *Journal of Nuclear Materials* 103-104 (1981), pp. 1545-1550.

- [2] Kumar K., Pooleery A., Madhusoodanan K., Singh R.N., Chakravarty J.K., Shrivastaw R.S., Dutta B.K., Sinha R.K., "Evaluation of ultimate tensile strength using Miniature Disk Bend Test", *J. Nucl. Mater.* (461), pp. 100–111, 2015.
- [3] García T.E., Rodríguez C., Belzunce F.J., Suárez C., "Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test", *J. Alloys Compd.* 582, pp. 708–717, 2014.
- [4] Hurst R., Matocha K., "Where are we now with the European Code of Practice for Small Punch Testing?", *The 2nd International Conference SSTT 2012, Conference Proceedings, October 2012.*
- [5] Altstadt E., Simonovski I., Bruchhausen M., Holmström S., Lacalle R., "On the estimation of ultimate tensile stress from small punch testing", *Int. J. Mech. Sci.*, in press.
- [6] Mao X., Takahashi H., "Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for TEM disk (diameter 3 mm) small punch tests". *J. Nucl. Mater.*, 150(1), pp. 42-52, 1987.
- [7] Isselin J., Shoji T., "Yield Strength Evaluation by Small Punch Test", *Journal of Testing and Evaluation* 37 (6), pp. 531-537, 2009.
- [8] Foulds J.R., Woytowicz P.J., Parnell T.K., Jewett C.W., "Fracture Toughness by Small Punch Testing", *J. Test. Eval.* 23 (1), pp. 3-10, 1995.
- [9] Abendroth M., Kuna M., "Identification of Ductile Damage and Fracture Parameters from the Small Punch Test using Neural Networks", *Eng. Fract. Mech.* 73, pp. 710-725, 2006
- [10] Shekhter A., Croker A.B.L., Hellier A.K., Moss C.J., Ringer S.P., Towards the Correlation of "Fracture Toughness in an Ex-Service Power Generation Rotor", *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 77, pp.113-116, 2000.
- [11] Wang Z-X., Shi H-J., Jian L., Shi P., Ma X-F., "Small Punch Testing for Assessing the Fracture Properties of the Reactor Vessel Steel with Different Thicknesses", *Nucl. Eng. Des.* 238 (12), pp. 3186-3193, 2008.
- [12] Budzakoska E., Carr D.G., Stathers P.A., Li H., Harrison R.P., Hellier A.K., Yeung W.Y., "Predicting the J Integral Fracture Toughness of Al 6061 using the Small Punch Test", *Fatigue. Fract. Eng. Mater. Struct.* 30, pp. 796-807, 2007.
- [13] Lacalle R., Álvarez J.A., Arroyo B., Gutiérrez-Solana F., "Methodology for fracture toughness estimation based on the use of Small punch notched specimens and the CTOD concept", *The 2nd International Conference SSTT 2012, Conference Proceedings, October 2012.*
- [14] Alegre J.M., Lacalle R., Cuesta I.I., Álvarez J.A., "Different methodologies to obtain the fracture properties of metallic materials using pre-notched small punch test specimens", *Theor. Appl. Fract. Mec.* 86, pp. 11-18, 2016.
- [15] Yang Z., Wang Z., "Relationship between strain and central deflection in small punch creep specimens", *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 80, pp. 397-404, 2003.
- [16] Blagoeva D., Ph.D thesis, "Development of a Residual Lifetime Prediction Methodology for Creep and Fracture Behaviour of Ferritic-Martensitic Steels using Small Punch Testing Technique", *Universita di Pisa*, 2009.
- [17] Dobeš F., Milička K., "Application of creep small punch testing in assessment of creep lifetime", *Mat. Sci. Eng. A* 510–511 pp.440–443, 2009
- [18] Andrés, D., Lacalle, R., Álvarez, J.A., "Creep property evaluation of light alloys by means of the Small Punch test: Creep master curves", *Materials and Design* 96 (2016) 122–130.
- [19] Andrés, D., Lorenzo, M., Lacalle, R., Álvarez, J.A., Alegre, J.M., "Application of the Small Punch Creep test to predict times to rupture on magnesium alloys", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 86 (2016) 45–50.
- [20] Arroyo, B., Álvarez, J.A., Lacalle, R., "Study of the energy for embrittlement damage initiation by SPT means. Estimation of K_{EAC} in aggressive environments and rate considerations", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 86, 2016.
- [21] Arroyo, B., Álvarez, J.A., Lacalle, R., Uribe, C., García, T.E., Rodríguez, C., "Analysis of key factors of hydrogen environmental assisted cracking evaluation by small punch test on medium and high strength steels", *Materials Science & Engineering A* 691 (2017) 180–194.
- [22] Bruchhausen, M., Austin, T., Holmstrom, S., Altstadt, E., Dymacek, P., Jeffs, S., Lancaster, R., Lacalle, R., Matocha, K., Petzova, J., "European Standard on Small Punch Testing of Metallic Materials", *PVP2017-65396, ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2017.*
- [23] SSTT 2018, 5 th International Small Sample Test Techniques (SSTT) Conference 2018, 10-12 July, Swansea University, Bay Campus, Wales, UK.
- [24] CWA 15627:2007, "Small Punch Test Method for Metallic Materials", *European Committee for Standardization*, 2007.
- [25] ASTM E 1820-17, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", *Annual Book of ASTM Standards*, 2017.