

ENSAYO MINIATURA DE PUNZONAMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE METALES: UNA REVISIÓN DE LITERATURA

Erik López Vargas

Instituto Tecnológico de Celaya
erik_lv@hotmail.com

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Instituto Tecnológico de Celaya
Alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Agustín Vidal Lesso

Instituto Tecnológico de Celaya
agusvile@yahoo.com.mx

José Guadalupe Zavala Villalpando

Instituto Tecnológico de Celaya
jg.zavala@itcelaya.edu.mx

Jorge Terán Guillén

Instituto Mexicano del Transporte
jteran@imt.mx

RESUMEN

El ensayo Miniatura de Punzonamiento (EMP) o Small Punch Test (SPT), permite la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales como la resistencia última, límite elástico, módulo de Young, alargamiento en tracción, temperatura de transición dúctil-frágil y la tenacidad a la fractura, utilizando probetas de reducidas dimensiones. Esta técnica en los últimos tiempos ha alcanzado un importante desarrollo, en virtud de que es posible evaluar las propiedades de estructuras en servicio, considerándose

incluso como un método no destructivo. El presente trabajo muestra una breve reseña histórica del Small Punch. Posteriormente se describe la puesta a punto y el procedimiento de la técnica, así como los parámetros obtenidos a partir de la curva característica carga-desplazamiento tras realizar el ensayo. Finalmente se citan las principales correlaciones propuestas para la estimación de las propiedades mecánicas a partir de dichos parámetros.

Palabras clave: Small Punch, Reseña histórica, Puesta a punto, Procedimiento, Evaluación de propiedades mecánicas.

1. INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de los componentes que forman parte de una estructura, maquinaria y, en general, cualquier cuerpo cuya función principal sea la de soportar o transmitir una carga, debe resistir la tendencia a la fractura para ser útil. Desde siempre, se ha buscado analizar la capacidad que tiene un componente de cumplir con su función durante el tiempo para el cual fue diseñado, con el fin de anticiparse a fallas estructurales y evitar posibles catástrofes. Estos análisis requieren de la caracterización mecánica de los materiales que constituyen el componente a través de ensayos de laboratorio. Si esta caracterización se realiza siguiendo las técnicas convencionales como la normas ASTM E8 [1] y ASTM E399 [2] para propiedades de tracción y tenacidad a la fractura, o algunos otros procedimientos estandarizados, sería necesario contar con apreciables muestras de material para el mecanizado de probetas sobre las cuales realizar los ensayos. Este hecho imposibilita la caracterización en aquellas situaciones donde se requiere la evaluación de propiedades a escala local de los

componentes, como las uniones por soldadura o en capas de recubrimiento, y en general cualquier escenario donde no exista una limitante de material para mecanizar probetas convencionales. De este modo, desde hace varias décadas, se han venido desarrollando técnicas para la evaluación de propiedades mecánicas de materiales a través de especímenes pequeños, buscando de cierta manera, reducir la cantidad de material empleado para la fabricación de las probetas. Entre estas técnicas, ha destacado una en particular, conocida como Ensayo Miniatura de Punzonamiento (EMP) o Small Punch Test (SPT).

El SPT, consiste en el punzonamiento de una probeta plana de reducidas dimensiones (10x10x0.5mm en la mayoría de los casos), en el cual se va registrando de forma continua la fuerza ejercida por el punzón sobre la probeta y el desplazamiento experimentado por éste. Las principales características de esta técnica son su sencillez de ejecución y las probetas miniatura utilizadas, dando lugar a distintas aplicaciones que se mencionan a continuación [3]:

- Determinar las propiedades de los materiales de estructuras en servicio. La pequeña cantidad de material que requiere el Small Punch no compromete la integridad de la estructura.
- Evaluación de las propiedades de materiales utilizados en la industria nuclear. La cantidad de radiación por parte de las probetas miniatura es mucho menor en comparación con probetas convencionales.

- Reutilización de probetas convencionales. Es posible obtener probetas SPT a partir de probetas convencionales ensayadas con anterioridad, evitando así la necesidad de volver a tomar muestras del componente en estudio.
- Evaluación de las propiedades de zonas específicas de componentes. Las uniones por soldadura y las capas de recubrimientos de componentes pueden ser estudiadas a través del SPT, a diferencia de los métodos convencionales, donde el tamaño de las probetas no se presta para obtener muestras de este tipo de zonas.
- Cualquier otra situación donde no se cuente con material suficiente para la elaboración de probetas convencionales.

Aunque el Small Punch permite grandes ventajas por el tamaño de sus probetas y la sencillez de ejecución, aún carece de una estandarización. Sin embargo, debido a su gran desarrollo alcanzado hasta la fecha, la Comisión Europea de Normalización (CEN) ha intentado ir centrando el camino a través de recomendaciones sobre cómo realizar los ensayos, sin carácter normativo; es decir, no ha establecido instrucciones definitivas para obtener las propiedades mecánicas a través de esta técnica, pero sirve como guía, por ejemplo, en las dimensiones del utillaje que se debe emplear. El presente trabajo muestra el estado del arte de las correlaciones que hasta ahora han sido obtenidas para determinar las propiedades mecánicas de tracción y fractura de materiales metálicos, no sin antes presentar una breve reseña histórica y la puesta a punto de la técnica.

2. RESEÑA HISTÓRICA DEL SMALL PUNCH

En base a investigaciones realizadas por Autillo *et al.* [4], el ensayo SPT inició su desarrollo en América del Norte en 1981, gracias a los estudios del MIT en la fragilización de los materiales producida por radiación. Cuesta [5], en su tesis de doctorado, menciona que en 1983 ya se estudiaba la temperatura de transición dúctil-frágil en materiales metálicos a través de esta técnica. La motivación de buscar esta nueva alternativa se debió a que el tamaño de las probetas del ensayo Charpy [6] no era conveniente, pues lo que se buscaba era determinar el efecto de la radiación sobre esta propiedad, y el tamaño de probetas Charpy era demasiado grande como para ser sometidas a radiación. Cuesta menciona también que en 1986, algunos investigadores empezaron a estudiar el efecto de la geometría de la probeta y del utillaje empleado en los ensayos y un año más tarde, ya se trabajaba con la extracción de información de ensayos SPT para la determinación de las propiedades mecánicas, logrando obtener relaciones para determinar la tenacidad a la fractura, la resistencia a la fluencia y la tensión máxima.

Por otra parte, según Autillo *et al.* [4], fue hasta 1989 cuando el Small Punch empezó a ser practicado en el continente Asiático por parte de la Universidad de Tohoku y el Instituto de Investigación sobre Energía Atómica (JAERI), ambas en Japón. De la misma manera, los primeros trabajos reportados en Europa aparecen en 1992, y fueron realizados en Reino Unido por la universidad de Swansea y el ERA. El CESI, fue quien tomó partida en Italia.

Actualmente se ha desarrollado un código de buenas prácticas [7] a través de la Comisión Europea de Normalización (CEN) cuya visión es unificar la metodología en la ejecución de los ensayos Small Punch. Dentro de este código se realizan algunas recomendaciones, por ejemplo, en las dimensiones del utillaje y tamaño de probetas, pero sin carácter normativo.

3. PUESTA A PUNTO DE LA TÉCNICA

El ensayo consiste básicamente en el punzonamiento de una probeta plana de reducidas dimensiones (Figura 1), en el cual se va registrando de forma continua la fuerza ejercida por el punzón sobre la probeta y el desplazamiento experimentado por éste. El ensayo se realiza generalmente colocando el utillaje propio del Small Punch en casi cualquier máquina convencional de ensayos a tracción, esto debido a las cargas demandadas en la indentación de la probeta, las cuales suelen variar en base al tipo del material; así, las cargas promedio máximas registradas en la literatura rondan entre 0.4 kN [8] y 2.8kN [9] posibilitando incluso el uso de máquinas de ensayos mono-columna.

Respecto a las dimensiones y forma de las probetas, a lo largo del desarrollo del SPT han existido variantes; sin embargo la configuración más utilizada es la forma cuadrada de dimensiones 10x10x0.5mm, siendo incluso éstas las que se han recomendado en el código del CEN [7]. En la tabla 1 se muestran algunas variables de probetas utilizadas por distintos autores.

Tabla 1. Tipología y dimensiones características de las probetas empleadas por diversos autores [3].

Tipo de probeta	Diámetro/lado (mm)	Espesor (mm)
Disco	3.0	0.25
Disco	3.0	0.4-1.0
Disco	5.0	0.05-0.35
Disco	6.35	0.5
Disco	8.0	0.5
Disco	8.9	0.5
Disco	10.0	0.5
Cuadrada	10.0	0.25
Cuadrada	10.0	0.3
Cuadrada	10.0	0.5

Por otro lado, la fabricación de estas probetas miniatura, implica la utilización de técnicas que minimicen la deformación y cualquier cambio en la microestructura de la misma debido a la mínima cantidad de material utilizado para representar sus características. La técnica más común es utilizar una cortadora metalográfica de precisión para cortar placas de espesor un poco mayor al deseado, con el fin de realizar un desbaste y pulido a través de lijas como el carburo de silicio, o algún otro, hasta llegar al espesor preciso [4]. La desventaja de este método es que se requiere de un mayor tiempo de preparación debido a estos dos últimos pasos. Un método más eficiente es usando una electroerosionadora, tal como fueron obtenidas las probetas en [9,10]. La principal ventaja de utilizar esta técnica se basa en la facilidad de obtener el espesor deseado tras los ajustes previos de la máquina, ahorrando así el tiempo en realizar alguna operación adicional después del corte. Opcionalmente, en ambos métodos pueden hacerse mediciones con ayuda de un micrómetro de caras paralelas

con precisión de 0.001mm midiendo las 4 esquinas y la parte central de la probeta para corroborar la uniformidad del espesor en todo el espécimen.

El utillaje empleado en la ejecución de la técnica sigue un principio básico, el cual consiste en un par de matrices rígidas (Figura 1) unidas a través de 4 tornillos, cuya función es la de sujetar de una manera uniforme la probeta a ensayar. Dichas matrices están perforadas en la parte central para el paso del punzón, cuya función es ejercer la fuerza sobre la probeta y lograr la indentación sobre la misma. Puede observarse en la misma figura una esfera como parte independiente del punzón; esta es una variante que diversos autores han utilizado. El diámetro de la esfera corresponde a 2.4mm y el barreno de la matriz inferior es de 4mm. Sin embargo, en la actualidad algunos otros autores [14] han adoptado las recomendaciones por parte del código europeo de buena práctica, el cual establece un diámetro para la cabeza del punzón de 2.5mm y especifica un chaflán en el barreno de la matriz inferior de 0.5mm.

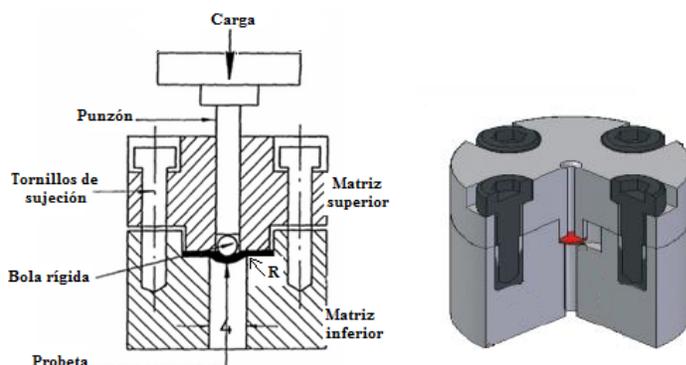


Figura 1. Esquema del utillaje de sujeción de la técnica Small Punch

El desplazamiento experimentado por el punzón se mide comúnmente a través de un extensómetro tipo COD colocado entre los cabezales de una maquina universal donde

se sostienen las matrices y el punzón (Figura 2). Esta configuración del extensómetro recoge igualmente la deformación del dispositivo de carga (bola y punzón), por lo que en la literatura [4,15] se indica que es necesario corregir las curvas obtenidas de los ensayos, ya que de no hacerlo se estaría sumando la deformación del utillaje a la deformación de la probeta. La corrección se realiza midiendo la deformación que sufre el utillaje bajo la aplicación de la carga; esta última es monitoreada utilizando la celda de carga incorporada en las maquinas universales para ensayos a tracción.

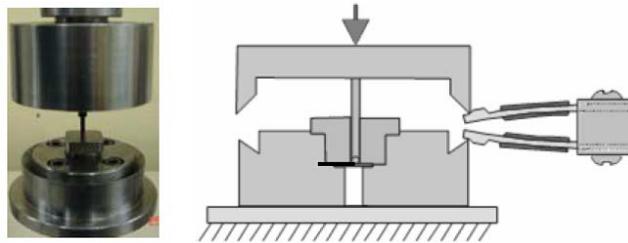


Figura 2. Configuración de extensómetro para medición de desplazamientos del punzón

Otro punto a considerar en la ejecución de los ensayos es la velocidad de desplazamiento del punzón, García *et al.* [15] mencionan la importancia de no utilizar velocidades excesivas para evitar trazar curvas inadecuadas carga-deformación. Incluso allí mismo se menciona que existen estudios de velocidad como parámetro a tomar en consideración en el desarrollo de un ensayo Small Punch. La velocidades recomendada por García *et al.* [15] corresponde a 0.5 mm/ min, similar a velocidades reportadas en trabajos más antiguos [12].

4. CURVA CARGA-DESPLAZAMIENTO

La curva carga-desplazamiento obtenida del ensayo Small Punch en un material dúctil tiene el aspecto de la Figura. 3 (izquierda), donde se pueden observar las distintas

etapas de comportamiento en la probeta durante el ensayo. A continuación se describen las zonas de acuerdo a Lacalle *et al.* [3]:

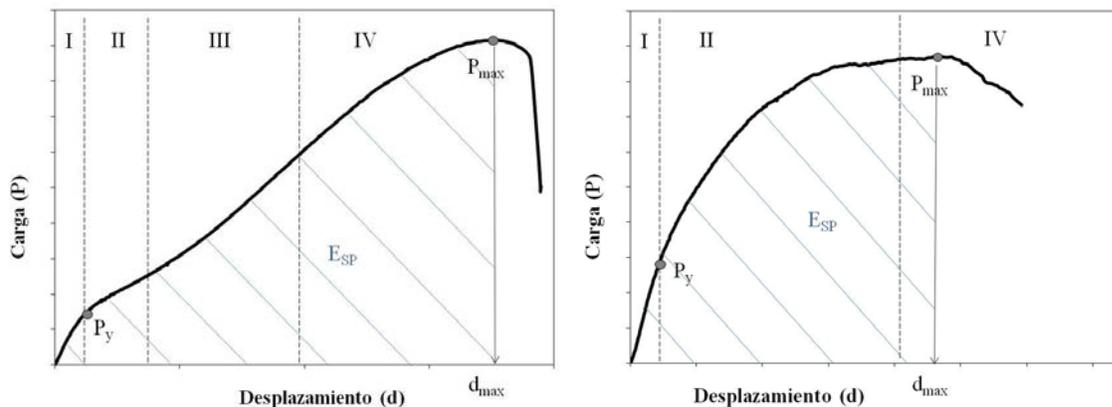


Figura 3. Curvas carga-desplazamiento características obtenida en ensayo Small Punch de un material dúctil (izquierda) y un material frágil (derecha) [3].

Zona I. Al comienzo del ensayo, la probeta sufre una deformación predominantemente elástica, acompañado por la indentación producida por la cabeza del punzón.

Zona II. El primer cambio de convexidad en la curva, se debe al inicio de plastificación del material. A esta zona se le conoce como zona de transición elastoplástica.

Zona III. Tras el segundo cambio en la convexidad de la curva, las deformaciones en la probeta se localizan en torno a un anillo (equivalente a la estricción en un ensayo uniaxial), teniendo lugar un adelgazamiento en el espesor de la probeta. Esta zona es conocida como deformación plástica generalizada.

Zona IV. El nuevo cambio en la tendencia de la curva indica el comienzo de la inestabilidad plástica y la aparición de grietas que conducen a la falla final de la probeta.

Analizando las diferentes zonas de la curva carga-desplazamiento, pueden ser obtenidos de forma casi directa una serie de parámetros:

- Pendiente del tramo inicial lineal, k .
- Carga límite de la zona elástica, P_y .
- Fuerza máxima registrada en el ensayo, P_{max} .
- Desplazamiento en el punto de fuerza máxima, d_{max} .
- Energía de fractura o área encerrada debajo de la curva hasta el punto representativo de la fuerza máxima, W .

Los valores k , P_{max} , d_{max} y W pueden ser obtenidos sin dificultad a través de la curva carga-deformación. Sin embargo el valor P_y es un parámetro que no es tan sencillo determinar. En la Figura 4 se muestran los criterios hasta ahora propuestos por diferentes autores.

Figura 4. Métodos en el cálculo de la carga P_y [16]

Rodríguez y Belzunce [16] reportaron los coeficientes de variación de cada criterio al determinar este parámetro en distintos tipos de aceros. En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de algunos de ellos.

Tabla 2. Coeficientes de variación para P_y en aceros [16]

MATERIAL	$P_{y, 0.10}$	$P_{y, 0.100}$	$P_{y, ct}$	$P_{y, CEN}$	$P_{y, inf}$
S460ZAT	0.18	0.24	0.20	0.22	0.28
API X70	0.01	0.01	0.00	0.01	0.05
AR	0.13	0.19	0.08	0.12	0.25
AR_ZAT	0.07	0.12	0.06	0.09	0.17
Asturfer	0.02	0.03	0.03	0.03	0.11
CrMoV 1	0.03	0.05	0.04	0.04	0.29
MEDIA	0.06	0.10	0.07	0.08	0.20

En el caso de materiales frágiles (Figura 3 derecha) puede notarse la ausencia de la tercera zona, esto debido a que en este tipo de materiales no hay esa transición de plasticidad generalizada como ocurre en materiales dúctiles.

5. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS

Como ya se ha mencionado anteriormente, la evaluación de las propiedades mecánicas utilizando la técnica Small Punch todavía carece de la normalización necesaria para poder obtener conclusiones de carácter general. No obstante, el especial interés en esta técnica ha llevado la creación de un código de buena práctica [7] elaborado por el CEN con objeto de mantener esta línea de investigación y dar seguimiento a esta necesidad de la estandarización. En el siguiente apartado se presentan algunas de las principales correlaciones obtenidas a la fecha para la estimar la resistencia a la fluencia σ_y , la resistencia última σ_u , el módulo de elasticidad E , el alargamiento a rotura $\%A$, la temperatura de transición dúctil-frágil TT , y la tenacidad a la fractura a partir de los parámetros obtenidos de la curva carga-desplazamiento del SPT.

5.1 Resistencia a la fluencia, σ_y

De acuerdo a [16], la bibliografía general ha admitido correlaciones del tipo:

$$\sigma_y = \alpha \frac{P_y}{t^2} \quad (1)$$

$$\sigma_y = \alpha_1 \frac{P_y}{t^2} + \alpha_2 \quad (2)$$

donde α , α_1 y α_2 son constantes empíricas. En la Figura 5, se muestra la correlación obtenida en distintos materiales evaluados, agrupados en función de su microestructura, donde puede observarse que la correlación corresponde al tipo (2). Para estimar el valor de P_y , se utilizó el criterio de $P_{y_t/10}$ descrito en el apartado 4.

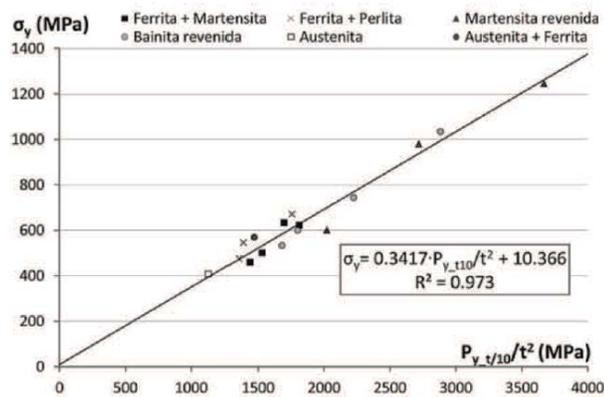


Figura 5. Correlación entre σ_y y $P_{y_t/10}/t^2$ [16]

Otra expresión (basada en la teoría de placas) es:

$$\sigma_y = \frac{3P_y(1+\nu)}{2\pi t^2} \ln \frac{\alpha}{r^j} \quad (3)$$

donde ν es el coeficiente de Poisson, α el radio del barreno de la matriz inferior del utillaje y r^j el radio de contacto entre el punzón y la probeta. Una variante de (3), es propuesta por Lacalle *et al.* [19]:

$$\sigma_y = 1.16 \frac{P_y(1+\nu)}{t^2} \quad (4)$$

donde P_y corresponde a P_{y_inf} (ver apartado 4).

5.2 Resistencia última, σ_u

De manera similar a σ_y , las propuestas más utilizadas son correlaciones del tipo:

$$\sigma_u = \beta \frac{P_{max}}{t^2} \quad (5)$$

$$\sigma_u = \beta_1 \frac{P_{max}}{t^2} + \beta_2 \quad (6)$$

donde β , β_1 y β_2 son constantes empíricas y t corresponde al espesor de la probeta. Nuevamente se muestra una correlación realizada en [16] para distintos materiales evaluados (Figura 6).

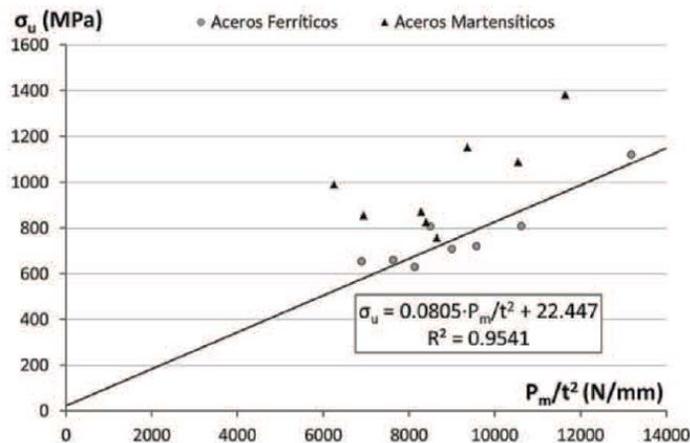


Figura 6. Correlación entre σ_u y P_{max}/t^2 [16]

Lacalle *et al.* [19] propusieron una expresión para σ_u basada en P_{y_inf} .

$$\sigma_u = \alpha \frac{P_{y_inf}}{t^2} + \beta \frac{P_{max} - P_{y_inf}}{t} \quad (7)$$

5.3 Alargamiento a tracción, A (%)

La expresión más aceptada en la bibliografía para estimar el alargamiento a tracción es:

$$A (\%) = \gamma_1 \frac{d_m}{t} + \gamma_2 \quad (8)$$

En la Figura 7 se muestra su respectiva correlación realizada por Rodríguez y Belzunce [16].

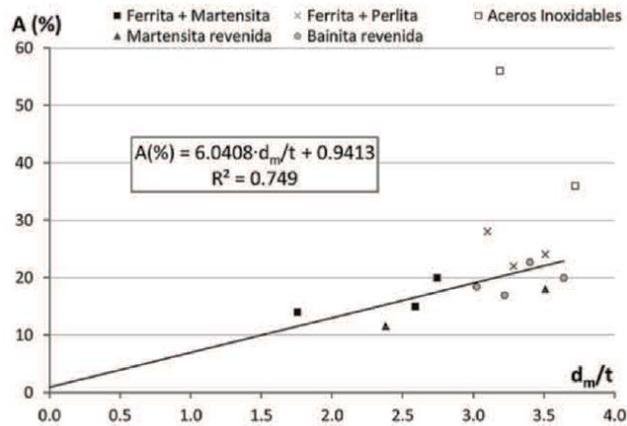


Figura 7. Correlación entre A (%) y d_m/t [18]

5.4 Módulo de elasticidad, E

La gran mayoría de expresiones que relaciona el modulo elástico con los ensayos Small Punch tiene la forma:

$$E = \alpha k \quad (9)$$

donde k es la pendiente del tramo elástico de la curva carga-desplazamiento y α es una constante empírica. Lacalle *et al.* [8] menciona que el fundamento de la expresión (9) no es muy confiable, ya que en este tramo de la curva esta superpuesto el comportamiento plástico de la indentación del punzón con la probeta. De esta manera, propone utilizar el valor de la pendiente de descargas elásticas realizadas durante el ensayo en el primer tramo de la curva (Figura 8), eliminando así la componente plástica de la indentación del punzón sobre la probeta.

Figura 8. Cargas y descargas elásticas durante ensayo Small Punch [8]

En la Figura 9 se muestra una gráfica de E obtenido en ensayos Small Punch contra E obtenido por métodos convencionales para distintos aceros.

Figura 9. Módulo de Young obtenido por Small Punch (abscisas) y métodos convencionales (ordenadas) [8].

5.5 Temperatura de transición Dúctil-Frágil, T_T

Para poder determinar esta propiedad, es necesario realizar ensayos SPT desde la temperatura ambiente hasta temperaturas criogénicas. De esta manera se van registrando los valores de energía obtenidos (área bajo la curva carga-desplazamiento) para posteriormente graficarlos contra los valores de temperatura de los ensayos. Una vez que se cuentan con dicha grafica se procese a calcular la T_T . El procedimiento es

similar a los ensayos Charpy [6]. Las correlaciones reportadas en la literatura [17] entre las temperaturas de transición de ensayos SPT y ensayos Charpy son del tipo:

$$TT(\text{Charpy}) = a + bTT(\text{SPT}) \quad (10)$$

$$TT(\text{Charpy}) = \alpha TT(\text{SPT}) \quad (11)$$

donde a , b y α son constantes empíricas. En la Figura 10 se muestra los resultados reportados por Contreras *et al.* [17] tras realizar ensayos SPT y Charpy de un material.

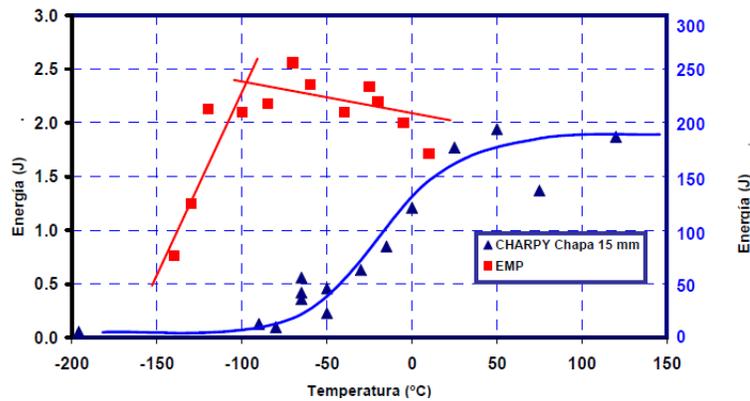


Figura 10. Curva de transición SPT y curva de transición Charpy de un acero AE460 [17]

En la Figura 11 se muestra la correlación de TT Charpy y SPT realizada en [17] para diferentes tipos de aceros.

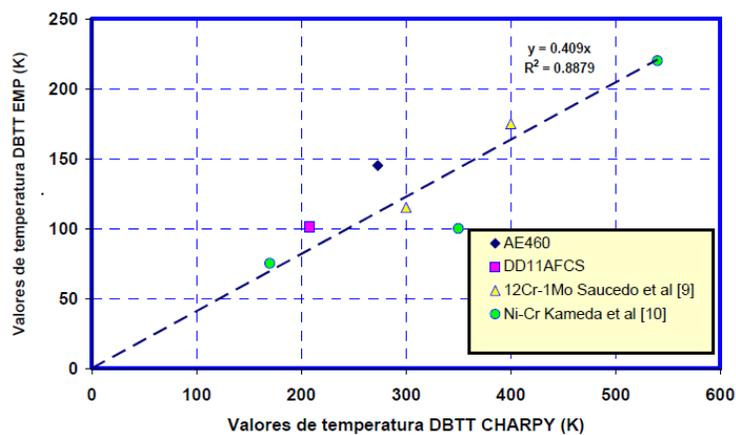


Figura 11. Correlación entre TT mediante ensayos SPT y TT mediante ensayos Charpy de un acero AE460 [17]

5.6 Tenacidad a la fractura

Existen diferentes propuestas para la evaluación de la tenacidad a la fractura a través de ensayos SPT. De esta manera, están aquellas que son obtenidas de una manera empírica, otras son propuestas desde un punto analítico, y algunas más mediante complejas simulaciones numéricas. De acuerdo a Lacalle *et al.* [18], estas aproximaciones presentan un elevado grado de complejidad, resultando así algunas discrepancias a la hora de ser aplicadas. Por lo anterior, ha propuesto una nueva metodología que se basa en una correlación directa entre la apertura de la entalla realizada en la probeta y el valor CTOD crítico obtenido en ensayos estandarizados. En la Figura 12 se muestran las correlaciones obtenidas en [18] para distintos valores de entalla inicial en las probetas. δ_i (eje vertical) corresponde al valor CTOD bajo ensayos normalizados y δ_{psi} a la curvatura existente crítica en la muesca de la probeta para el momento de la generación de una grieta. Cabe resaltar que al valor de δ_{psi} proviene de la siguiente expresión:

$$\delta_{sp} = \rho_{observado} - r_{inicial} \quad (12)$$

donde $\rho_{observado}$ es el radio de curvatura en un determinado instante en el fondo del defecto y $r_{inicial}$ es el radio de la entalla inicial.

Figura 12. Correlaciones entre δ_i y δ_{psi} en función del tamaño inicial de entalla

En base a los resultados obtenidos en la figura anterior, Lacalle *et al.* [18] obtuvo una correlación del tipo:

$$\delta_i = 1.12(\delta_{spi})^{1.392} \quad (18)$$

Esta expresión es propuesta para entallas iniciales entre 4.75 y 5mm, debido a la mínima diferencia observada en la figura.

6. TENDENCIA DE LA TÉCNICA SMALL PUNCH

El creciente desarrollo de la técnica Small Punch se ve reflejado en la participación de Comité Europeo para la Normalización (CEN) en el código dictado de buenas prácticas, dando así un mayor seguimiento en esta línea de investigación. Ejemplo de ello es el proyecto del Programa Nacional de Investigación Básica en España que se está llevando a cabo entre las Universidades de Cantabria, Burgos y Oviedo [3], que tienen por objetivo extender el uso del Small Punch en la determinación de la tenacidad a la fractura en materiales frágiles, caracterización de procesos de corrosión bajo tensión y la evaluación de las propiedades de creep-fractura. La Universidad de Cantabria en particular, también ha entrado a formar parte del grupo de trabajo europeo con el fin de aportar y enriquecer el actual código de buenas prácticas CWA 15627 [7] dictado por el CEN, por lo que se podría visualizar un futuro prometedor en la utilización de la técnica Small Punch como referente principal en la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales.

REFERENCIAS

- [1] ASTM E8-04, (2004), Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, *Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01*.
- [2] ASTM E399-04, (2004). Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, *Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01*.
- [3] Lacalle, R., (2012). Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos Small Punch. *Tesis doctoral, Universidad de Cantabria*.
- [4] Autillo, J., Contreras, M.A, Botegón, C., Rodríguez, C., & Belzunce, F.J., (2006), Utilización del Ensayo Miniatura de Punzonamiento (Small Punch Test) en la Caracterización Mecánica de Aceros, *Journal of Anales de la Fractura No. 23*
- [5] Cuesta, I., (2010), Evaluación de la tenacidad a la fractura en aceros mediante el uso de probetas miniatura prefisuradas, *Tesis doctoral, Universidad de Burgos*.
- [6] ASTM E23-04, (2004). Test methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. *Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01*.
- [7] CWA 15627:2007, (2007). Small Punch Test Method for Metallic Materials, *European Committee for Standardization*.
- [8] Lacalle, R., García, J., Álvarez J. A., & Gutiérrez-Solana, F., (2009), Obtención mediante el ensayo Small Punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos, *Journal of Anales de Mecánica de Fractura No. 26*

- [9] Cuesta, I., Rodríguez C., Belzunce, F. J. & Alegre, J.M., (2010), Estudio de las técnicas para la obtención de probetas SPT prefisuradas, *Journal of Anales de Mecánica de Fractura No. 27*
- [10] Rodríguez, D., Serrano, M. & Perosanz, F. J., (2011), Efecto del acabado superficial en probetas miniatura para ensayos Small Punch, *Journal of Anales de Mecánica de Fractura No. 28*
- [11] Mao, X., Kameda, J., (1991), Small-Punch Technique for Measurement of Material Degradation of Irradiated Ferritic Alloys, *J. Mater. Sci.*, 26 2436.
- [12] Llanes, L., Gómez, M., Iturgoyen, L., Mateo, A. & Anglada, M., (1995), Evaluación del uso de la Técnica del Punzonado de probetas pequeñas para la determinación de parámetros de la fractura de aceros inoxidables austeno-ferríticos, *Journal of Anales de Mecánica de Fractura No. 17*
- [13] Horiguchi, K. & Shindo, Y. (2002). Validation of a Small Punch Testing Technique to characterize the cryogenic fracture properties of austenitic stainless steel welds. *AIP Conference Proceedings*, 614(1), 178.
- [14] Lacalle, R., Arroyo, B. & Álvarez, J. A., (2011), Aproximación basada en el concepto CETOD para la determinación de la tenacidad a la fractura mediante probetas Small Punch, *Journal of Anales de Mecánica de Fractura No. 28*
- [15] García, M. A., Viña, J., Argüelles, A. & Viña, I., (2008), Caracterización de un composite termoplástico reforzado con tejido de fibra de vidrio mediante el

Ensayo Miniatura de Punzonamiento, *Journal of Anales de Mecánica de Fractura No. 25*

- [16] Rodríguez, D. & Belzunce, F. J., (2012), Estudio de la idoneidad del Ensayo Miniatura de Punzonado para la caracterización mecánica de los aceros y de sus uniones soldadas, *Journal of DYNA Vol. 79*
- [17] Contreras, M. A., Rodríguez, C., Belzunce, F. J & Botegón, C., (2007), Uso del ensayo Miniatura de Punzonado en la Evaluación de la transición dúctil-frágil de aceros estructurales, *Anales de la Mecánica de Fractura No. 24*
- [18] Lacalle, R., Arroyo, B., Álvarez, J. A. & Gutiérrez-Solana, F., (2011), Aproximación basada en el concepto CTOD para la determinación de la tenacidad mediante probetas Small Punch, *Anales de la Mecaniza de Fractura No. 28*
- [19] Lacalle, R., García, J., Álvarez J. A., & Gutiérrez-Solana, F., (2008), The Small Punch Test as a Tool for Basic Structural Integrity Assessments, *Journal of 17th European Conferencce on Fracture*