

## INFLUENCIA DEL INDENTADOR EN LAS CURVAS CARGA-DESPLAZAMIENTO DEL ENSAYO MINIATURA SMALL PUNCH TEST (SPT)

*Clara Sanz Cardona<sup>1</sup>, David Sánchez Ávila<sup>2</sup>, Fernando Carreño Gorostiaga<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Madrid, clara.sanz.cardona@alumnos.upm.es

<sup>2</sup>Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM, CSIC), [carreno@cenim.csic.es](mailto:carreno@cenim.csic.es)

**Resumen:** El objetivo de este proyecto es poder extraer, a partir de un Ensayo Miniatura de Punzonado (Small Punch Test, SPT) no estándar, una curva equivalente carga-desplazamiento a un ensayo SPT estándar. Para ello se realizan una serie de ensayos SPT virtuales mediante el programa de elementos finitos COMSOL Multiphysics, de modo que se obtengan diferentes curvas asociadas a dos aceros inoxidable austeníticos 316L. La variable entre esas curvas es el radio de la bola indentadora, el cual tomará diferentes valores. De esta manera, se obtiene un espectro lo suficientemente representativo del comportamiento de estos aceros ante el ensayo SPT bajo distintas geometrías, incluyendo su curva estándar. Posteriormente, se analizan las curvas no estándar resultantes del ensayo para hallar el procedimiento de conversión a curvas estándar. Esto significa que, dado un radio cualquiera de bola indentadora, junto con su curva respectiva de carga-desplazamiento, se podrá predecir la curva completa del caso estándar, o de cualquier otro radio.

**Palabras clave:** Small Punch Test, Ensayo Miniatura de Punzonado, COMSOL Multiphysics

### 1.-INTRODUCCIÓN.

El ensayo Small Punch Test (SPT), denominado en castellano Ensayo Miniatura de Punzonado (EMP), consiste en la aplicación de una carga mediante un punzón de cabeza semiesférica a una chapa o disco de como máximo 10 mm de diámetro y 0,50 mm de espesor [1]. Este ensayo resulta de especial interés, ya que permite conocer características fundamentales utilizando volúmenes de material muy pequeños, de manera que, en muchas ocasiones, puede considerarse como ensayo no destructivo [2].

Aunque desde hace décadas se comenzó empleando un radio de bola indentadora  $r = 1,20$  mm en el ensayo estándar, se pretende establecer  $r = 1,25$  mm como el estándar definitivo, según la normativa pendiente de ser aprobada [3], [4].

El objetivo de este trabajo es elaborar un método de conversión de resultados no estándar a unos resultados que sí lo sean. De esta manera, aquellos estudios realizados según parámetros diferentes de los que se establezcan como normativos podrán ser considerados como tal tras la conversión o, al menos, serán válidos para la comparación de resultados con otros estudios.

En primer lugar, se realizarán una serie de ensayos virtuales SPT a través del software de elementos finitos COMSOL Multiphysics. Posteriormente se analizarán estas curvas para hallar el método de conversión común a todas ellas más adecuado, presentando una fórmula de conversión sencilla y precisa.

### 2.-MATERIALES Y MÉTODO EXPERIMENTAL.

Se trabajará con un acero inoxidable austenítico 316L en dos estados, uno recocido y otro en estado endurecido. De esta manera, el comportamiento

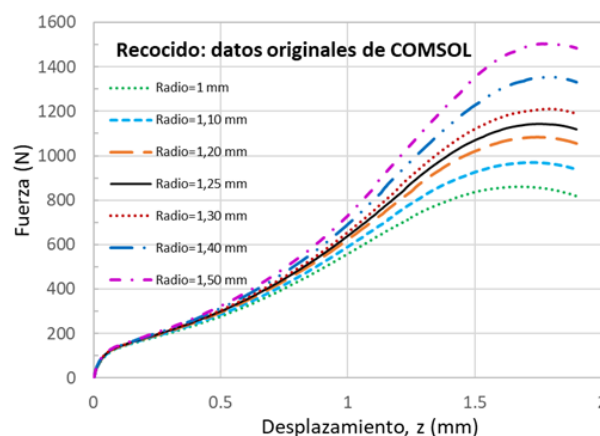
mecánico de muchos otros aceros se situará entre estos dos extremos, facilitando que los resultados sean extrapolables a otros materiales.

En cuanto a las simulaciones virtuales, estas se han realizado a través de COMSOL Multiphysics. La probeta o chapa se diseñó con un radio de 3 mm y una altura de 0,50 mm. Esta probeta se apoyó en un soporte de geometría ideal que formaba un agujero con un radio de 2 mm.

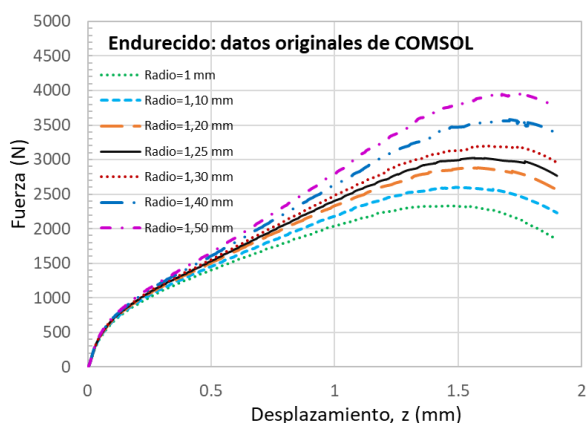
Para el ajuste posterior de la fórmula de conversión, se utilizó la herramienta de optimización Solver de Excel.

### 3.-RESULTADOS.

Las curvas experimentales obtenidas de las simulaciones virtuales para ambos materiales fueron las que se ven en las Figuras 1 y 2.



**Figura 1.** Curvas originales del material recocido resultantes de la simulación en COMSOL.



**Figura 2.** Curvas originales del material endurecido resultantes de la simulación en COMSOL.

#### 4.- PREDICCIÓN DE LAS CURVAS.

##### 4.1.-Fórmula de conversión

En primer lugar, se procedió al ajuste polinómico de las curvas. De esta manera, cada una se haya definida por un polinomio de grado diez con el cual es posible trabajar. A continuación, el objetivo será hallar una fórmula que, aplicada a cada polinomio, éste resulte en uno lo más parecido posible al estándar.

Estudiando las curvas tanto para el material recocido como endurecido, parece conveniente que la corrección para los valores iniciales sea poco acusada, aumentando según aumenta el desplazamiento. Los máximos de las curvas no parecen depender linealmente del desplazamiento, sino en mayor medida. La corrección además tendrá que ser mayor cuanto mayor sea la diferencia (o razón) de radios. Existe además una simetría en cuanto a cargas y radios, de manera que si el radio empleado es mayor que el de referencia, la carga también, y viceversa, siendo menor la carga cuando el radio es menor.

Este comportamiento puede indicar una dependencia del desplazamiento de modo que, cuando este sea cero, la fuerza del ensayo y la fuerza de referencia sean la misma. A su vez, cuando el desplazamiento vaya aumentando, la corrección se acentúa.

Estos requisitos pueden cumplirse si colocamos el término correspondiente al desplazamiento (z) a modo de exponente en nuestra fórmula, de modo que cuando este sea cero, la fuerza del ensayo y la fuerza de referencia efectivamente sean la misma; por el contrario, cuanto mayor sea z la corrección será cada vez más notable.

Tras varias pruebas con diferentes funciones y dependencias relacionando los parámetros de desplazamiento, fuerza del ensayo, radio de ensayo y radio de referencia, se llegó a la conclusión de que la Ec. 1 es la fórmula más sencilla que puede transformar con mayor exactitud los diferentes polinomios en el polinomio de referencia:

$$\frac{F}{F_{ref}} = \left( \frac{R}{R_{ref}} \right)^{a \cdot z^b} \quad (1)$$

donde  $F_{ref}$  es la fuerza de referencia obtenida con el radio de referencia  $R_{ref}$  (1,25 mm) en función del desplazamiento z (en mm), "F" es la fuerza obtenida del ensayo con bola de radio "R" y "a" y "b" son parámetros que debemos determinar.

##### 4.2.-Aproximaciones individuales

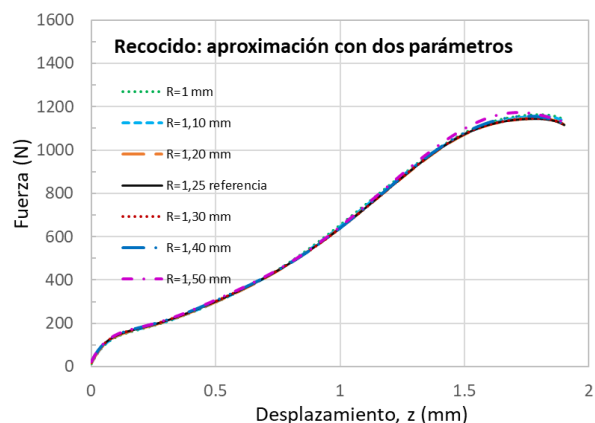
Gracias a la herramienta Solver de Excel se consiguieron los valores de los parámetros "a" y "b" ideales para cada una de las curvas (obteniéndose doce fórmulas de conversión diferentes). De esta manera se comprobó que la Ec 1. era válida y capaz de aproximar todas las curvas a sus respectivas de referencia. Los resultados de estas aproximaciones fueron útiles a nivel individual y para cada caso concreto, pero no es este el propósito final, ya que lo que se deseaba era hallar la manera de obtener unos parámetros "a" y "b" válidos para todas las curvas, o en su defecto una modificación de los mismos. A continuación se estudió la posibilidad de elegir unos únicos parámetros por material, y en último lugar unos únicos parámetros válidos para ambos.

##### 4.3.-Selección de parámetros para cada material

Para seleccionar unos "a" y "b" para cada material se consideraron dos vías, la de mantener estos dos parámetros, inicialmente, y la de añadir un tercer parámetro, después. Ambas se compararon para decidir cuál resultaba más adecuada.

##### 4.3.1.-Dos parámetros

Para hallar un "a" y "b" para cada material se modificó la forma de aplicar Solver, ya que se necesitaba que todas las curvas a la vez se ajustasen a la de referencia. Estas aproximaciones fueron las que se pueden ver en las Figuras 3 y 4, empleando los valores de "a" y "b" reflejados en la Tabla 1 para la Ec 1.



**Figura 3.** Curva completa de la aproximación con dos parámetros (recocido).

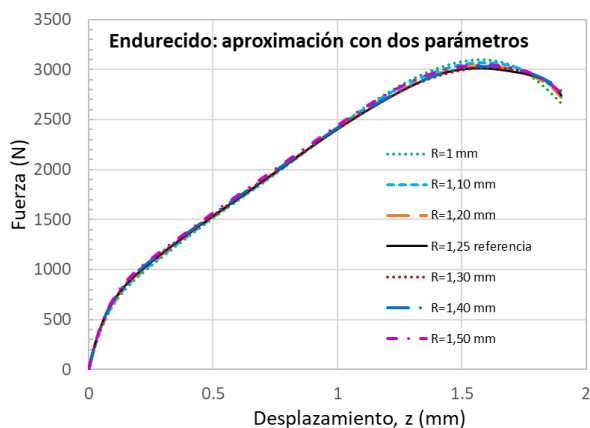


Figura 4. Curva completa de la aproximación con dos parámetros (endurecido).

Tabla 1: Valores de los parámetros “a” y “b” para la aproximación con dos parámetros  
Aproximación con dos parámetros

Parámetro	Recocido	Endurecido
a	0,70633155	0,770403603
b	1,182136646	1,204020126

El muy buen ajuste obtenido para todas las curvas contrasta con la gran disparidad de valores obtenida de las curvas experimentales mostrada en las Figuras 1 y 2. De hecho, los errores máximos teniendo en cuenta todas las curvas no sobrepasan  $\pm 1,3\%$  en el material endurecido y  $\pm 1,5\%$  para el material recocido, y éstos son muchísimo menores aún para las curvas centrales. Estos valores de “a” y “b” son ya unos valores adecuados para presentar una única fórmula para cada material. Aun así, se ha considerado interesante valorar si todavía es posible afinar más el resultado considerando la posibilidad de añadir una tercera constante en la fórmula.

#### 4.3.2.-Tres parámetros

Con el fin de controlar aún más la influencia de las constantes en la Ec 1., se estudió la dependencia de “a” con el radio de la bola indentadora. Es posible hallar esta relación, ya que al haber realizado en un primer momento las aproximaciones individuales se dispone de los valores “ideales” de “a” para cada radio y material. Así pues, se pudo expresar el comportamiento de “a” respecto al radio de la bola con la forma descrita por la Ec. 2, siendo ahora los tres parámetros “n”, “m” y “b”.

$$a = n + m (R - R_{ref}) \quad (2)$$

A través de Solver se determinó el valor de estos parámetros, siendo  $n = 0,71423$ ,  $m = 0,22$  y  $b = 1,1795$  para el caso del material en estado recocido y

$n = 0,78208$ ,  $m = 0,28$  y  $b = 1,1621$  para el material en estado endurecido. Estos valores, aplicados a la Ec. 1 para cada curva, resultaron en las aproximaciones de las Figuras 5 y 6.

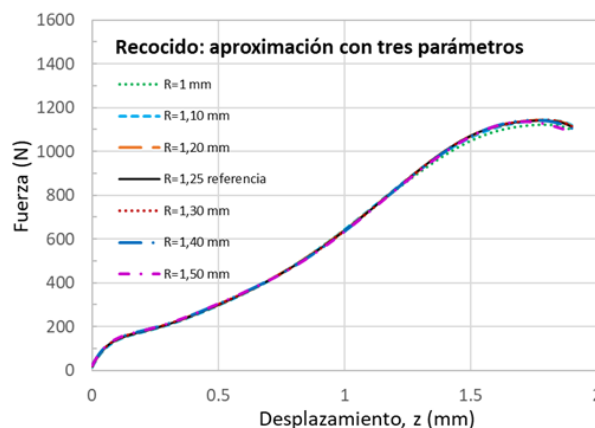


Figura 5. Curva completa de la aproximación con tres parámetros (recocido).

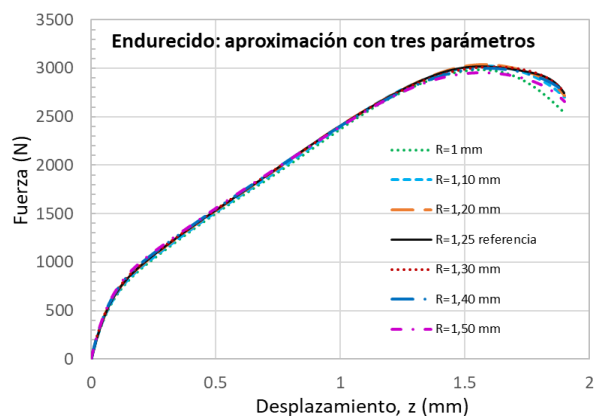


Figura 6. Curva completa de la aproximación con tres parámetros (endurecido).

Las aproximaciones en la Figura 5 resultan satisfactorias, ya que la precisión ha aumentado ligeramente. Los radios extremos siguen teniendo un error pequeño, menor de  $\pm 1,3\%$ . Los resultados de la Figura 6, sin embargo no se pudieron cuantificar como igual de precisos, y la mejora no resultó ser notable. Teniendo en cuenta los factores indispensables de sencillez y precisión en la fórmula de conversión, se decidió emplear dos parámetros como se había propuesto en un inicio, ya que la adición de un tercero no solo no mejoraba lo suficiente el ajuste, sino que añadía complejidad a la fórmula.

#### 4.4.-Selección de parámetros finales

Los análisis realizados en los apartados anteriores, tanto individualmente como en grupo de los parámetros “a” y “b” de la Ec. 1 han mostrado que éstos se sitúan en torno a unos valores en una horquilla en la que las predicciones de curvas muestran poca dispersión. Por esto, se realizó una búsqueda manual entre diferentes combinaciones de valores de “a” y “b” basándose en la

Tabla 1. Así, se probaron combinaciones entre 0,70 y 0,78 para “a” y entre 1,15 y 1,22 para “b”. Entonces se observó el comportamiento de los máximos de todas las curvas al mismo tiempo y especialmente en las curvas centrales, resultando un par de parámetros efectivo y elegante el dado por:

$$a = 0,75$$

$$b = 1,20$$

Las figuras 7 y 8 muestran las aproximaciones con estos parámetros de “a” y “b”, siendo la forma final de la fórmula la expresada por la Ec. 3.

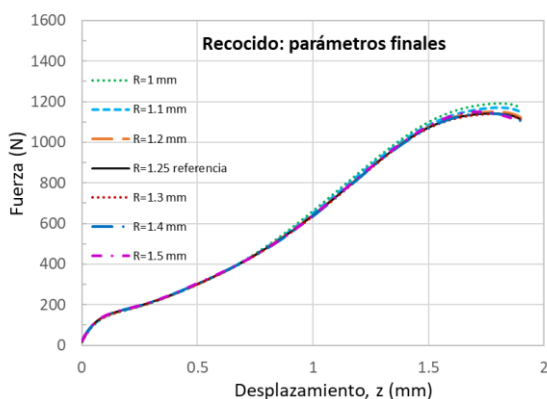


Figura 7. Curva completa de la aproximación con los parámetros finales (recocido)

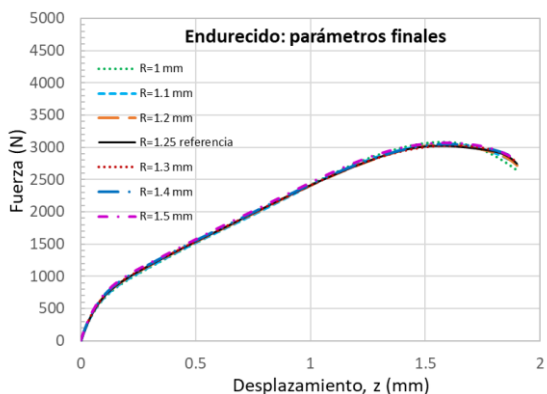


Figura 8. Curva completa de la aproximación con los parámetros finales (recocido)

$$\frac{F}{F_{ref}} = \left( \frac{R}{R_{ref}} \right)^{0,75 \cdot z^{1,20}} \quad (3)$$

### 5.- CONCLUSIONES.

Recientemente se está trabajando en una normativa común que abarque y unifique tanto el dispositivo de ensayo como las condiciones, probetas, etc. del ensayo Small Punch Test. Uno de estos aspectos es el radio de la bola indentadora a utilizar en el ensayo; se prevé que la norma establezca como estándar el valor de 1,25 mm.

Surge la necesidad de encontrar un método que permita transformar los resultados obtenidos anteriormente a unos resultados que cumplan con la normativa.

Con este objetivo se hizo un estudio sistemático de la influencia del radio de la bola indentadora en el ensayo SPT empleando el método de elementos finitos a través de COMSOL Multiphysics. Se realizaron simulaciones para siete radios de bola y dos materiales diferentes, obteniendo un total de catorce curvas carga-desplazamiento representativas de ensayos SPT reales. Posteriormente y tras su ajuste polinómico, se procedió a elaborar la fórmula de conversión que llevara a todas las curvas a una de referencia. Tras un análisis de las mismas y numerosas pruebas, se determinó que la Ec. 1 era la que mejores resultados ofrecía. Posteriormente se analizaron los parámetros “a” y “b” para cada curva, para cada material, y para todas las curvas conjuntamente. Incluso se consideró un tercer parámetro con el fin de añadir más precisión. Finalmente se determinó el valor de las constantes “a” y “b”, resultando ser la fórmula de conversión final la Ec. 3. Esta fórmula refleja una gran variedad de situaciones, desde una bola muy pequeña de radio 1 mm hasta una bola máxima de radio 1,50 mm. Además, tiene en consideración desde materiales muy blandos a muy resistentes, con precisiones en los valores más dispares (máximos de carga) dentro de una variación máxima de  $\pm 2$  %. Se ha demostrado pues, que es posible predecir resultados de carga-desplazamiento estándar desde datos no estándar, cumpliendo así con el objetivo de este trabajo.

### 6.- AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Prof. José Ygnacio Pastor Caño, Tutor de la UPM, la revisión del Trabajo Fin de Grado.

### 7.- REFERENCIAS

[1] J. Autillo, M. A. Contreras, C. Betegón, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, «Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento (Small Punch Test) en la caracterización mecánica de aceros», Anales de Mecánica de Fractura Vol I, pp 77-78, 2006.

[2] D. Sánchez-Ávila, R. Barea, E. Martínez, J.R Blasco, L.Portolés, F. Carreño, «Determination of the instantaneous strain rate during small punch testing of 316 L stainless steel», International Journal of Mechanical Sciences 149, pp 93-100, 2018.

[3] K. Matocha, R. Hurst, «Small Punch Testing-The Transition from a Code of Practice to a European Testing Standard», Key Engineering Materials Vol 734, pp 3-6, 2017.

[4] J. Bruchhausen, M. Altstadt, E. Austin, T. Dymacek, P. Holmström, S. Jeffs, S. Lacalle, R. Lancaster, R. Matocha, K. Petzova, «European standard on small punch testing of metallic materials», Ubiquity Proceedings 1(S1), pp 1-6, 2018.