

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA Y DE LA PROFUNDIDAD DE LA ENTALLA EN LA TRIAXIALIDAD Y COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE PROBETAS SPT ENTALLADAS

I. Peñuelas¹, R. Montero¹, C. Rodríguez¹, C. Betegón¹ y F.J. Belzunce²

¹Dpto. Construcción e Ingeniería de Fabricación, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón,
Universidad de Oviedo, Campus de Viesques s/n,
33203 Gijón, Asturias, Spain.
E-mail: penuelasines@uniovi.es

²Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón,
Universidad de Oviedo, C/ Independencia 13,
33004 Oviedo, Asturias, Spain

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objeto el estudio de la influencia de la geometría y de la profundidad de la entalla en la triaxialidad y comportamiento a fractura de distintas probetas SPT entalladas, tras la realización del ensayo miniatura de punzonado o Small Punch Test (SPT). Para ello se han realizado simulaciones numéricas de probetas SPT de espesor $T=0.5$ mm y $T=1$ mm, y distintas geometrías de entalla, con profundidades relativas $a/T=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ y 0.6 (donde a es la profundidad de la entalla), y tres configuraciones diferentes, consistentes en una probeta con entalla central circular de diámetro 3 mm; una probeta con entalla longitudinal; y una probeta con entalla longitudinal y transversal. Las simulaciones se han realizado mediante el código comercial de elementos finitos ABAQUS, considerando grandes deformaciones y contactos. Las probetas han sido simuladas mediante una malla 3D con elementos cuadriláteros de 8 nodos e integración reducida. Dada la baja velocidad de punzonamiento (0.2 mm/min) se considera un análisis cuasiestático. El modelo micromecánico de daño utilizado es el modelo de Gurson-Tveergard-Needleman (GTN). Para cada una de las configuraciones analizadas se ha determinado la triaxialidad en el instante en el que se comienza a producir el crecimiento de grieta. Se ha estudiado asimismo la evolución de la triaxialidad con la carga en todos los casos simulados

PALABRAS CLAVE: ensayo miniatura de punzonado (SPT), triaxialidad de tensiones, probetas entalladas.

ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the influence of the specimen width, the geometry and the depth of notch on the stress triaxiality and the fracture behavior of notched SPT specimens. Thus, numerical simulations of SPT specimens of 0.5mm and 1mm width with different geometries and notches of relative depths $a/t=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ and 0.6 , have been studied. The three different geometries of notches analyzed have been square plate specimens of 10 x 10 mm² with: 1) a central circular notch of 3mm diameter, 2) a longitudinal notch and 3) a longitudinal and transverse notch. The numerical simulations have been carried out with the finite element commercial code ABAQUS, considering large deformations and contact. Specimens have been discretized by means of three-dimensional meshes of eight-node reduced integration elements. Die and punch were modeled as rigid bodies. Besides, large displacements and contact between surfaces have been taken into account. In addition, due to the low punching speed (0.2 mm/min) quasistatic analyses have been considered. The micromechanical damage model used is the Gurson-Tveergard-Needleman (GTN). For each configuration analyzed the triaxiality at the time when the crack begins its growth has been obtained. Furthermore, the evolution of the triaxiality with the load has also been studied.

KEY WORDS: small punch test (SPT), stress triaxiality, notched specimens.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo miniatura de punzonado es de gran interés en todas aquellas aplicaciones en las que se requiere caracterizar materiales de los que bien no se dispone de cantidades suficientes de material como para extraer

probetas convencionales, o bien no se quiere comprometer el funcionamiento en servicio de un componente [1]. Este ensayo se ha aplicado recientemente a la caracterización mecánica de la zona afectada térmicamente de soldaduras, y a la de

recubrimientos metálicos de base níquel [2], obteniéndose en ambos casos interesantes resultados.

2. ENSAYO MINIATURA DE PUNZONADO

El ensayo miniatura de punzonado es un ensayo que puede considerarse como no destructivo debido al reducido tamaño de las probetas que utiliza (pequeñas láminas cuadradas de 10x10 mm y espesores de 0.5 mm ó de 1 mm), a partir del cual se pueden obtener parámetros que permiten predecir directamente las propiedades mecánicas fundamentales del material, como el límite elástico, la resistencia a la tracción, la ductilidad y la energía de rotura [3,4,5].

El ensayo consiste en la aplicación de una carga a baja velocidad (0.2 mm/min) con la ayuda de un punzón de cabeza semiesférica de 2.5mm de diámetro, sobre una probeta, que está firmemente sujeta en todo su contorno. La probeta es de este modo obligada a deformarse cuasiestáticamente en el interior de un orificio de 4mm de diámetro (expansión biaxial) hasta su rotura. Mediante un extensómetro se obtiene el desplazamiento del punzón y, tras la corrección de la flexibilidad del dispositivo de ensayo, se calcula el desplazamiento del punto central de la probeta.

Los datos de carga y de desplazamiento generados, nos permiten obtener la curva característica del ensayo, que para un material dúctil muestra la forma que se expone en la Figura 1.

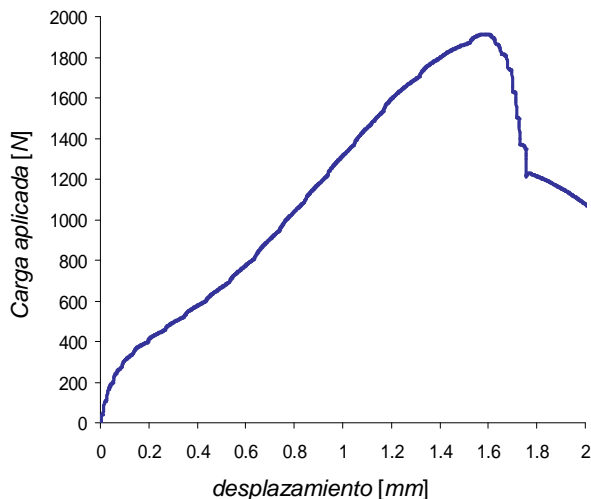


Figura 1. Curva característica obtenida en un ensayo SPT sobre un material dúctil

3. SIMULACIONES REALIZADAS

Se han desarrollado distintos modelos para reproducir el ensayo mediante cálculo numérico. Para ello se ha utilizado el código comercial de elementos finitos ABAQUS [6]. Al tratarse de probetas agrietadas ha sido necesario recurrir a mallas tridimensionales, si bien se ha utilizado simetría para disminuir el tiempo de

computación. La probeta se ha discretizado mediante una malla de elementos sólidos de ocho nodos con integración reducida. La matriz y el punzón se han modelado como sólidos rígidos y se han considerado contactos entre superficies. Los cálculos se han realizado bajo el supuesto de grandes deformaciones.

Las propiedades macroscópicas del material que se han introducido en el modelo, se han obtenido a partir de ensayos convencionales. Se ha considerado asimismo que la fractura dúctil del material se produce de acuerdo con el modelo micromecánico de daño de Gurson-Tvergaard-Needleman, en el que se considera la nucleación, el crecimiento y la coalescencia de cavidades, de modo que es posible simular el comportamiento del material hasta la rotura. Por otra parte, se ha supuesto que el coeficiente de rozamiento durante el ensayo es aproximadamente $\mu=0.1$, ya que este valor es adecuado para un contacto acero-acero inicialmente lubricado, que es el que se produce en el ensayo. La Figura 2 muestra el modelo y un detalle del mallado utilizados para algunas de las simulaciones.

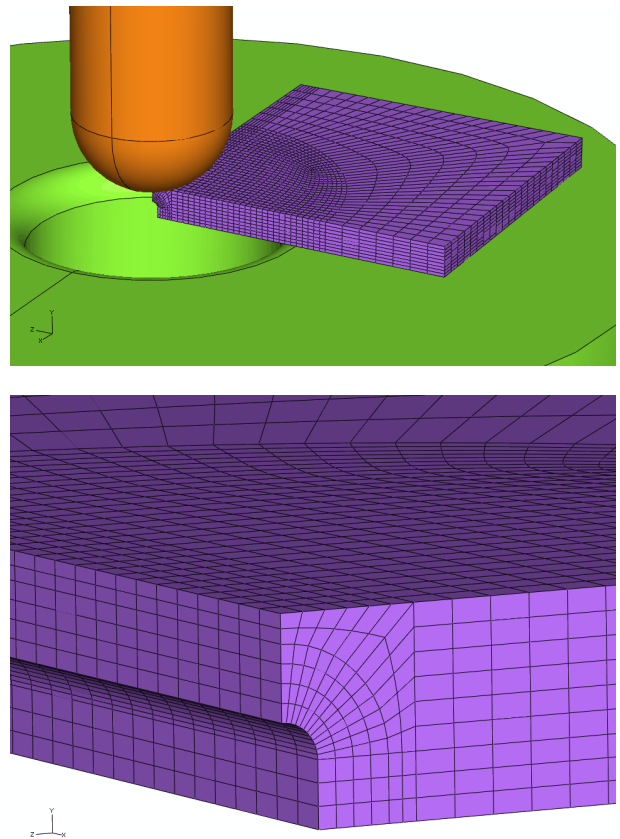


Figura 2. Modelo y detalle del mallado utilizado para algunas de las simulaciones

Se han realizado simulaciones numéricas de probetas miniatura de punzonado (SPT) de 0.5 mm y 1 mm de espesor, distintas geometrías de entalla con profundidades relativas $a/t=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ y 0.6 , donde a es el la profundidad de la entalla y t el espesor de la probeta (ver Figura 3) con $e=cte$, y tres configuraciones diferentes, consistentes en:

- a) probeta con entalla longitudinal (en adelante L);
- b) probeta con entalla longitudinal y transversal (en adelante L+T);
- c) probeta con entalla central circular (en adelante C) de diámetro 3 mm.

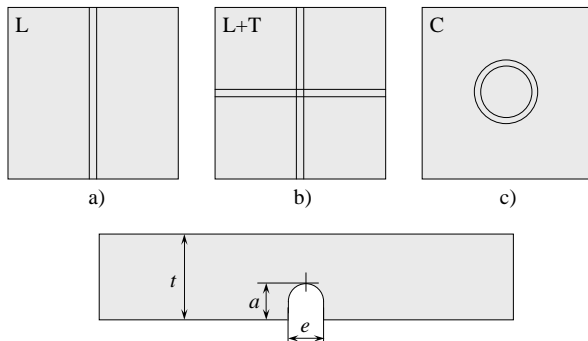


Figura 3. Configuraciones de entalla estudiadas y relación a/t

En total se han analizado 36 configuraciones distintas. En la Figura 4 se muestra una de las geometrías utilizadas para la simulación:

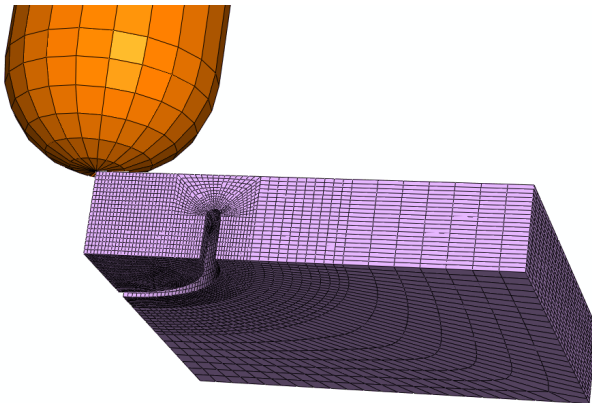


Figura 4. Punzón y probeta para el modelo de probeta C con relación $a/t=0.6$

Se ha procurado que las mallas sean en todos los casos similares, para evitar, en la medida de lo posible, la influencia de la misma en el estudio de las distintas configuraciones.

4. ANÁLISIS DE LA TRIAXIALIDAD

La determinación de la tenacidad a fractura de un material requiere, en primer lugar, elegir la geometría más adecuada para la determinación de dicha tenacidad [7]. En este trabajo se ha estudiado la influencia que el espesor de la probeta y la profundidad de la entalla tienen en la triaxialidad de la probeta, como paso previo a la elección de la configuración más adecuada para una aplicación determinada.

Son varios los criterios que se han considerado para la determinación de la triaxialidad de la probeta, ya que nos encontramos ante una propiedad que depende tanto de la carga como de la posición respecto al frente de grieta. Estos criterios son:

- 1) Valores constantes de distancia al frente de entalla adimensionalizada $r\sigma_0/J=2$ y $r\sigma_0/J=1$. Se consideran estos dos valores por encontrarse los máximos de tensiones de apertura entre ellos.
- 2) Máxima tensión de apertura
- 3) Distancia fija al frente de entalla. Se han considerado dos distancias distintas: $x = 45\mu\text{m}$ y $90\mu\text{m}$ para las probetas de $t=0.5\text{ mm}$ y $90\mu\text{m}$ para las probetas de espesor $t=1\text{ mm}$
- 4) Triaxialidad según J, en la que se ponderan los valores de triaxialidad obtenidos con el criterio de máxima tensión de apertura, con el valor de J en cada instante, de modo que se da más peso a los valores de triaxialidad próximos al instante de rotura

La Figura 4 muestra la evolución de dicha triaxialidad para una configuración cualquiera de las configuraciones estudiadas, en función de la distancia al frente de grieta y de la carga aplicada. Ha sido necesario, por tanto, calcular la integral J [6] media en cada instante, así como definir una distancia respecto al frente de grieta en la que realizar los cálculos. Esta distancia se ha relacionado con el CTOD de la entalla, habiendo utilizado además un factor de escala en el caso de las probetas de menor espesor.

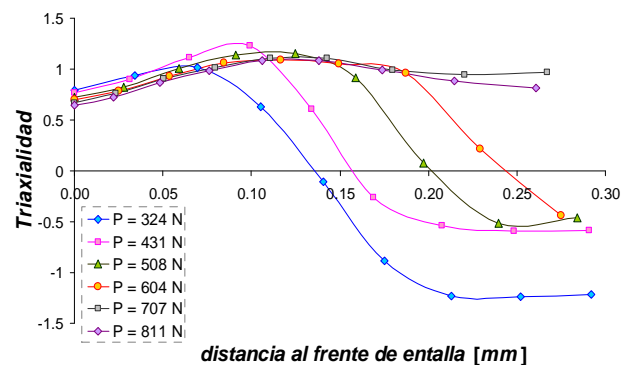


Figura 4. Evolución de la triaxialidad de una configuración determinada (L, $t=4\text{ mm}$, $a/t=0.4$) en función de la distancia al frente de grieta y la carga aplicada

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestra para una de las configuraciones estudiadas cómo el aumento de la

profundidad de la entalla incrementa la flexibilidad de la probeta.

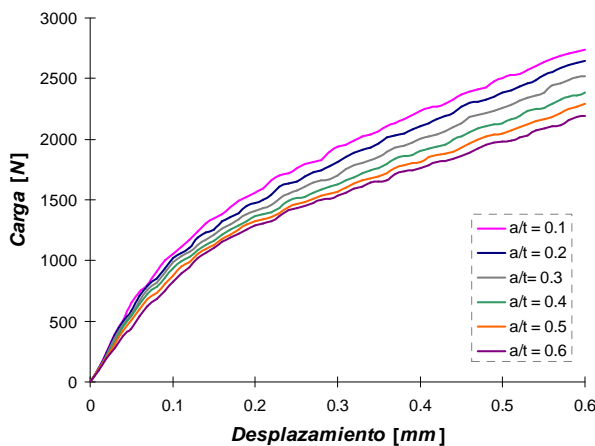


Figura 5. Relación carga-desplazamiento de punzón para una misma configuración (entalla L+T), con distintas profundidades de entalla y espesor 1 mm

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados obtenidos tras la realización de los ensayos miniatura de punzonado sobre las probetas de 0.5mm y de 1mm de espesor, respectivamente. En la figura 6 se comparan los valores de triaxialidad de las distintas probetas entalladas (con entalla longitudinal, longitudinal + transversal o entalla doble, y con entalla circular) en función de la relación entre la profundidad de la entalla y el espesor, para probetas de 1 mm de espesor. En dicha figura se observa que, de acuerdo con lo esperado, la triaxialidad aumenta al hacerlo la profundidad de la entalla, para todas las configuraciones. No obstante, cuando el tamaño relativo inicial de la entalla es próximo a 0.6mm, el ligamento resistente es muy pequeño y se observan fuertes fenómenos de flexión en la zona de la entalla, que se traducen en una disminución de la triaxialidad.

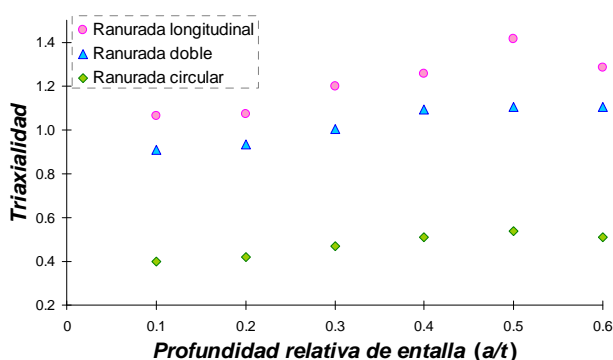


Figura 6. Triaxialidad en función de la profundidad relativa de entalla para las distintas configuraciones de 1 mm de espesor

Por otra parte, de las tres geometrías analizadas, las probetas con una única entalla longitudinal son las que permiten obtener mayores valores de triaxialidad. Hay que tener en cuenta que los valores de triaxialidad representados en estas gráficas corresponden a los

obtenidos con el criterio de distancia fija al frente de entalla, por lo que si se varía el criterio de obtención de triaxialidad, variarán los valores de triaxialidad, aunque la tendencia observada es la misma.

En el caso de probetas de 0.5 mm se ha obtenido la triaxialidad para dos distancias distintas: a) la misma que para el caso de probetas de 1 mm, y b) la mitad que para el caso de probetas de 1 mm, con el objeto de tener en cuenta un cierto factor de escala en las simulaciones, ya que el efecto de una entalla de 90 μ m es mucho mayor en una probeta de 0.5 mm que una de 1 mm de espesor.

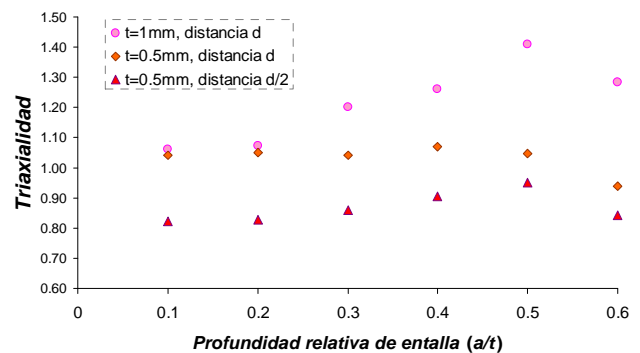


Figura 7. Triaxialidad en función de la profundidad relativa de entalla y el espesor para una misma geometría

En la Figura 7 se presentan los resultados para una misma geometría con los dos espesores de probeta estudiados y los dos criterios de triaxialidad para el espesor de 0.5 mm. Se observa que para valores muy elevados de a/t , es decir para entallas de gran longitud, empiezan a ser muy importantes los efectos de flexión y se observa una disminución de la triaxialidad.

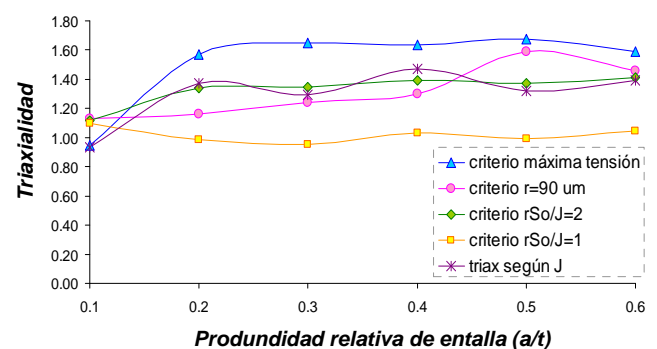


Figura 8. Triaxialidad para la configuración L de 1 mm de espesor, en función de la profundidad relativa de entalla y criterio utilizado para el cálculo de triaxialidad

Ya se ha comentado anteriormente que los valores de triaxialidad dependen del criterio utilizado para la determinación de la misma, llegando a observarse importantes diferencias en los mismos (hasta del 75% en

algunos casos) en función del criterio elegido. La figura 8 muestra los resultados de triaxialidad para la configuración con entalla longitudinal y 1mm de espesor, en función de la profundidad relativa de la entalla y del criterio de cálculo.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado la comparación del comportamiento a fractura de distintas probetas SPT agrietadas, de cara al estudio de la influencia del espesor de la probeta, la configuración agrietada de la probeta y el tamaño relativo de la entalla de la misma.

A la vista del estudio realizado se deducen las siguientes conclusiones:

- 1) El valor de la triaxialidad es sensible a la malla utilizada en la situación.
- 2) Es necesario definir qué criterio se va a utilizar para la determinación de los valores de triaxialidad de las distintas probetas, al haber dependencia espacio-temporal de la misma.
- 3) La triaxialidad y la flexibilidad de la probeta aumentan al hacerlo la profundidad de la entalla.
- 4) La triaxialidad de las probetas entalladas de mayor espesor es, por lo general, mayor que las de las probetas entalladas de menor espesor, en las que se observan además efectos importantes de flexión para entallas de gran longitud relativa.
- 5) Las configuraciones con una única entalla longitudinal presentan mayor triaxialidad que las de entalla longitudinal y transversal, y estas a su vez, mayor triaxialidad que las de entalla circular.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer por su financiación, al Ministerio de Educación y Ciencia (plan Nacional I+D+I), mediante los proyectos MEC-04-MAT2004-06992-C02-01 y MAT2008-06879-C03-00, a Hibbit, Karlsson y Sorensen por el acceso a ABAQUS mediante la licencia educacional. Sin todas ellos no hubiera sido posible la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Lucas G.E. et al., *Recent progress in small specimen test technology*, J. Nucl. Mater., vol. 307-311, pp. 1600-1608, 2002.
- [2] I. Peñuelas, R. González, M.A. García, A. Higuera, C. Rodríguez, R. Vijande., *Caracterización mecánica*

de recubrimientos mediante ensayos miniatura de punzonamiento, Actas del IX congreso iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2009.

- [3] Contreras MA., *Tesis doctoral*, Universidad de Oviedo, 2007.

- [4] Autillo J., Contreras M.A., Betegón C., Rodríguez C., Belzunce F.J., *Utilización del ensayo miniatura de punzonamiento en la caracterización mecánica de aceros*, Anales de Mecánica de la Fractura, 23, 77-83, 2006

- [5] M.A. Contreras, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Betegón, *Use of the small punch test to determine the ductile-to-brittle transition temperature of structural steels*, Fatigue Fract Engng Mater Struct, 31, 727-737, 2008.

- [6] ABAQUS 6.4., Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2003

- [7] I. Peñuelas, C. Rodríguez, F.J. Belzunce y C. Betegón, *Análisis de la determinación de la tenacidad a fractura mediante el ensayo SPT*, Anales de Mecánica de la Fractura 2009

- [8] I. I. Cuesta et al., *Cálculo de la integral J en probetas SPT para la estimación de la tenacidad a fractura*, Anales de Mecánica de la Fractura 2008