

EL ÁNGULO CRÍTICO DE ENTALLAS EN FORMA DE V EN LOS ENSAYOS DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

A. Macías¹, V. Mantič^{1*}, A. Sapora², L. Távora¹, F. París¹

¹Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla, España

²Politecnico di Torino
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, Italia

* Persona de contacto: mantic@us.es

RESUMEN

En este trabajo se realizan ensayos de flexión en tres puntos con probetas de sección rectangular con una pequeña entalla en forma de V situada en el centro de la superficie inferior de la probeta. El material de las probetas es PMMA. El objetivo de este trabajo es determinar el ángulo crítico de la entalla en forma de V para el cual la carga crítica alcanza su valor mínimo. Se fabrican dos series de probetas con diferentes profundidades de la entalla en forma de V: aproximadamente 0.2 y 0.4 mm. Los ángulos de entalla en cada serie son aproximadamente 15°, 30°, 55° y 90°. Los radios de redondeo en el vértice de las entallas en forma de V son aproximadamente 0.01 mm. A pesar de cierta dispersión de los valores experimentales para la carga crítica alcanzada en estos ensayos, los resultados indican claramente la existencia de un valor mínimo para un ángulo de entalla en V mayor que 30° para las dos profundidades de entalla ensayadas. Esta observación experimental está de acuerdo con las predicciones teóricas obtenidas aplicando el criterio acoplado de la Mecánica de la Fractura Finita.

PALABRAS CLAVE: Entalla en forma de V, Ensayo de flexión en 3 puntos, PMMA, Mecánica de la Fractura Finita

ABSTRACT

Three-point bending tests are performed using rectangular section specimens with a small V-notch located in the centre of the bottom surface of the specimen. The material of the specimens is PMMA. The objective of this study is to determine the critical angle of the V-notch for which the critical load reaches its minimum value. Two series of specimens with different depths of the V-notch approximately 0.2 and 0.4 mm are manufactured. The V-notch angles in each series are approximately 15°, 30°, 55° and 90°. The notch-tip radii are about 0.01 mm. Despite some dispersion of the experimental values for the critical load achieved in these tests, the obtained results clearly indicate the existence of a minimum value for a V-notch angle greater than 30°, for the two V-notch depths tested. This experimental observation agrees with the theoretical predictions obtained by applying the coupled criterion of Finite Fracture Mechanics.

KEYWORDS: V-notch, Three-point bend test, PMMA, Finite Fracture Mechanics

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es el estudio de la fractura en materiales frágiles con presencia de entallas tipo V. La evidencia experimental de una carga mínima de fractura para probetas con ángulo de entalla distinto al nulo es recogida por algunos autores [1-5] cuyos trabajos se han tenido en cuenta en la presente investigación. En estos trabajos existe mucha diversidad de materiales, tamaños y tipos de probetas según el ensayo realizado; además de distintos ángulos de entalla, que van desde 0° hasta los 180°. Si bien es cierto, en todos los casos el radio de fondo de entalla junto con la profundidad de esta son dimensiones que se tratan de realizar del menor tamaño

posible. En el caso del radio del fondo de entalla, este se minimiza para que los resultados se correspondan lo mejor posible con el caso ideal de entalla en V. Respecto a la profundidad de la entalla, las evidencias tanto teóricas [6,7] como experimentales [1-5,8] llevan a pensar que una longitud de entalla grande desplaza el ángulo de carga crítica mínima hacia el ángulo nulo. Es decir, el ángulo crítico tiende a ángulos tan pequeños que hacen difícil reproducir este fenómeno para grandes longitudes de entalla con los medios disponibles.

Respecto al tipo de ensayo, se ha elegido el ensayo de flexión en tres puntos (TPB, por sus siglas del inglés *Three-Point Bending* test) debido a que es en este tipo de ensayos en el que se manifiesta más fácilmente el

fenómeno que se desea estudiar [1-5]. Las probetas usadas tienen las características geométricas y de carga mostradas en la figura 1.

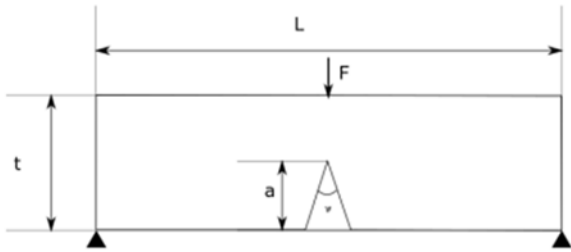


Figura 1. Esquema de probeta tipo TPB usada.

De los trabajos estudiados, destaca el estudio analítico del problema realizado por Carpinteri y colaboradores [6,7] quien aplicando el criterio acoplado de la Mecánica de la Fractura Finita obtienen de manera analítica, la siguiente conclusión: conociendo las propiedades del material, el factor de intensificación de tensiones crítico, K_{Ic}^* , la tensión última de rotura, σ_u , las propiedades elásticas del material, y la profundidad de la entalla, se puede determinar el ángulo de entalla crítico, $\omega_c > 0^\circ$, para el cual se alcanza el valor mínimo de la carga de rotura en el ensayo.

2. FABRICACIÓN DE PROBETAS

El proceso de fabricación comienza con la elección del material. Se tienen en cuenta los distintos materiales usados por otros autores en estudios afines [1-5], evaluando cual sería el mejor para alcanzar el propósito del trabajo. Se eligió el polimetilmetacrilato (PMMA) como el idóneo para la fabricación de las probetas por ser fácil de mecanizar y por requerir una profundidad de entalla más adecuada a los medios disponibles para observar un ángulo crítico suficientemente alejado del ángulo nulo.

Comúnmente, el PMMA se comercializa en forma de plancha, existiendo dos tipos, según el proceso de fabricación, por extrusión o colada. Según la norma [9], las propiedades de ambos materiales deben de ser muy similares, no habiendo diferencia significativa en el uso de uno u otro para cumplir el objetivo del trabajo, se ha optado finalmente por el material de colada.

Las medidas seleccionadas en el diseño de la probeta y su entalla en V son las siguientes:

- Distancia entre apoyos (L): 150 mm;
- Espesor de la probeta (b): 16 mm;
- Altura de la probeta (t): 15 mm;
- Profundidad de la entalla (a): 0.2 y 0.4 mm;
- Ángulo de la entalla (ω): 15° , 30° , 55° y 90° .

Para la ejecución del ensayo se necesita una repetición sobre cuatro probetas de cada combinación de

profundidad de entalla y de ángulo, es decir, 20 probetas por cada profundidad. A la serie con probetas de longitud de entalla 0.2 mm se le ha denotado como serie 0.2 y a la de longitud de entalla 0.4 mm como serie 0.4.

Las probetas se trataron de manera individual, realizando un recorte de las mismas partiendo de una parte del material con un tamaño ligeramente superior al deseado. Para la realización de las entallas se utilizaron herramientas de metal duro especialmente diseñadas para este propósito, las cuales se pueden observar en la figura 2. Estas herramientas fueron encargadas a una empresa externa que, tras un diseño conjunto de las mismas, las suministró con ángulos de 15° , 30° , 55° y 90° . El proceso de mecanizado de la herramienta de corte se llevó a cabo con una máquina de control numérico (CNC).



Figura 2. Herramientas de cortes fabricadas en metal duro mediante CNC.

Para adecuarnos al interés del trabajo a realizar, en nuestro caso el torno es utilizado de forma no convencional. Específicamente, para el proceso de fabricación de la entalla se sujetó la probeta con el cabezal del torno, y se montó la herramienta en el carro del torno de manera que quedara perpendicular al canto de la pieza sobre el cual se deseaba realizar la entalla. Para producir la entalla se aproxima el carro a la probeta dejando una distancia muy pequeña, que será salvada décima a décima de milímetro hasta comenzar a rozar la pieza, momento a partir del cual se comienza a profundizar para realizar la entalla mediante un movimiento transversal. Haciendo avanzar manualmente unos 0.01 mm el carro del torno, de manera que la herramienta arranque de forma controlada una pequeña cantidad de material en cada pasada, hasta

la longitud de entalla necesaria en cada serie, como se puede apreciar en la figura 3.

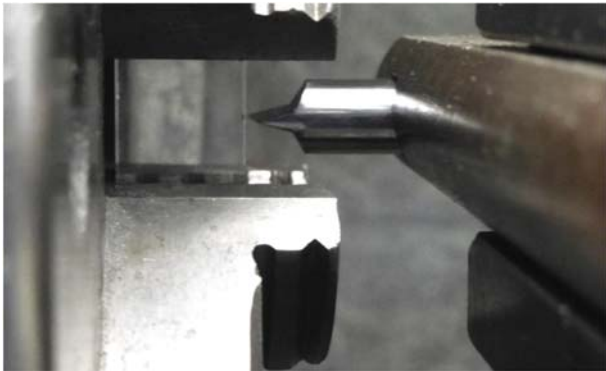


Figura 3. Detalle del proceso de mecanizado de la entalla en el torno.

En la figura 4 se observa un mosaico de imágenes de las probetas fabricadas. En la primera, se muestra una fotografía de una probeta completa tomada con una cámara digital compacta convencional. Se comprueba en esta fotografía que la entalla por su pequeño tamaño de décimas de milímetros es casi imperceptible; siendo la marca que se visualiza en la cara inferior una marca realizada con rotulador para facilitar el posicionamiento en la máquina de ensayo. El resto de las imágenes son macrografías realizadas con una magnificación x40 en una lupa binocular NIKON SMZ800 y una cámara INFINITY 2-3C-NS.

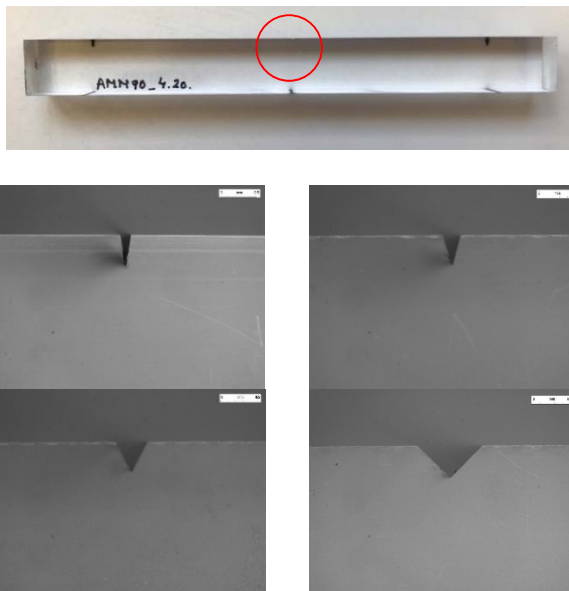


Figura 4. Fotografía de una probeta con entalla en la parte superior, y macrografía de los diferentes ángulos de entalla 15°, 30°, 55° y 90°.

3. ENSAYOS DE FLEXIÓN A TRES PUNTOS

El ensayo que se realiza tiene como objetivo la determinación de la carga de rotura de la probeta sometida a flexión en tres puntos. Para lo cual se utiliza una máquina universal de ensayos INSTRON 4482, que consta de una cruceta móvil con desplazamiento vertical controlado respecto a un bastidor fijo.

En el bastidor fijo se atornilla la parte inferior del útil del ensayo de flexión a tres puntos que incluye dos apoyos (rodillos), los cuales son posicionados a una distancia L . En la cruceta móvil se monta la célula de carga, en este caso de 5 KN, y se conecta a la consola de la máquina. Luego, se acopla el rodillo de carga a la cruceta móvil, mediante la célula de carga. El rodillo de carga debe estar centrado respecto a los rodillos fijos, o apoyos.

Una vez realizado el montaje se calibra la máquina, para que reconozca la célula de carga, y se sincroniza con el ordenador. Para comenzar el ensayo se posiciona la probeta en los apoyos y se acerca el rodillo de carga a la probeta sin llegar a aplicarle carga y se pone a cero el equipo. Este proceso se repetirá para cada probeta, tal y como se puede ver en la figura 5.



Figura 5. Máquina de ensayo INSTRON 4482 con el útil y la probeta para el ensayo tipo TPB.

Los ensayos se realizaron controlando la velocidad de desplazamiento de la cruceta, fijada a 1 mm/min. El

ensayo se detiene cuando se produce la rotura de la probeta. Para cada probeta ensayada se extraen datos de desplazamientos (mm) y fuerzas (N) cuya representación típica es similar a la mostrada en la figura 6.

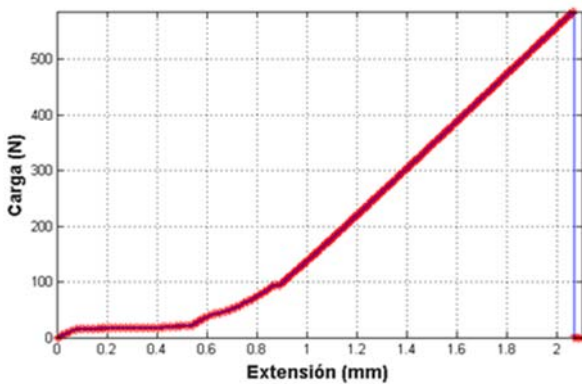


Figura 6. Resultados en valor absoluto extraídos de ensayar la probeta 20 de la serie 0.4.

En general las probetas tuvieron el comportamiento esperado durante los ensayos, apareciendo en ellas fracturas principalmente del tipo frágil y un comportamiento elástico lineal hasta el mismo instante de fractura.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Una vez realizados los ensayos, para poder valorar los resultados de forma más exacta y tener en cuenta todas las variables e información del ensayo, se miden las probetas, el espesor, la altura y la posición de los rodillos. Esta última dimensión se intenta que sea la misma en todos los ensayos: 120mm, pero no es posible posicionar la probeta siempre con la misma exactitud sobre los apoyos. Por este motivo, se realizan las medidas tras el ensayo para poder comprobar la variación y corroborar que son cercanas al valor indicado, aun así, se tienen en cuenta las posibles pequeñas variaciones que pudieran haberse producido.

Estos datos junto con los extraídos del ensayo son procesados, eliminando los datos de desplazamientos y fuerzas correspondientes al inicio del ensayo donde realmente no se está comprimiendo aun la probeta, sino que se produce un posicionamiento del rodillo de carga.

La fuerza de rotura aplicada a la probeta se mide directamente de los ensayos, los valores obtenidos se dividen por el espesor de la probeta, es decir queda como la fuerza entre la unidad de longitud que se representa frente al ángulo de entalla en la figura 7. Las líneas de tendencia mostradas en la figura 7 se calculan usando una aproximación polinomial de grado 4 (a través de la función *polyfit* del programa de Matlab) teniendo en cuenta los diferentes resultados para cada ángulo de entalla.

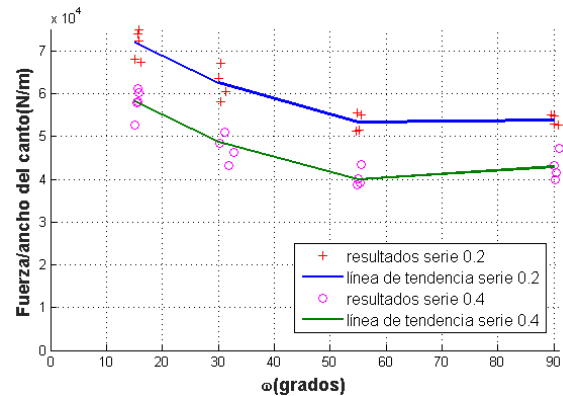


Figura 7. Resultados de ambas series y sus líneas de tendencia.

Al observar la figura 7 es fácil comprobar que se ha alcanzado el objetivo de este trabajo, debido a que la pendiente de la curva es descendente desde el ángulo de 15° hasta los 55° donde se produce un cambio dependiente en la curva, y no es intuitivo pensar que el valor de la carga en el ángulo nulo vaya a ser inferior a los valores obtenidos para los ángulos de 15° y 30°.

Análogamente, el tramo de 15° a 30° es descendente y no parece lógico que en esta zona aparezca un mínimo. No podemos decir lo mismo de la zona de 30° a 55° donde puede estar el mínimo y ser incluso menor que el valor obtenido en el ángulo de 55°. El tramo de 55° a 90° es muy amplio y puede que no contemple todo lo que ocurre en esa zona siendo posible un descenso de la carga más allá de los 55°. Adicionalmente, se obtuvieron resultados para un ángulo de 70°, sin embargo, la fabricación se realizó con una herramienta diferente a la utilizada en el resto de los ángulos. Al analizar estos resultados se observó una gran dispersión en los mismos por lo cual se concluyó que era debido a las diferencias en la fabricación de la entalla.

5. CONCLUSIONES

Los ensayos de flexión en tres puntos sobre probetas de PMMA con entallas de 0.2 y 0.4 mm realizados en este trabajo confirman que una cierta longitud de entalla puede provocar que el valor mínimo de la fuerza de rotura de la probeta se dé para ángulos distintos al nulo correspondiente a una grieta. Lo cual resulta sorprendente debido que para un ángulo de 0°, se espera que el orden de la concentración de tensiones sea mayor que para cualquier otro ángulo, a igual radio de redondeo en el fondo de la entalla, siendo por tanto la conclusión alcanzada con estos resultados no intuitiva.

La importancia de esta conclusión radica en que para un mismo material el ángulo para el cual se alcanza la fuerza de rotura mínima de la probeta puede variar con

la longitud de la entalla no siendo siempre igual al ángulo nulo.

Nótese que el fenómeno observado aparece también para las longitudes de entallas mayores, sin embargo, los ángulos críticos de entalla son pequeños para estas longitudes. Por tanto, en este trabajo se han elegido las longitudes de entalla del orden de décimas de milímetro por condiciones puramente de fabricación, debido a que entallas de longitudes mayores exigirían la fabricación de probetas con ángulos de entalla muy pequeños difíciles de realizar con exactitud.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Proyectos MAT2015-71036-P y MAT2015-71309-P).

REFERENCIAS

- [1] A. Carpinteri, Stress-singularity and generalized fracture toughness at the vertex of re-entrant corners, *Engineering Fracture Mechanics*, **26**, 143-155 1987.
- [2] A. Seweryn, Brittle fracture criterion for structures with sharp notches, *Engineering Fracture Mechanics*, **47**, 673-681, 1994.
- [3] M.L. Dunn, W. Suwito, S. Cunningham, Fracture initiation at sharp notches: correlation using critical stress intensities, *International Journal of Solids and Structures*, **34**, 3873-3883, 1997.
- [4] M. Strandberg, Fracture at V-notches with contained plasticity, *Engineering Fracture Mechanics*, **69**, 403-415, 2002.
- [5] F.J. Gómez, M. Elices, Fracture of components with V-shaped notches, *Engineering Fracture Mechanics*, **70**, 1913-1927, 2003.
- [6] A. Carpinteri, P. Cornetti, N. Pugno, A. Sapora, On the most dangerous V-notch, *International Journal of Solids and Structures*, **47**, 887-893, 2010.
- [7] A. Carpinteri, P. Cornetti, N. Pugno, A. Sapora, The problem of the critical angle for edge and center V-notched structures, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, **30**, 281-285, 2011.
- [8] A. Macías, Fractura en entallas tipo V, Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Sevilla, 2017.
- [9] UNE-EN ISO 7823. Plásticos. Hojas de Poli(metilmecacrilato). Tipos, dimensiones y características, AENOR, 2008.