



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de
Camino,s, Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



EFECTO ENTALLA EN LA FRACTURA DE ESPUMAS POLIMÉRICAS

Trabajo realizado por:

Iñigo Cabrera Goñi

Dirigido:

Marina Miranda Manzanares

Jorge Castro González

Titulación:

**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales
y Puertos**

Santander, septiembre de 2024

TRABAJO FIN DE MASTER

Resumen

Título: Efecto entalla en la fractura de espumas poliméricas.

Autor: Iñigo Cabrera Goñi.

Directores: Marina Miranda Manzanares, Jorge Castro González.

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Convocatoria: Septiembre 2024.

Palabras clave: Entalla, Fractura, Espumas poliméricas, Poliestireno Expandido, Tamaño de perlas, Tenacidad aparente, Teoría de las Distancias Críticas, probetas SENB.

El presente trabajo fin de máster aborda el análisis del comportamiento a fractura en presencia de entallas con diferentes radios de un material habitual en el ámbito de la edificación y construcción como es el poliestireno expandido. El estudio del material se realizó en base a ensayos de flexión en probetas con distintos radios de entalla y la aplicación de la Teoría de las Distancias Críticas, para relacionar la distancia crítica con el tamaño de grano del material.

El trabajo comenzó con la recopilación de información acerca de las características y el proceso de fabricación de las espumas poliméricas. De acuerdo con la información de partida, se estudiaron una espuma de baja densidad y otra de alta densidad de poliestireno expandido para comprobar las diferencias en su comportamiento mecánico. Se encargaron probetas normalizadas de acuerdo a la norma de ensayos de flexión con hasta cuatro tipos de radio de entalla distintos. Después, se eligieron los dispositivos adecuados para la realización de los ensayos de flexión en tres puntos de las probetas con entalla.

Previamente a la fase experimental, se midieron las probetas y la densidad de los materiales. Se ensayaron las probetas de las dos densidades, los cuatro tamaños de entalla y los dos fondos de entallas diferentes (semicircular y rectangular), llegando a un total de noventa y seis muestras ensayadas. También se calcularon los parámetros necesarios para caracterizar el material, en concreto la resistencia a tracción, mediante ensayos de flexión en probetas lisas sin entalla.

Se analizó el comportamiento de fractura en base a la Mecánica de la Fractura Elastoplástica con la integral de contorno J. Los resultados experimentales de la tenacidad aparente del material en presencia de entalla fueron analizados con la Teoría de las Distancia Críticas, obteniendo una aproximación adecuada con el método de la línea en las espumas de baja densidad, además de una tendencia del efecto entalla, donde la tenacidad del material aumenta con el incremento del radio de entalla. Por el contrario, en las espumas de alta densidad no se cumplió el efecto entalla y la aproximación más fiel a los ensayos fue la del método del punto.

Por último, se analizaron los mecanismos de fractura y la influencia del tamaño de las perlas. En las espumas de baja densidad que poseen un mayor tamaño de perla, la rotura se produce entre los contactos de las perlas. En las espumas de alta densidad con menor tamaño de perla, la fractura también es intergranular pudiendo producirse entre grupos de perlas fusionadas.

Abstract

Title: Notch effect in the fracture of polymeric foams.

Author: Iñigo Cabrera Goñi.

Directors: Marina Miranda Manzanares, Jorge Castro González.

Certificate: Master's Degree in Civil Engineering.

Call: September 2024.

Keywords: Notch, Fracture, Polymeric foams, Expanded Polystyrene, Bead size, Apparent fracture toughness, Theory of Critical Distances, Single Edge-Notched Bend specimens.

The present master's thesis addresses the analysis of fracture toughness behavior with different notch radii presence of a typical material in the field of building and construction such as expanded polystyrene. The study of the material was based on bending tests in specimens with different notch radii and the application of the Theory of Critical Distances, in order to relate the critical distance with the grain size of the material.

The study began with the information gathering on the characteristics and manufacturing process of polymeric foams. According to the initial information, a low-density foam and a high-density foam were studied to verify the differences in their mechanical behavior. Single Edge-Notched Bend specimens were ordered according to the bending test standards with up to four different notch radii. Later on, the appropriate devices for carrying out the three-point bending tests on SENB specimens were chosen.

Prior to the experimental phase, test specimens' measurements and the actual density were obtained. The tests were carried out on specimens of the two densities, the four notch radii and the two different notch tips (semi-circular and rectangular), bringing the total number of samples tested to ninety-six. The parameters required for the material characterization, the tensile strength to be exact, were also calculated by bending tests on non-defect specimens.

Afterwards the material fracture behavior was analyzed based on Elastic-Plastic Fracture Mechanics with the J-integral approach. Apparent fracture toughness experimental results were analyzed with the Theory of Critical Distances, obtaining a suitable approximation with the line method in low-density foams, in addition to an appreciable notch effect, where apparent fracture toughness increases along with the notch radii growth. Otherwise, high-density foams did not meet the notch effect and closest approximation to the test results was the point method.

Finally, fracture mechanisms and bead size influence were analyzed. In low-density foams with larger bead size, fracture occurs along the bead contact. In high-density foams with smaller bead size, fracture propagates also along contacts and may occur between fused bead groups.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Motivación y objetivos.....	4
1.2. Descripción de las espumas poliméricas.....	4
1.3. Proceso del Poliestireno Expandido.....	5
1.4. Mecánica de la fractura	6
1.4.1. Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL).....	7
1.4.2. Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP)	9
1.4.3. Teoría de las Distancia Críticas	12
2. MATERIALES	14
2.1. Selección de la muestra	14
2.2. Descripción del pedido.....	16
2.3. Caracterización de los materiales	18
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	20
3.1. Descripción del ensayo	20
3.1.1. Célula de carga	22
3.1.2. LVDT.....	23
3.2. Cálculo del módulo de elasticidad	25
3.3. Cálculo de la resistencia de tracción.....	25
3.4. Cálculos del comportamiento de fractura	27
3.4.1. Determinación de la tenacidad aparente.....	27
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
4.1. Ensayo para la determinación del módulo de elasticidad	29
4.2. Ensayo de flexión en tres puntos de muestras sin entalla.....	31
4.3. Ensayo de flexión en tres puntos de muestras con entalla	33
4.4. Granulometría.....	39
4.5. Análisis de las superficies de fractura	42
5. CONCLUSIONES	47
ANEJO I – Medidas de las probetas de ensayo	48
ANEJO II - Resultados de los ensayos a flexión en tres puntos	51
Referencias	61

Lista de figuras

Figura 1. Método de fabricación tradicional de espumas de poliestireno expandido. Fuente: [7]	5
Figura 2. Conformado final del EPS: (1) cierre y (2) llenado del molde, (3) vaporizado, (4) refrigeración y (5) extracción de la pieza moldeada. Fuente: [7]	6
Figura 3. Tensor de tensiones en un punto en función de la distancia al borde de fisura. Fuente: [11]	7
Figura 4. Modos de fractura. Fuente: [11]	8
Figura 5. Influencia del espesor en el FIT crítico (KC) en acero de alta resistencia. Fuente: [11]	9
Figura 6. Corrección de Irwin a la primera aproximación. Fuente: [11]	10
Figura 7. Zona plástica en el fondo de fisura según la segunda aproximación de Irwin. Fuente: [11]	10
Figura 8. Definición de CTOD. [11]	11
Figura 9. Representación del contorno arbitrario en el frente de grieta. Fuente: [11]	11
Figura 10. Variación de la disipación de energía en comportamiento no lineal. Fuente: [16]	12
Figura 11. Definición de los parámetros L y σ_0 mediante el método del punto. Fuente: [21]	13
Figura 12. Estructura de fusión de las perlas junto a marcas de regla de 1 mm en (a) EPS10 baja densidad, (b) EPS40 alta densidad.	14
Figura 13. Nomenclatura de las probetas de ensayo.	15
Figura 14. Comparativa entre entalla de fondo recto (H) y fondo semicircular (U).	16
Figura 15. Prueba de corte mecánico con sierra en una probeta lisa (D-1-U-1).	18
Figura 16. Cilindro encargado de aplicar la carga puntual en el centro de la probeta.	20
Figura 17. Velocidades disponibles en la máquina de ensayo.	21
Figura 18. Gráfica fuerza-desplazamiento en el programa Geolab.....	21
Figura 19. Ensayo con la célula de carga de 3500N empleada en las probetas EPS40 sin entalla.....	23
Figura 20. Ensayo con la célula de carga 500 N.....	23
Figura 21. LVDT 25 mm empleado para medir el desplazamiento en los ensayos.	24
Figura 22. Momento flector en una rebanada diferencial en centro de luz.	26
Figura 23. Determinación de PQ , 5% con la gráfica fuerza-desplazamiento. Fuente: [12].....	27
Figura 24. Ensayos de módulo en las probetas ligeras (L-1-U).....	29
Figura 25. Ensayos de módulo en las probetas densas (D-1-U).	29
Figura 26. Resultados experimentales del módulo de elasticidad en función de la densidad.....	30
Figura 27. Curva fuerza-desplazamiento de las probetas EPS10 sólidas (L-0-0).	31
Figura 28. Curva fuerza-desplazamiento de las probetas EPS40 sólidas (D-0-0).	32
Figura 29. Curva fuerza-desplazamiento de las probetas EPS40 entalla 2 mm (D-2-U).....	33
Figura 30. Análisis TCD mediante el LM en EPS10.....	35
Figura 31. Análisis TCD mediante el LM en EPS40.....	36
Figura 32. Análisis TCD mediante el PM en EPS10.	36

Figura 33. Análisis TCD mediante el PM en EPS40.	37
Figura 34. Mejores ajustes del LM y el PM en EPS10.	37
Figura 35. Mejores ajustes del LM y el PM en EPS40.	38
Figura 36. Perlas junto a marca de regla de 1 mm de(a) EPS10 baja densidad, (b) EPS40 alta densidad.....	39
Figura 37. Distribución de los diámetros de las perlas ligeras.	40
Figura 38. Curva granulométrica de las perlas ligeras.....	40
Figura 39. Distribución de los diámetros de las perlas densas.....	41
Figura 40. Curva granulométrica de las perlas densas.	41
Figura 41. Propagación de la fisura en probetas ligeras (a) L-16-U-1 y (b) L-4-U-3.	43
Figura 42. Propagación de la fisura en probetas densas (a) D-16-U-2 y (b) D-4-U-2.	43
Figura 43. Sección lateral y transversal de una probeta ligera con entalla H (L-16-H-6).	44
Figura 44. Sección lateral y transversal de una probeta densa con entalla H (D-8-H-6).....	44
Figura 45. Sección lateral y transversal de una probeta ligera con entalla U de 2 mm (L-2-U-5).....	45
Figura 46. Sección lateral y transversal de una probeta densa con entalla U de 2 mm (D-2-U-6).	45
Figura 47. Sección lateral y transversal de una probeta ligera con entalla U de 8 mm (L-8-U-6).....	46
Figura 48. Sección lateral y transversal de una probeta densa con entalla U de 8 mm (D-8-U-3).	46

Lista de tablas

Tabla 1. Medidas teóricas de las probetas de ensayo.....	15
Tabla 2. Resumen del pedido de probetas lisas y con entalla de fondo semicircular (U).....	17
Tabla 3. Resumen del pedido de probetas con entalla de fondo recto (H).....	17
Tabla 4. Caracterización de la densidad de los materiales de estudio.....	18
Tabla 5. Resultados experimentales del módulo de elasticidad del EPS.....	30
Tabla 6. Resultados de los ensayos de tracción.	32
Tabla 7. Resultados experimentales del ensayo de fractura en las probetas U.....	34
Tabla 8. Resultados experimentales del ensayo de fractura en las probetas H.....	34
Tabla 9. Resultados obtenidos de L y K_{mat} en LM.	38
Tabla 10. Resultados obtenidos de L y K_{mat} en PM.	38
Tabla 11. Resumen de resultados del tamaño de grano.	41

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y objetivos

Las espumas poliméricas tienen múltiples aplicaciones en el campo geotécnico y de las estructuras como pueden ser en terraplenes, muros de contención, estabilización de pendientes, estribos de puentes y bajo pavimentos asfálticos. En ocasiones, los bloques de espumas poliméricas pueden estar apilados en capas múltiples, llegando a sufrir los efectos de las cargas muertas y vivas a las que están sometidas las estructuras a las que complementan.

En este trabajo fin de máster se tratará de analizar el comportamiento a fractura y la influencia del efecto entalla en espumas poliméricas, centrándonos en la caracterización de las espumas de poliestireno expandido (EPS). El estudio se realizará en base a ensayos de flexión sobre probetas con diferentes radios de entalla y a la utilización de la Teoría de las Distancias Críticas (TCD) para analizar los resultados. La TCD emplea una propiedad intrínseca de los materiales, denominada distancia crítica (L), para evaluar el campo de tensiones alrededor de la entalla. Se pretende relacionar la distancia crítica con el tamaño de grano al ser este relativamente uniforme y producirse una rotura intergranular como ocurre en otros materiales, por ejemplo, en las rocas y buscar analogías en su comportamiento [1].

1.2. Descripción de las espumas poliméricas

Las espumas poliméricas son materiales compuestos de una matriz tridimensional que contienen una red de celdas y burbujas de gas distribuidas uniformemente, confiriéndoles una estructura ligera y sumamente porosa. Las espumas pueden clasificarse como estructuras de células abiertas, cuando el material permanece en los bordes de la célula; y de células cerradas también está presente en las caras celulares [2]. Estructuralmente, las espumas poliméricas tienen una buena capacidad de absorber energía en compresión, pero son frágiles en tracción [3]. Una cualidad importante, las propiedades de las espumas poliméricas se pueden ajustar fácilmente controlando el tamaño del poro, la densidad relativa, la estructura celular y los aditivos. Por ejemplo, Bai et al. (2018) [4] demostraron que el tamaño de célula y la densidad de la espuma se podían ajustar controlando las condiciones de formación de la espuma, dando lugar a propiedades mecánicas del material controladas.

Las propiedades de la espuma determinan sus aplicaciones, y en el caso de las espumas de poliestireno podemos encontrar los siguientes tipos [5]:

- Poliestireno Cristal (PS cristal). Es una versión rígida, transparente y quebradiza. Se utiliza en envases y productos que requieren claridad óptica.
- Poliestireno de Alto Impacto (HIPS). Se trata de una variante más resistente al impacto, no quebradizo y opaco. Se obtiene gracias a la incorporación de caucho.
- Poliestireno Expandido (EPS). Es ligero y de estructura celular abierta. Está compuesta en un 95% del peso en poliestireno y un 5% de gas, encargado de la formación de burbujas que reducen su densidad.
- Poliestireno extruido (XPS). Se trata de una espuma rígida (estructura celular cerrada) obtenida de la inyección de gas en Poliestireno Cristal. Es similar al EPS, pero más denso y resistente al agua que este.

Las espumas de poliestireno expandido (EPS) son ampliamente utilizadas en el sector industrial, de la construcción, arquitectura e incluso automovilístico. Comparadas con otros tipos de poliestireno, el EPS tiene una menor densidad, una menor conductividad térmica y mayor capacidad portante en relación a su peso [6].

1.3. Proceso del Poliestireno Expandido

El método tradicional de fabricación del Poliestireno Expandido (EPS) se produce mediante el moldeo de las perlas de poliestireno previamente expandidas (Fig. 1).

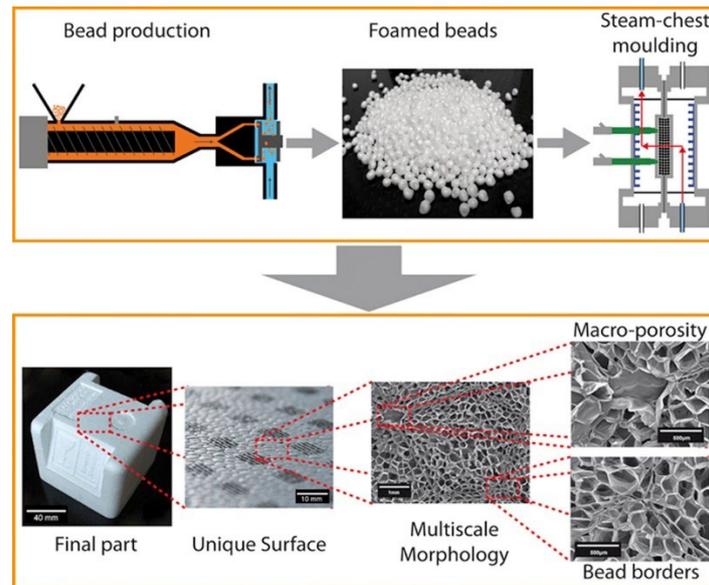


Figura 1. Método de fabricación tradicional de espumas de poliestireno expandido. Fuente: [7]

Este proceso consta de 3 fases principales:

- 1) Pre-expansión. Se introduce una cantidad determinada de perlas de poliestireno en el tanque pre-espumador. Dentro del tanque se hace circular vapor de agua a través de las perlas, además se añade una pequeña fracción (un 5% del peso aproximadamente) de pentano, al ser un agente expansor. Las perlas consiguen aumentar su volumen hasta 40 veces el volumen original. Finalizada la pre-expansión, las perlas son transferidas a un silo de almacenamiento.
- 2) Curado. Los materiales se enfrían dentro del silo y el pentano se licua creando un vacío parcial dentro de la perla. Las perlas de poliestireno pre-expandidas se almacenan entre 12 y 24 horas para ayudar al curado y permitir que el aire se difunda dentro de ellas.
- 3) Conformado final. Se transfiere la cantidad necesaria de perlas al molde. En su interior se hace circular otra vez vapor de agua alrededor de las perlas. La segunda expansión permite que las perlas aumenten su volumen hasta un 10% más y se fusionen entre sí. Una vez terminada la vaporización, se refrigera y se extrae el bloque de EPS conformado (Fig. 2). Después, se limpia el molde aspirando el agua condensada y el calor residual. Finalmente, Los bloques de EPS son enfriados, cortados y almacenados [8].

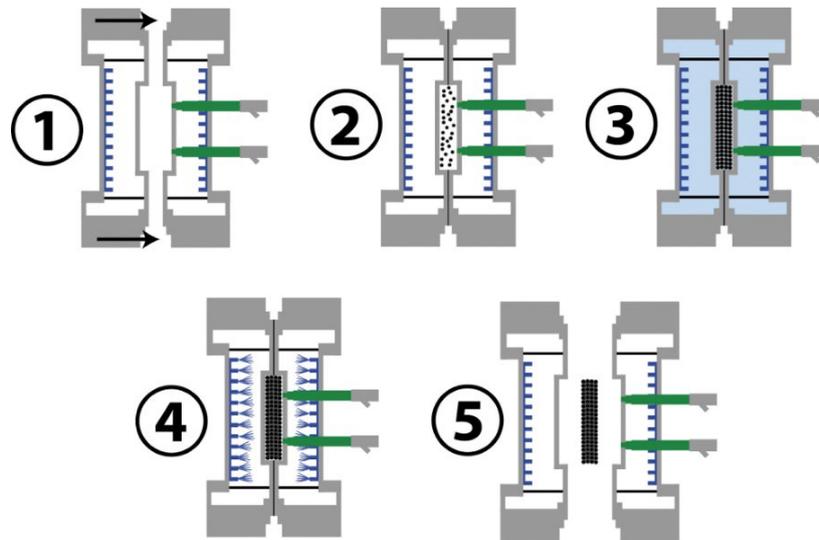


Figura 2. Conformado final del EPS: (1) cierre y (2) llenado del molde, (3) vaporizado, (4) refrigeración y (5) extracción de la pieza moldeada. Fuente: [7]

La densidad del poliestireno expandido es una de sus principales características puesto que condiciona su resistencia, durabilidad y sus propiedades de aislamiento. Como norma general un EPS de mayor densidad tendrá un mejor comportamiento aislante y resistente a compresión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requiera una mayor integridad estructural.

Las densidades comunes para el EPS van desde alrededor de 10 kg/m³ para aislamientos muy ligeros hasta más de 40 kg/m³ para aplicaciones de aislamiento o estructurales de alta densidad. Las distintas densidades del poliestireno expandido se obtienen dependiendo del proceso de fabricación, se realizan ajustes en varios parámetros como la presión del vapor, temperatura, tiempo de reposo, tamaño de perlas y el tiempo de procesado para obtener la densidad deseada. En el caso del EPS de alta densidad, las perlas pre-expandidas se someten a presiones más altas y a tiempos de moldeo más largos para crear una espuma más densa. Las perlas son sometidas a múltiples etapas de moldeo y enfriamiento para conseguir una estructura de espuma muy compacta con mayor resistencia y durabilidad. [9]

Recientes estudios revelan la posibilidad de fabricar espumas de poliestireno con tecnología de impresión 3D con resultados satisfactorios en cuanto a la porosidad y resistencia a compresión obtenidas. Este proceso consiste en la sinterización selectiva por láser (SLS), donde se va construyendo por capas con la base de polvo no ligada en cada fila de cavidades, hasta fusionar todas las capas de materiales en una pieza definitiva. [10]

1.4. Mecánica de la fractura

La Mecánica de la Fractura es la rama de la ciencia que se enfoca en estudiar el comportamiento mecánico de sólidos en presencia de grietas. A través de este campo de estudio, se buscan respuestas a las cuestiones que surgen al existir fisuras en los materiales, con el objeto de predecir las condiciones que produzcan el fallo o rotura del elemento.

Los orígenes de la mecánica de la fractura se remontan a inicios del siglo XX, cuando Griffith desarrolló la relación entre la fractura de sólidos frágiles y el tamaño de los defectos. En los años 50, Irwin continuó con el avance en este campo al demostrar que la aproximación energética (G) es equivalente a la aproximación de intensidad de tensiones (K), donde la fractura se produce cuando se alcanza una distribución crítica de

tensiones en el borde de fisura. Las demostraciones de la equivalencia entre G y K sirvieron de base para el desarrollo de la disciplina de Mecánica de la Fractura Elástico Lineal (MFEL).

La Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP) no se desarrolló hasta los años 60, gracias a las teorías que incorporaban la zona plástica de los materiales. Los trabajos de Wells (1961) en el Desplazamiento de Apertura de Fisura (CTOD) y de Rice (1968) con las bases de la integral J supusieron un gran avance en la caracterización de materiales con grandes deformaciones no lineales antes de la fractura [11].

1.4.1. Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL)

El problema de propagación de fisura en Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL) se formuló en función de tensiones y desplazamientos gracias a los trabajos de Irwin y otros investigadores: Westergaard, Sneddon y Williams. Este modelo asume una fisura idealizada y un material perfectamente elástico lineal con isotropía (mismo comportamiento mecánico en las tres direcciones), determinando la distribución tensional en el frente de fisura [11].

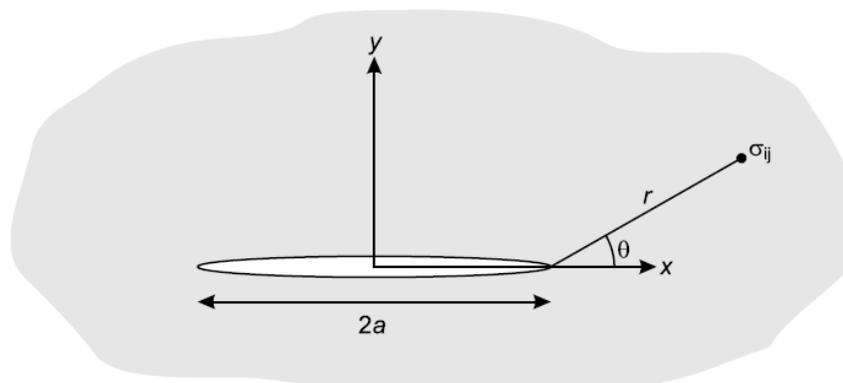


Figura 3. Tensor de tensiones en un punto en función de la distancia al borde de fisura. Fuente: [11]

La ecuación 1 [11] muestra el estado tensional de cualquier punto del material con relación a su distancia, en coordenadas polares, del frente del defecto (Fig. 3). De forma teórica, si la posición del punto es muy próxima al frente de fisura ($r \rightarrow 0$) las tensiones tienden a infinito ($\sigma_{ij} \rightarrow \infty$).

$$\sigma_{ij} = \frac{k}{\sqrt{r}} f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (1)$$

- **Modos de fractura**

Existen tres modos diferentes de fractura, en otras palabras, tres tipos de estados tensionales que pueden afectar a un defecto en un sólido (Fig. 4). Estos modos se clasifican según la dirección en la que actúa la fuerza externa en relación con el plano de fisura.

- Modo I (De apertura o Tracción): Los esfuerzos son perpendiculares al plano de fisura.
- Modo II (De deslizamiento o Cortante): Los esfuerzos son paralelos al plano de fisura.
- Modo III (De desgarró o Torsión): Los esfuerzos se producen fuera del plano de fisura, en dirección perpendicular al borde grieta.

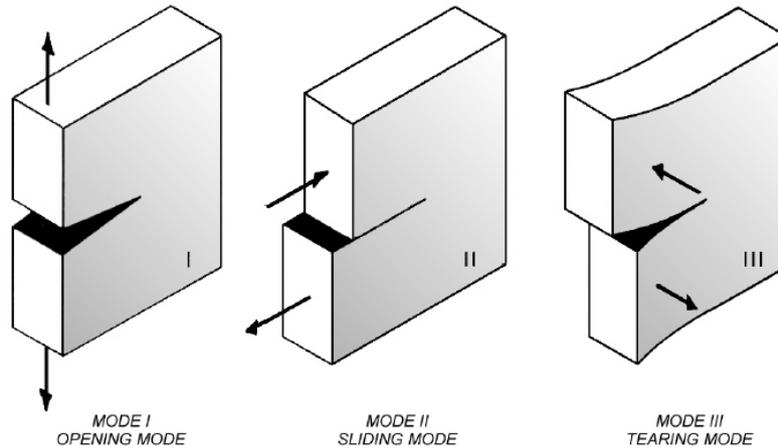


Figura 4. Modos de fractura. Fuente: [11]

El estado tensional en una grieta es la suma de los modos de fractura a los que se encuentra sujeto un elemento (Ec. 2), siendo el Modo I el más habitual e importante desde el punto de vista estructural.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{(I)} + \sigma_{ij}^{(II)} + \sigma_{ij}^{(III)} \quad (2)$$

Simplificando la expresión de la ecuación 1, el campo de tensiones en las proximidades del frente de grieta para el modo I quedaría definido por la ecuación 3.

$$\sigma_{ij}^{(I)} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(I)}(\theta) \quad (3)$$

No se detallan las ecuaciones de los otros modos de fallo puesto que este trabajo se centra solamente en los esfuerzos del modo I.

- **Tenacidad a fractura**

El Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) determina el estado tensional en las proximidades del frente de fisura, siendo K_I el correspondiente al modo I (Ec. 4). El FIT depende de la tensión aplicada (σ), las características del defecto (a) y un factor geométrico (Y) que varía según la posición y forma de la fisura.

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4)$$

En Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL), se utiliza el Factor de Intensidad de Tensiones Crítico (K_{IC}) para predecir el comportamiento de fractura en estructuras. El FIT crítico depende de la temperatura ambiente, el espesor de las probetas y de las restricciones del ensayo. En la figura 5. se muestra la relación del valor crítico de fractura con el espesor.

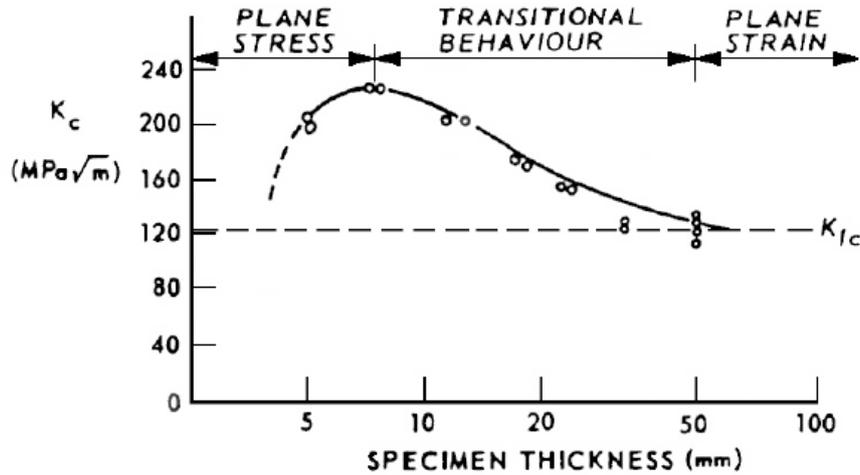


Figura 5. Influencia del espesor en el FIT crítico (K_C) en acero de alta resistencia. Fuente: [11].

A partir de ciertos espesores, el material se encuentra predominantemente en estado de deformación plana, donde el valor de K_C tiende a un límite constante conocido como K_{IC} , tenacidad a fractura en deformación plana. K_{IC} se considera una propiedad del material, aunque depende de la temperatura ambiente del ensayo y velocidad de aplicación de la carga [11].

La condición de fractura se produce cuando el FIT alcanza el valor crítico (Ec. 5).

$$K_I = K_{IC} \quad (5)$$

Para estar del lado de la seguridad, los ensayos se han de realizar normalmente en estados de deformación plana para obtener los valores de tenacidad crítica mínima (K_{IC}).

Se han de cumplir las siguientes condiciones de espesor (B) y longitud de entalla (a) (Ec. 6) para garantizar el estado de deformación plana en un ensayo de fractura [12].

$$B, a, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y} \right)^2 \quad (6)$$

1.4.2. Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP)

En la caracterización de la fractura de materiales frágiles o con zona plásticas pequeñas, la teoría de MFEL nos proporciona una buena aproximación. Sin embargo, existen modificaciones de la Mecánica de Fractura Elástico Lineal cuando la plasticidad en el frente de la fisura es considerable. Esta nueva teoría se conoce como Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP). Más adelante se explicarán los dos parámetros principales en los que se basa: la apertura del frente de fisura (CTOD) y la integral J de contorno.

Estudiando el comportamiento en el frente de grieta, el estado tensional obtenido con la ecuación 3 en el plano de fisura ($\theta = 0$) para el modo I sería:

$$\sigma_{yy}(\theta = 0) = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (7)$$

Como se ha explicado, cuando la distancia al frente de fisura es muy pequeña ($r \rightarrow 0$) las tensiones tienden teóricamente a infinito al ser un punto concentrador de tensiones. En la práctica, los materiales no son capaces de resistir tensiones infinitas, por lo que se produce una plastificación local y una relajación de tensiones en el borde de fisura.

La primera aproximación del tamaño de la zona plástica (r_p) se obtuvo despejando de la ecuación 7. La tensión máxima queda marcada por el límite elástico del material (σ_y).

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (8)$$

Esta primera aproximación consideraba un material elastoplástico perfecto. Sin embargo, Irwin (1997) [13] demostró como la zona plástica era superior en la realidad y aplicó una corrección. La segunda aproximación de Irwin suponía un incremento teórico de la fisura Δa_n (Fig. 6).

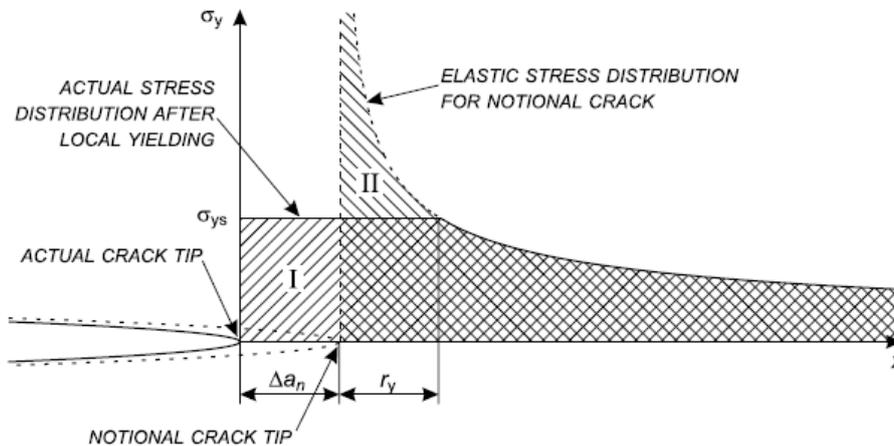


Figura 6. Corrección de Irwin a la primera aproximación. Fuente: [11]

La distancia de la zona plástica (r_p) en la segunda aproximación de Irwin (Fig. 7) resulta el doble respecto al valor de la primera aproximación. En la siguiente ecuación se muestra la expresión final:

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (9)$$

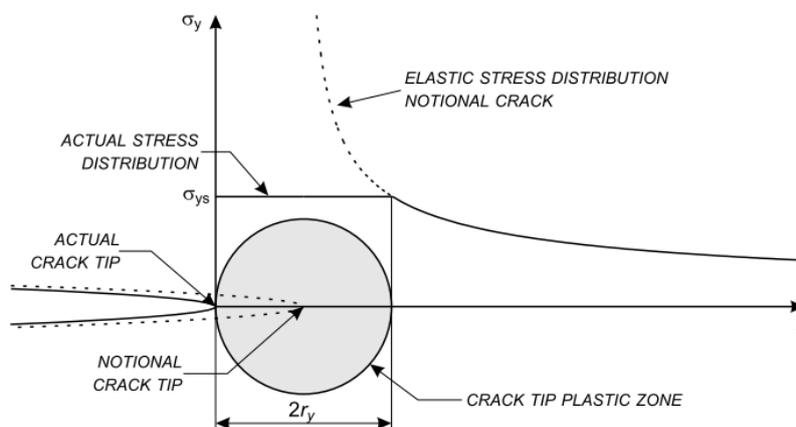


Figura 7. Zona plástica en el fondo de fisura según la segunda aproximación de Irwin. Fuente: [11]

- CTOD

El análisis de la apertura del frente de fisura, conocida como CTOD o Crack Tip Opening Displacement, surge tras los trabajos de Wells (1961) al caracterizar materiales con una gran deformación plástica antes de la fractura como son los aceros estructurales.

Es un parámetro que describe la apertura de punta de grieta bajo condiciones de carga, representando la distancia entre las dos caras (Fig. 8). La aproximación del CTOD es comúnmente empleada en MFEP donde el fallo se produce cuando la apertura de grieta alcanza un valor crítico [14].

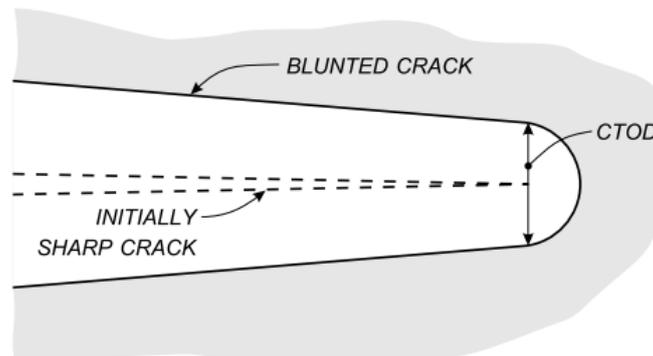


Figura 8. Definición de CTOD. [11]

- La integral J

En mecánica de la fractura elastoplástica (MFEP), el campo de tensiones y deformaciones en el frente de grieta queda definido por la integral de contorno J (Fig. 9). Este parámetro fue introducido por Rice (1968) [15] para dar solución a materiales con una gran zona plástica en el frente de fisura.

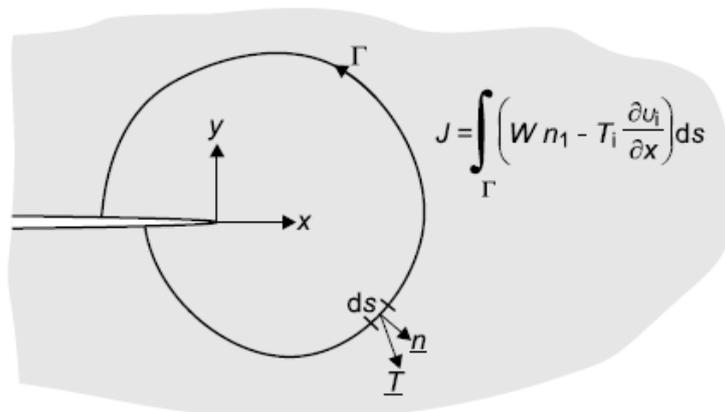


Figura 9. Representación del contorno arbitrario en el frente de grieta. Fuente: [11]

Rice estableció que la integral J podía relacionar el flujo de disipación de energía (U) con la longitud de fisura (Fig. 10), a desplazamiento constante, con la ecuación 10.

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (10)$$

Donde B es el espesor de la probeta y (dU/da) la tasa de disipación de energía.

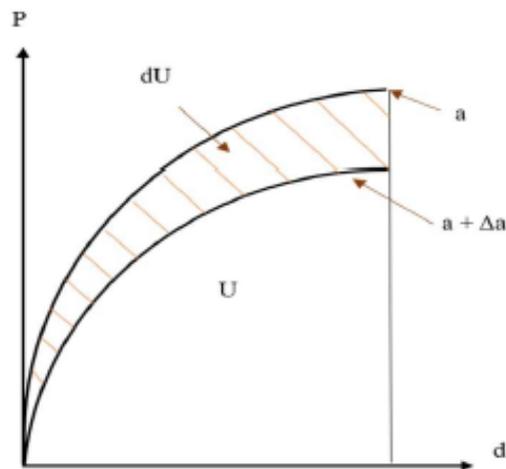


Figura 10. Variación de la disipación de energía en comportamiento no lineal. Fuente: [16]

El criterio de crecimiento de fisura comienza cuando la integral J alcanza el valor crítico J_{IC} [17]:

$$J \geq J_{IC} \quad (11)$$

1.4.3. Teoría de las Distancia Críticas

La Teoría de las Distancias Críticas (TCD) son un grupo de metodologías desarrolladas por Taylor (2008) [18], utilizadas para predecir los efectos de entallas y otras características de la concentración de tensiones. Esta teoría emplea un parámetro característico de longitud en las evaluaciones de fractura, la distancia crítica (L).

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (12)$$

Donde K_{mat} o K_{IC} es la tenacidad a fractura del material y σ_0 la tensión inherente. La tensión inherente es un parámetro resistente del material que se calcula experimentalmente y, en el caso de los polímeros, es superior a la tensión última de tracción, σ_t . En otras palabras, la teoría de las distancias críticas define que el fallo se produce cuando una distancia dependiente de la tensión equivalente alcanza la tensión inherente (Fig. 11) [19].

Dentro de la TCD existen hasta cuatro enfoques diferentes, todos ellos utilizan el parámetro L junto con un análisis elástico lineal: dos de estos se basan en el campo de tensiones, y los otros dos están basados en el Factor de Intensidad de Tensiones [20]. En este trabajo se van a analizar las dos primeras metodologías: la del Punto y la de la Línea.

- **Método del Punto (PM)**

El PM es la aproximación más sencilla al problema, asumiendo que la fractura se produce cuando la tensión equivalente es igual a σ_0 calculada a cierta distancia de frente de fisura, r_c . Por medio de demostraciones, asumiendo un comportamiento elástico lineal, se ha comprobado que r_c es la mitad de la distancia crítica, L . El criterio de fallo se muestra en la ecuación 13.

$$\sigma\left(\frac{L}{2}\right) = \sigma_0 \quad (13)$$

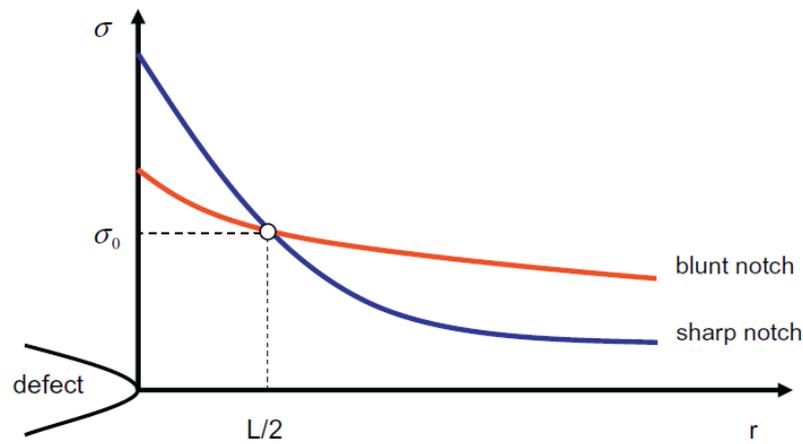


Figura 11. Definición de los parámetros L y σ_0 mediante el método del punto. Fuente: [21]

La expresión final para determinar K_{mat}^N o K_{IN} , la tenacidad aparente del material en presencia de entalla “notch”, mediante el PM es la siguiente:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \frac{\left(1 + \frac{\rho}{L}\right)^{3/2}}{\left(1 + \frac{2\rho}{L}\right)} \quad (14)$$

Donde K_{mat} es la tenacidad a fractura, ρ es el radio de entalla y L la distancia crítica.

- **Método de la línea (LM)**

Está basado en los mismos principios que el PM, con la diferencia que el parámetro tensional utilizado es la tensión media a lo largo de una distancia d que empieza en el frente de grieta en lugar de a una distancia r_c . En este caso, la distancia a analizada d es igual a $2L$ (Ec. 15).

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (15)$$

La solución analítica del LM para la tenacidad aparente del material es la siguiente:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{\frac{\rho}{4L} + 1} \quad (16)$$

2. MATERIALES

2.1. Selección de la muestra

La preparación del ensayo de flexión en tres puntos comenzó con la fabricación y acondicionamiento de los especímenes SENB (Single Edge-Notched Bend). La muestra elegida consistió en probetas rectangulares de 2 tipos de espumas poliméricas con distintos radios de entalla.

Las densidades elegidas tras consultar con proveedores y bibliografía fueron de 10 kg/m³ y 40 kg/m³, siendo estos dos tipos el rango habitual de las densidades comerciales. Una de ellas representa al EPS de baja densidad y la otra a una espuma de alta densidad. De esta forma se pudo comprobar las diferencias de comportamiento mecánico en función del tipo de densidad y se analizó la influencia del tamaño de grano, ya que en la muestra de baja densidad las perlas son de mayor tamaño al existir un mayor volumen de aire en su interior (Fig. 12.a y 12.b).

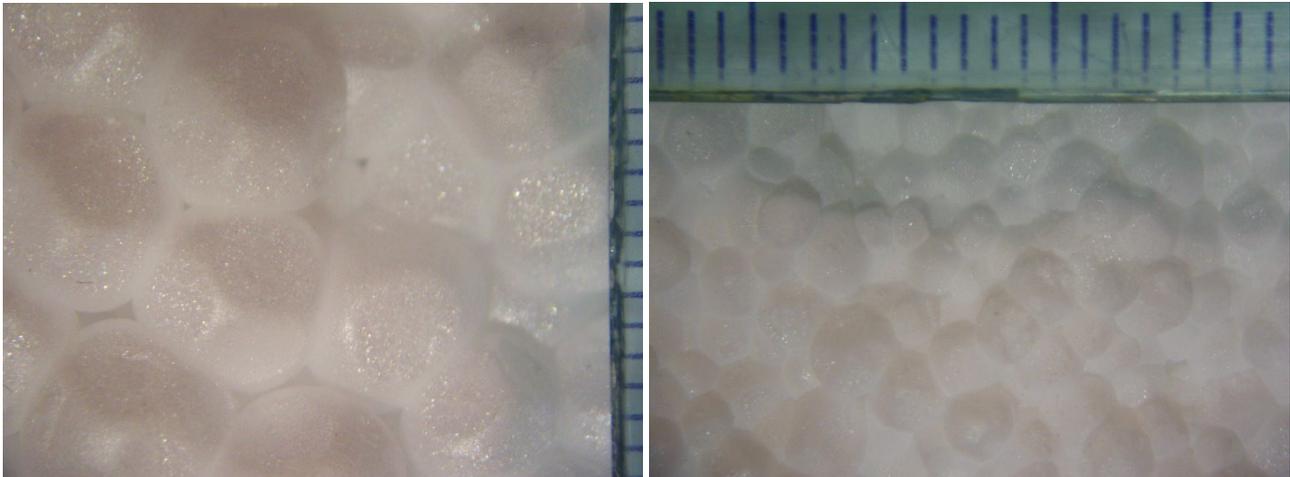


Figura 12. Estructura de fusión de las perlas junto a marcas de regla de 1 mm en (a) EPS10 baja densidad, (b) EPS40 alta densidad.

Inicialmente se decidieron preparar muestras con 5 tipos de radios de entalla para analizar el efecto en el material de estudio:

- Radio mínimo de corte, anchura inferior a 1 mm.
- Anchura de entalla de 2 mm.
- Anchura de entalla de 4 mm.
- Anchura de entalla de 8 mm.
- Anchura de entalla de 16 mm.

Adicionalmente a las probetas entalladas se analizaron probetas lisas, sin ningún tipo de muesca, para la obtención de la resistencia a tracción. Para que la muestra sea representativa se fabricaron al menos 6 probetas de cada tipo.

Las dimensiones de las probetas rectangulares incluyendo su longitud, ancho, grosor y longitud de entalla fueron elegidas de acuerdo con la normativa internacional *ASTM D5045-14* [12], para asegurar la validez de los resultados del ensayo.

El espesor (B) de la probeta debe ser la mitad que la altura (W). Mientras que la longitud (l) al menos debe ser 4,4 veces la altura (W) de la probeta. Además, la relación entre la longitud inicial de entalla ($a_0 = 80 \text{ mm}$) y la altura total (W) debe estar dentro del rango $0,45 \leq \frac{a_0}{W} \leq 0,55$ en todos los casos.

Las medidas teóricas de las probetas, cumpliendo con la normativa a utilizar, se muestran la tabla 1.

Parámetro		Valor
Longitud	l	720 mm
Altura	W	160 mm
Espesor	B	80 mm
Fondo	f	80 mm
Longitud entalla	a_0	80 mm
Corte	t	variable

Tabla 1. Medidas teóricas de las probetas de ensayo.

La nomenclatura de las probetas rectangulares empleadas en el presente trabajo se muestra en la figura 13.

- l Longitud de la probeta
- B Espesor de la probeta.
- W Altura de la probeta.
- L Luz entre apoyos.
- f Fondo
- a_0 Longitud inicial de entalla.
- 2ρ Diámetro de entalla interior
- s Anchura de entalla intermedia
- t Anchura de entalla exterior

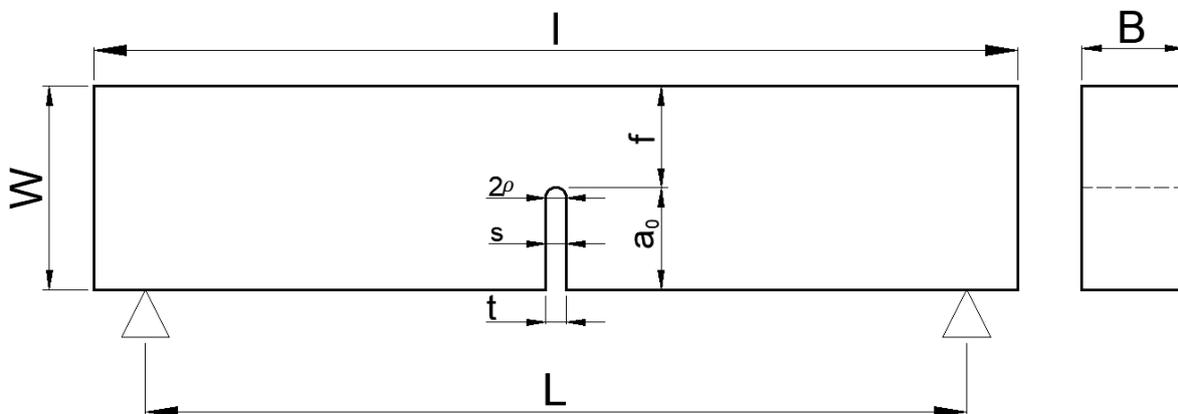


Figura 13. Nomenclatura de las probetas de ensayo.

En el Anejo I – Medidas de las probetas de ensayo se incluyen todas las medidas reales utilizadas a lo largo del desarrollo de la fase experimental.

2.2. Descripción del pedido

La fabricación de las probetas fue encargada a la empresa PLAESA (Planchas, Aislamientos y Embalajes S.L.). El proceso de fabricación se realizó por moldeo y corte de las planchas de poliestireno expandido. El corte de las entallas la realizaron mediante hilo caliente.

El método de entallado por hilo proporcionó resultados bastante satisfactorios en las entallas de 2, 4, 8 y 16 mm de anchura. Por otro lado, para el radio inferior a 1 mm, la empresa proveedora no podía garantizar un corte de tal precisión ya que al introducir el hilo caliente ya quemaba más ancho del deseado. Es por este motivo por el que se decidió encargar ese lote de probetas sin entallar y tratar de hacer el corte por medios mecánicos en el laboratorio.

El encargo de las muestras de poliestireno expandido fue recibido en 2 pedidos distintos. En el primero de ellos las probetas recibidas tenían el fondo de entalla recto, lo que a partir de ahora llamaremos entalla en forma H. Esta forma no era la deseada para realizar los ensayos SENB ya que la fisura en el ensayo puede iniciarse en cualquier parte de la entalla, normalmente en alguna de las dos esquinas que concentran más la tensión, lo que dificulta su interpretación teórica. Este defecto en la fabricación de las muestras fue corregido en el segundo encargo, donde las entallas tenían la forma semicircular en U requerida para controlar la iniciación de la fisura (Fig. 14).



Figura 14. Comparativa entre entalla de fondo recto (H) y fondo semicircular (U).

En la fase experimental se ensayaron todas las probetas entalladas, incluidas las probetas H, puesto que también tuvieron su utilidad para poder calibrar los aparatos de ensayo.

Con todo lo anteriormente explicado el encargo recibido por parte de PLAESA se resume en las tablas 2 y 3.

Densidad nominal (kg/m ³)	Radio entalla (mm)	Diámetro entalla (mm)	Nº Probetas	Código
10	-	-	6	L-0-0
10	-	-	6	L-1-U
10	1	2	6	L-2-U
10	2	4	6	L-4-U
10	4	8	6	L-8-U
10	8	16	6	L-16-U
40	-	-	6	D-0-0
40	-	-	6	D-1-U
40	1	2	6	D-2-U
40	2	4	6	D-4-U
40	4	8	6	D-8-U
40	8	16	6	D-16-U

Tabla 2. Resumen del pedido de probetas lisas y con entalla de fondo semicircular (U).

Densidad nominal (kg/m ³)	Anchura entalla (mm)	Nº Probetas	Código
10	2	6	L-2-H
10	4	6	L-4-H
10	8	6	L-8-H
10	16	6	L-16-H
40	2	6	D-2-H
40	4	6	D-4-H
40	8	6	D-8-H
40	16	6	D-16-H

Tabla 3. Resumen del pedido de probetas con entalla de fondo recto (H).

Para finalizar la fase de preparación de muestras se realizó una prueba para obtener el corte de entalla mínimo mediante medios mecánicos (a realizar en las probetas L-1-U y D-1-U). Sin embargo, el corte con sierra (Fig. 15) no resultó satisfactorio por varios motivos:

- No se pudo garantizar la linealidad de la entalla.
- La sierra resultó demasiado destructiva para la espuma, desligándose un gran número de perlas.
- El calor producido alteró el estado de las perlas remanentes.

Por estas razones se decidió descartar la entalla de radio mínimo y se ensayaron los otros 4 tipos de entalla que si pudieron ser posibles de llevar a cabo.



Figura 15. Prueba de corte mecánico con sierra en una probeta lisa (D-1-U-1).

2.3. Caracterización de los materiales

Para finalizar esta fase preparatoria, se midieron las densidades reales de los materiales. Como ya se ha explicado previamente, la densidad es una de las características principales del Poliestireno Expandido, siendo fundamental para determinar su comportamiento mecánico.

En la tabla 4 se muestra la comparativa de la densidad comercial y la densidad real de los materiales mediante el tarado de 6 muestras lisas (sin entalla) de EPS de cada material (L-1-U y D-1-U). Los valores individuales de densidad obtenidos se incluyen en el *Anejo I – Medidas de las probetas de ensayo*.

Espumas	Densidad Nominal	Densidad real (kg/m ³)		
		Valor mínimo	Valor máximo	Media
EPS 10	10	8,92	9,47	9,17
EPS 40	40	39,55	43,12	40,78

Tabla 4. Caracterización de la densidad de los materiales de estudio.

Los valores medios obtenidos de densidad real, 9,17 kg/m³ en el EPS10 y 40,78 kg/m³ en el EPS40, nos ayudarán en la estimación de parámetros característicos de ambos materiales, como puede ser el coeficiente de Poisson. Esta propiedad de las espumas de poliestireno ha sido un tema muy controvertido entre varios autores. Mientras que las espumas poliméricas normales tienen un coeficiente de Poisson positivo, en las espumas de poliestireno expandido pueden llegar a desarrollar un valor negativo de dicho coeficiente al superar el límite elástico. No obstante, es muy reconocida la regresión de ν desarrollada por Horvath (1995) [22], siendo esta ecuación muy aceptada por varios autores y asegurando una aproximación satisfactoria en la zona elástica del poliestireno expandido [23,24].

De acuerdo con los resultados de Horvath (1995), el coeficiente de Poisson (ν) de las espumas de EPS se puede expresar en términos de su densidad (Ecuación 17).

$$\nu = 0,0056\rho - 0,0024 \quad (17)$$

Donde ρ es la densidad real del EPS en kg/m³.

Estas son las estimaciones del coeficiente de Poisson, basadas en la ecuación de regresión de Horvath (1995), para las dos densidades reales:

- EPS 10 de baja densidad: $\nu = 0,05$
- EPS 40 de alta densidad: $\nu = 0,23$

Siendo estos valores bastante razonables atendiendo a autores que comprobaron como en el EPS de baja densidad el coeficiente de Poisson es prácticamente cero [25].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. Descripción del ensayo

Los ensayos de flexión en tres puntos en probetas lisas (sin entalla) y en muestras entalladas SENB (Single Edge-Notched Bend) se han realizado de acuerdo al protocolo de la normativa internacional *ASTM D5045-14* para materiales plásticos en condiciones de deformación plana [12].

Tras la fase preparatoria, la caracterización de las muestras queda recogida en el *Anejo I – Medidas de las probetas de ensayo*; el siguiente paso es la colocación de las probetas en el dispositivo de ensayo. La probeta de EPS se apoyaron en su parte inferior en dos puntos fijos, próximos a los extremos, separados por una distancia de 640 mm. Esta distancia fue seleccionada de acuerdo con la normativa de ensayo, donde nos indica que la distancia entre apoyos debe ser 4 veces mayor que la altura de la probeta (W). El apoyo se realizó en cilindros metálicos de 100 mm de longitud (Fig. 16), garantizando de esta manera un apoyo simple en todo el espesor de la probeta.

Fue crucial asegurarse que la entalla este perfectamente alineada con el punto de aplicación de la carga. Se marcó una línea vertical desde el final de la entalla en la probeta y se ajustó el cilindro de carga tanto en planta como en alzado a la referencia marcada. La alineación precisa del cilindro de carga y la probeta fue fundamental para garantizar que la fuerza aplicada cause una concentración de tensiones en la entalla, donde se esperaba que se produzca la iniciación de fisura y se propague la fractura.

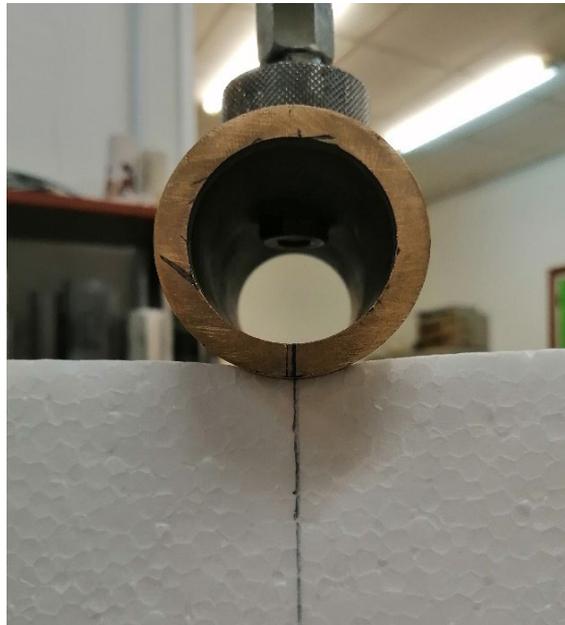


Figura 16. Cilindro encargado de aplicar la carga puntual en el centro de la probeta.

Una vez la probeta estuvo colocada en posición para el ensayo, se le aplicó la carga puntual de forma controlada hasta llegar a la fractura. Esto se realizó mediante una velocidad de avance constante proporcionada por la prensa electromecánica de la marca WIKHAM-FARRANCE (Fig. 17).

Se hizo una prueba con 6 probetas de un mismo ancho de entalla y de densidad. Las 3 primeras probetas fueron ensayadas a una velocidad de avance de la máquina de 2,54 mm/min (0,1 in/min). En cambio, las 3

últimas probetas fueron ensayadas al doble de velocidad 5,08 mm/min (0,2 in/min). Se pudo comprobar en la gráfica fuerza-desplazamiento como para estas velocidades de ensayo, no había influencia en los resultados del ensayo.

WYKEHAM-FARRANCE			
RATES FEED IN IN/ MIN			
% FULL SPEED	GEAR CHANGE POSITION		
	1	2	3
100	-250	-010	-0004
90	-225	-009	-00036
80	-200	-008	-00032
70	-175	-007	-00028
60	-150	-006	-00024
50	-125	-005	-00020
40	-100	-004	-00016
30	-075	-003	-00012
20	-050	-002	-00008
10	-025	-001	-00004
4	-010	-0004	-000016
1% CHANGE	-0025	-0001	-000004

M/C MUST NOT BE USED BELOW 4% OF FULL SPEED

Figura 17. Velocidades disponibles en la máquina de ensayo.

Finalmente, los ensayos fueron monitorizados con el programa Geolab (Fig. 18), aportando un registro en tiempo real de la fuerza aplicada por la célula de carga y el desplazamiento obtenido por el instrumento de medición como se verá en los siguientes apartados.

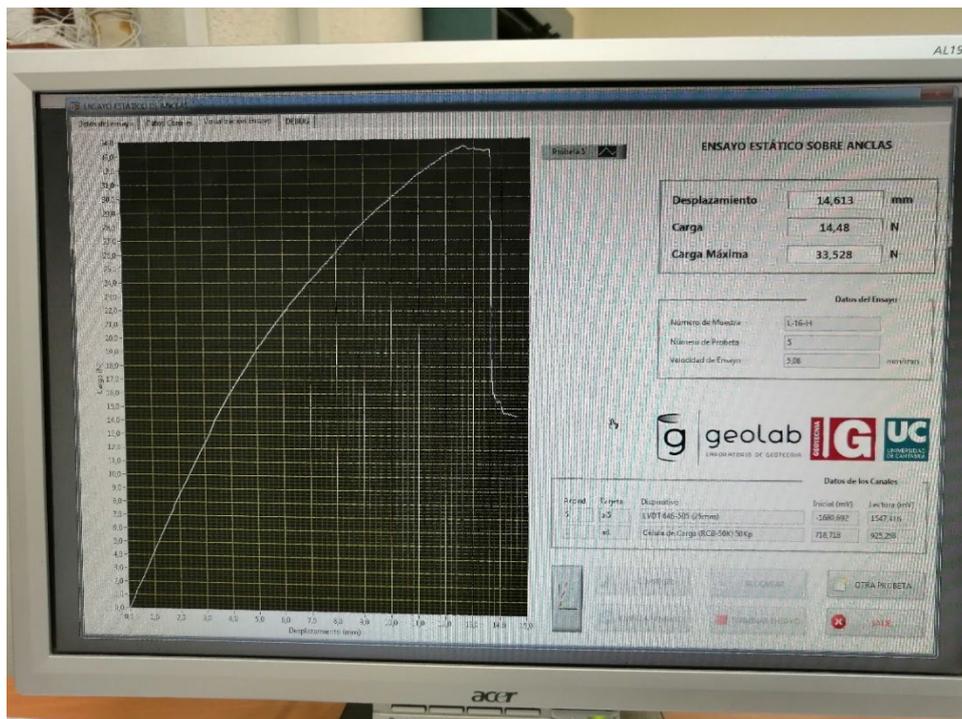


Figura 18. Gráfica fuerza-desplazamiento en el programa Geolab

3.1.1.1. Célula de carga

Al ser el Poliestireno Expandido un material del que no se conocían sus prestaciones mecánicas y no habitual en un laboratorio de geotecnia, fue necesario hacer ciertas estimaciones previas al desarrollo experimental.

Se comenzó estimando la fuerza de rotura de las probetas en un ensayo de flexión de tres puntos con el fin de conocer cuál será la célula de carga adecuada. Las probetas cumplen con las condiciones del método A de la norma *UNE-EN 12809* [26] para la determinación del comportamiento a flexión en productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación.

La ecuación 18 corresponde con el cálculo de la resistencia a flexión en espumas poliméricas. Esta expresión es una variante de la ecuación 27, que se explica más adelante, y a la que se le aplica un valor de conversión para σ_B este en kPa.

$$\sigma_B = 3 \cdot 10^3 \cdot \frac{P_q L}{2BW^2} \quad (18)$$

Donde:

- $B = 80 \text{ mm}$ Espesor de la probeta.
- $W = 160 \text{ mm}$ Altura de la probeta.
- $L = 640 \text{ mm}$ Luz entre apoyos.

Conociendo las medidas teóricas de las probetas de ensayo despejamos la ecuación 18 obteniendo la relación entre la carga máxima a rotura (P_q) y la resistencia a flexión (σ_B):

$$P_q = \frac{\sigma_B}{0,46875} \quad (19)$$

De acuerdo con la *UNE-EN 92110* [27], para una probeta normalizada de poliestireno expandido de 10 kg/m³ de densidad es esperable una resistencia a flexión mínima de 50 kPa. En cambio, en una probeta de 35 kg/m³ de densidad es esperable una resistencia a flexión mínima de 375 kPa.

Con la suposición de estos valores resolvemos la ecuación 19:

- EPS de baja densidad: $P_q = 110 \text{ N}$
- EPS de alta densidad: $P_q = 800 \text{ N}$

Fue necesario emplear una célula de carga con gran capacidad de carga como es la de 350 kg (3500 N) para ensayar las probetas lisas (sin entalla) de alta densidad EPS40 (Fig. 19).

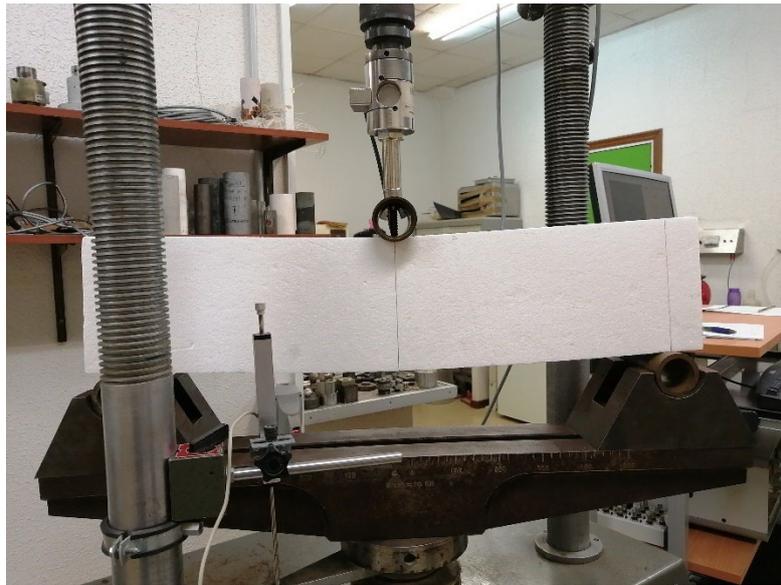


Figura 19. Ensayo con la célula de carga de 3500N empleada en las probetas EPS40 sin entalla.

Experimentalmente, se comprobó que las probetas con entallas tanto de EPS10 y EPS40 podían ser evaluadas con la célula de carga de 50 kg (500 N). Las probetas lisas (sin entalla) de baja densidad EPS10 también se ensayaron con esta misma célula de carga (Fig. 20).

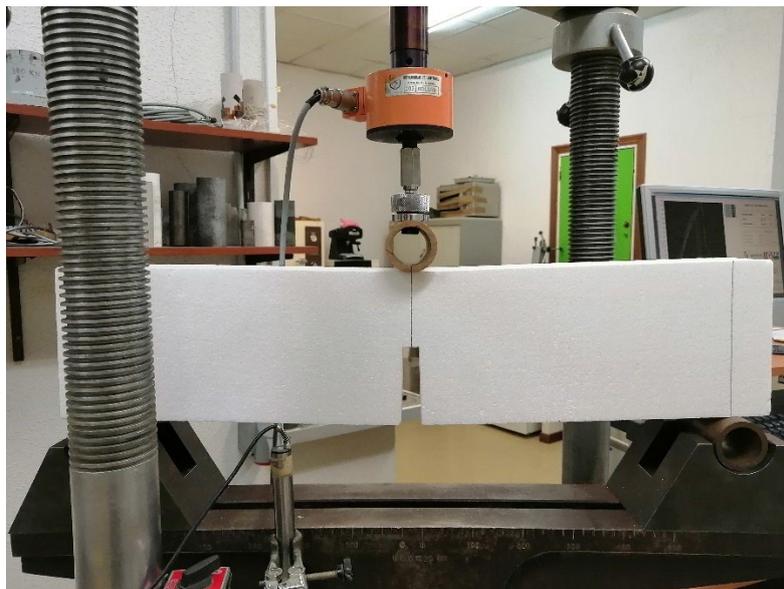


Figura 20. Ensayo con la célula de carga 500 N.

3.1.2. LVDT

Previo a la realización de los ensayos experimentales se hizo un tanteo inicial de la flecha en el centro de luz de la probeta. De este modo se pudo conocer cuál sería el desplazamiento vertical esperado y se eligió el aparato de medición más adecuado para el ensayo.

El Transformador Diferencial de variación Lineal (LVDT) se trata de un sensor electromagnético capaz de leer el desplazamiento lineal con una alta precisión. La resistencia y la exactitud en las mediciones le convierten a este aparato en una aplicación ideal para el ensayo de materiales.

Para conocer el LVDT adecuado nos apoyamos en la ecuación 20 correspondiente a la flecha en centro de luz para una viga biapoyada de sección rectangular, obtenida como combinación de las ecuaciones 21 y 22.

$$X = \frac{12P_q L^3}{48EBW^3} \quad (20)$$

Donde:

- $B = 80 \text{ mm}$ Espesor de la probeta.
- $W = 160 \text{ mm}$ Altura de la probeta.
- $L = 640 \text{ mm}$ Luz entre apoyos.
- $P_q = 800 \text{ N}$ Fuerza de rotura máxima estimada en el apartado 3.1.1.

De acuerdo con la *UNE-EN 826* [28], el módulo de elasticidad (E) del poliestireno expandido (EPS) toma valores habituales entre 2,5 MPa y 8,5 MPa. Suponiendo un valor medio de este rango, $E = 5,5 \text{ MPa}$, se obtiene la estimación inicial del desplazamiento máximo: $X_m = 29,1 \text{ mm}$.

De este cálculo, se estimó que el desplazamiento podría llegar hasta los 30 mm, por lo que se decidió emplear un LVDT 100 mm para poder medir los grandes desplazamientos. Para estar del lado de la seguridad, se mantuvo una distancia vertical libre de al menos 60 mm para que las probetas ensayadas no llegaran a tocar el fondo y pudieran interferir en los resultados.

Experimentalmente con las probetas H, se pudo comprobar como en las muestras entalladas el sistema LVDT de 25 mm (Fig. 21) era el más adecuado en cuanto a rango de desplazamiento y precisión.

Los ensayos en las probetas lisas (sin entalla) de EPS10 (L-0-0) dieron lugar a desplazamientos superiores a 30 mm provocando que fuese necesario el empleo del LVDT TR 0-100 mm en estas probetas.



Figura 21. LVDT 25 mm empleado para medir el desplazamiento en los ensayos.

3.2. Cálculo del módulo de elasticidad

El módulo de Young o de elasticidad (E) se calculó a través de la flecha obtenida en el ensayo a flexión en 3 puntos. La flecha (X) en centro de luz de una viga biapoyada en dominio elástico corresponde con la siguiente fórmula:

$$X = \frac{PL^3}{48EI} \quad (21)$$

Donde P es la carga vertical aplicada, L es la distancia entre apoyos, I es el momento de inercia de la sección transversal de la probeta.

El momento de inercia de una sección rectangular se representa en la ecuación 22.

$$I = \frac{BW^3}{12} \quad (22)$$

Donde B es el espesor y W la altura de la probeta.

Combinando las ecuaciones 21 y 22 y despejando E , obtenemos la expresión final del módulo de elasticidad:

$$E = \frac{L^3}{4BW^3} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta X} \quad (23)$$

Donde el primer factor representa una propiedad fija de cada probeta al depender únicamente de las medidas reales de la misma. Por otra parte, el segundo factor representa la pendiente de la zona elástica de la curva fuerza-desplazamiento.

3.3. Cálculo de la resistencia de tracción

La resistencia a tracción σ_t de las probetas de Poliestireno Expandido fueron calculadas mediante el momento flector (M_f) resultante en una viga biapoyada bajo una carga puntual (Ec. 24) y las distribuciones tensionales en centro de luz.

$$M_f = \frac{PL}{4} \quad (24)$$

Donde P es la carga vertical aplicada y L la distancia entre apoyos

Tomando una rebanada diferencial en el centro de luz de la viga y suponiendo una distribución elástica lineal perfecta en la sección transversal, con el eje neutro a la mitad de la altura ($W/2$), se obtiene la siguiente distribución tensional (Fig. 22).

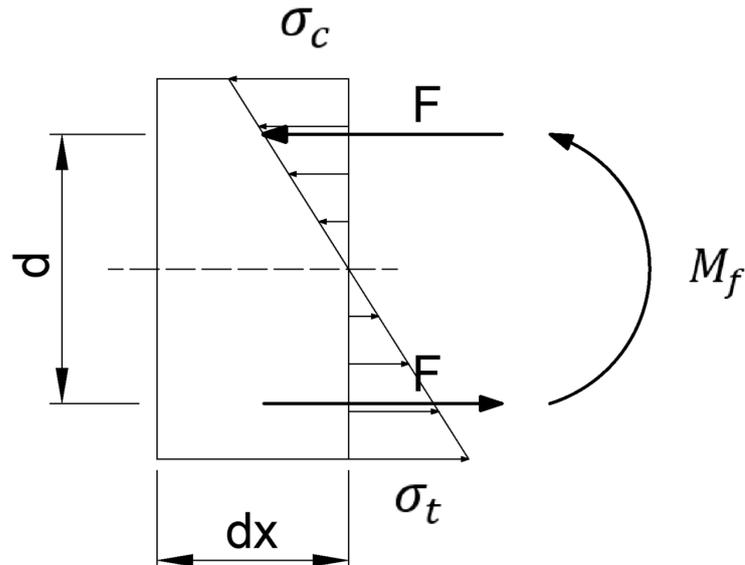


Figura 22. Momento flector en una rebanada diferencial en centro de luz.

El par de fuerzas resultantes (F) son la suma de las tensiones en la rebanada (Ec. 25).

$$F = \frac{1}{2} \cdot \sigma_t \cdot \frac{W}{2} \cdot B \quad (25)$$

Donde W es altura y B el espesor de la probeta.

El momento flector (M_f) en la sección sería igual al par de fuerzas (F) por la distancia ($d = \frac{2}{3}W$) que los separa. En la ecuación 26 se muestra esta expresión simplificada.

$$M_f = F \cdot d = \frac{\sigma_t W^2 B}{6} \quad (26)$$

Igualando las ecuaciones 24 y 26 y despejando σ_t se extrae la expresión final, la ecuación 27.

$$\sigma_t = \frac{3P_Q L}{2BW^2} \quad (27)$$

La resistencia a tracción (σ_t) es la correspondiente a la carga máxima (P_Q) aplicada en el ensayo.

Una vez obtenidas las expresiones de σ_t y E es directa la obtención de la deformación del ensayo de flexión con la Ley de Hooke (Ec. 28).

$$\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E} \quad (28)$$

La ecuación 29 muestra la expresión de la deformación unitaria (ε):

$$\varepsilon = \frac{6WX}{L^2} \quad (29)$$

3.4. Cálculos del comportamiento de fractura

Los parámetros de fractura de las probetas de EPS han sido determinados mediante el ensayo SENB. En los ensayos se aplicó la carga alineada con la entalla, obteniéndose la gráfica fuerza-desplazamiento de la muestra.

La norma de aplicación para materiales plásticos en el caso de deformación plana y comportamiento elástico lineal es la *ASTM D5045-14* [12]. Tras la obtención de los resultados carga-desplazamiento se ha de comprobar la condición de la ecuación 30 para estar en régimen elástico lineal.

$$P_{max} \leq 1,10 \cdot P_{Q,5\%} \quad (30)$$

Donde:

- P_{max} Carga máxima aplicada en el ensayo
- $P_{Q,5\%}$ Valor de carga que surge de la intersección de la curva con la recta de cumplimiento de pendiente reducida un 5% respecto a la recta ajustada a la región elástica (Fig. 23).

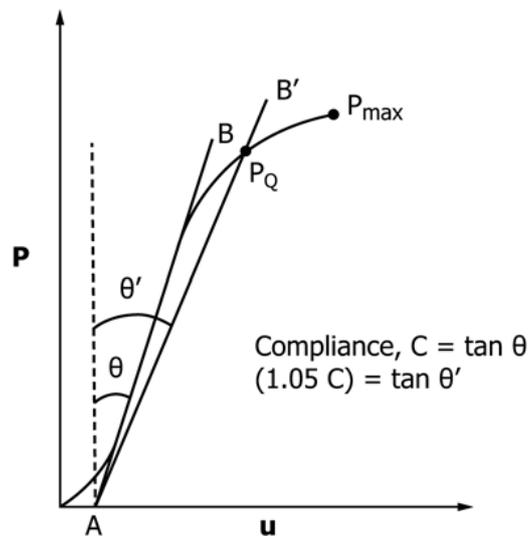


Figura 23. Determinación de $P_{Q,5\%}$ con la gráfica fuerza-desplazamiento. Fuente: [12]

Tras analizar los resultados en ambos materiales (EPS10 y EPS40) se comprobó como los valores de P_{max} eran superiores al 110% de los valores $P_{Q,5\%}$, es decir, la normativa elástico lineal no es aplicable en nuestras probetas de ensayo. Es por ello que la norma aplicada para el estudio de fractura fue la correspondiente a materiales con comportamiento elastoplástico, *ASTM D6068-10* (18) [29].

3.4.1. Determinación de la tenacidad aparente

La metodología para obtener la integral J en régimen elastoplástico viene definida por la norma *ASTM D6068-10* (18) [29]. En ensayos normalizados SENB, J se relaciona con la energía disipada con la siguiente ecuación:

$$J = \frac{\eta \cdot U}{B(W - a_0)} \quad (31)$$

Donde:

- η : En probetas SENB toma valor 2.
- U : Energía necesaria para prolongar la grieta, determinada por el área bajo la curva fuerza-desplazamiento.
- B : Espesor de la probeta.
- W : Altura de la probeta.
- a_0 : Tamaño inicial de la entalla.

La integral J se relaciona con la tenacidad aparente del material, K_{mat}^N , con la ecuación 32 [30].

$$J = \frac{(K_{mat}^N)^2}{E'} \quad (32)$$

Trabajando en condiciones de deformación plana para tamaños de zona plástica pequeña [15], el módulo de elasticidad cumple con la ecuación 33.

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (33)$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad.
- ν : Coeficiente de Poisson.

Juntando las ecuaciones 32 y 33 se obtiene el valor de K_{mat}^N con el resultado de la integral J :

$$K_{mat}^N = \sqrt{\frac{J \cdot E}{1 - \nu^2}} \quad (34)$$

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1. Ensayo para la determinación del módulo de elasticidad

El ensayo para la obtención del módulo de Young consistió en un ensayo de flexión de tres puntos en las probetas lisas (sin entalla) L-1-U y D-1-U. Se hicieron pruebas de carga y recarga en las probetas, sin llegar al límite elástico, con el objetivo de extraer la pendiente de la zona elástica. Se realizaron 3 ensayos por cada tipo de material, un total de 6 probetas ensayadas (Fig. 24 y 25).

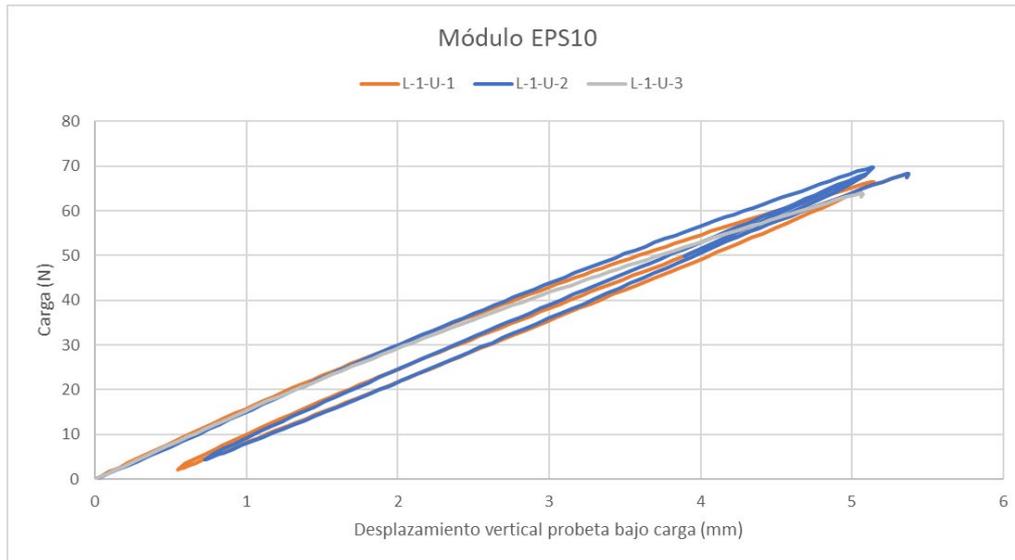


Figura 24. Ensayos de módulo en las probetas ligeras (L-1-U).

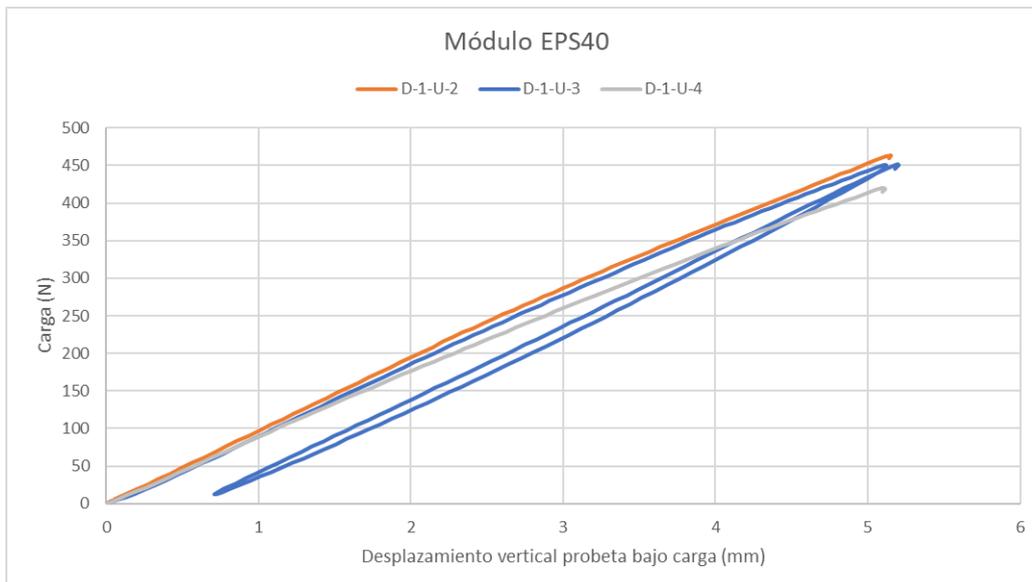


Figura 25. Ensayos de módulo en las probetas densas (D-1-U).

Conocidos los valores de la pendiente carga-desplazamiento ($\Delta P/\Delta X$) y las medidas reales de las probetas, se obtuvieron los valores de módulo de elasticidad (E) con la ecuación 23. En la tabla 5 se muestran los valores de E (MPa) obtenidos en los ensayos.

Material	Probeta	CARGA		RECARGA	
		$\Delta P/\Delta X$	E (MPa)	$\Delta P/\Delta X$	E (MPa)
EPS 10	L-1-U-1	12,867	2,694	13,506	2,828
	L-1-U-2	13,733	2,883	14,392	3,022
	L-1-U-3	12,605	2,576		
EPS 40	D-1-U-2	90,422	18,697	98,346	20,166
	D-1-U-3	90,192	18,494		
	D-1-U-4	83,046	16,933		

Tabla 5. Resultados experimentales del módulo de elasticidad del EPS.

A pesar de trabajar en la zona elástica, se pudo observar como el módulo obtenido en recarga es un poco superior debido a que el material ha sido ligeramente compactado por el ciclo de carga anterior. Es por ello que se tomaron la media de los valores de carga como el módulo de elasticidad característico.

- $E_{EPS10} = 2,718 \text{ MPa}$
- $E_{EPS40} = 18,041 \text{ MPa}$

Los resultados de E demuestran la gran diferencia de resistencia que presentan los dos tipos de Poliestireno Expandido. El EPS más denso posee un módulo de Young considerablemente más grande que el EPS ligero, quedando demostrado que la densidad una propiedad fundamental de este material.

Representando gráficamente los 6 resultados de E frente a su densidad real (Fig. 26), se obtuvo la siguiente línea de tendencia. Para tener una mayor fiabilidad de esta aproximación habría sido necesario obtener datos de un EPS de densidad intermedia.

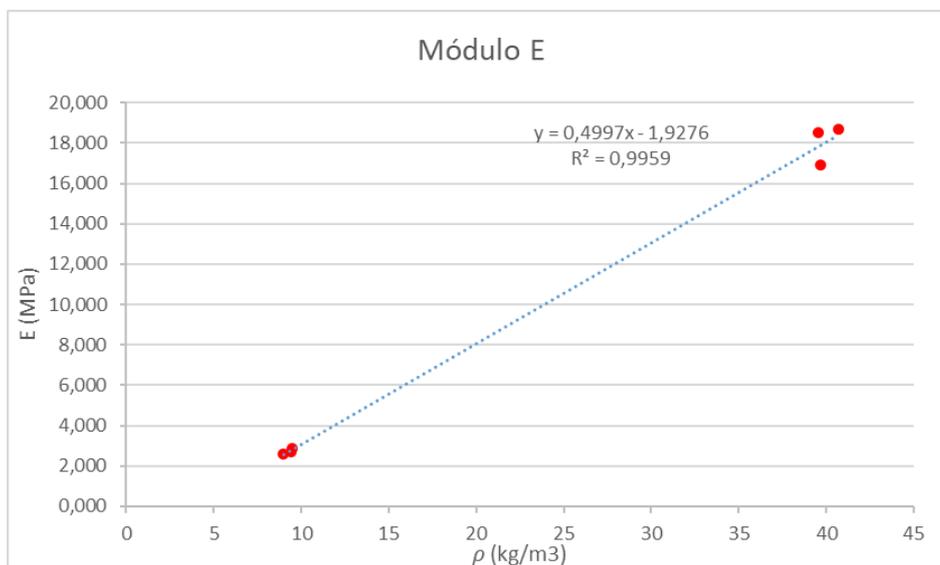


Figura 26. Resultados experimentales del módulo de elasticidad en función de la densidad.

Seguidamente, los resultados experimentales fueron comparados con 2 fuentes bibliográficas distintas para comprobar su validez.

La primera, fue con el trabajo desarrollado por Negussey y Anasthas (2001) [31], donde obtuvieron la ecuación 35 de regresión lineal de sus ensayos a flexión en probetas de EPS entre 10 y 30 kg/m³.

$$E_{NA} = 0,82\rho - 4,9 \quad (35)$$

Donde:

- E_{NA} Estimación del módulo del EPS de Negusse y Anasthas (2001) en MPa.
- ρ Densidad real del EPS en kg/m³.

De acuerdo con esta estimación obtendríamos $E_{NA10} = 2,54 \text{ MPa}$ para el EPS10 y $E_{ET10} = 28,5 \text{ MPa}$ para el EPS40. Siendo unos valores muy próximos a nuestros ensayos en las probetas ligeras y del mismo orden de magnitud, aunque superiores, para las probetas densas.

Por otra parte, Eriksson y Trank (1991) [32] desarrollaron la ecuación 36 tras realizar una serie de ensayos de compresión no confinada en muestras de EPS provenientes de grandes bloques de 15 y 20 kg/m³ de densidad nominal.

$$E_{ET} = 9,7\rho^2 - 14\rho + 1800 \quad (36)$$

Donde:

- E_{ET} Estimación del módulo del EPS de Eriksson y Trank (1991) en kPa.
- ρ Densidad real del EPS en kg/m³.

La estimación para el EPS de baja densidad es $E_{ET10} = 2470 \text{ kPa}$ y para el EPS de alta densidad es $E_{ET40} = 18300 \text{ kPa}$. Siendo estos valores muy próximos a los obtenidos en los ensayos de flexión.

Tras la comparación con los trabajos analizados, se dan los resultados experimentales de módulo de elasticidad por validados.

4.2. Ensayo de flexión en tres puntos de muestras sin entalla

En los ensayos de flexión en 3 puntos para la obtención de la resistencia de tracción se llevaron las probetas sin entalla (L-0-0 y D-0-0) hasta rotura. Las figuras 27 y 28 son las gráficas fuerza-desplazamiento obtenidas.

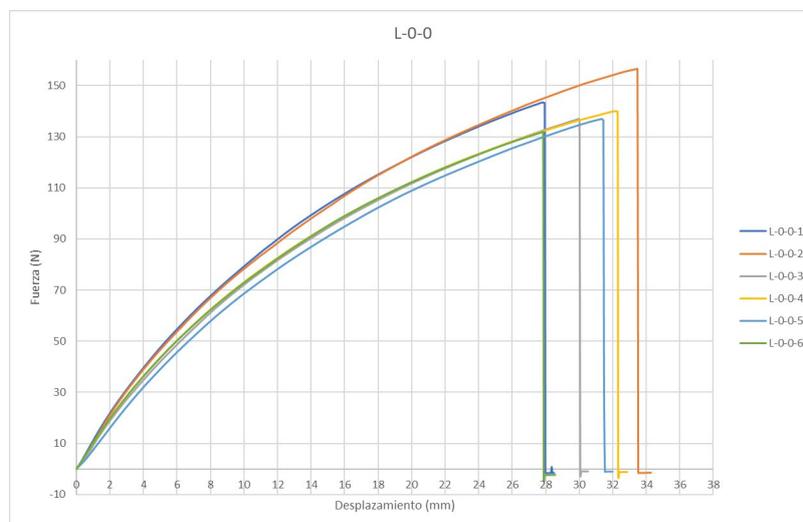


Figura 27. Curva fuerza-desplazamiento de las probetas EPS10 sólidas (L-0-0).

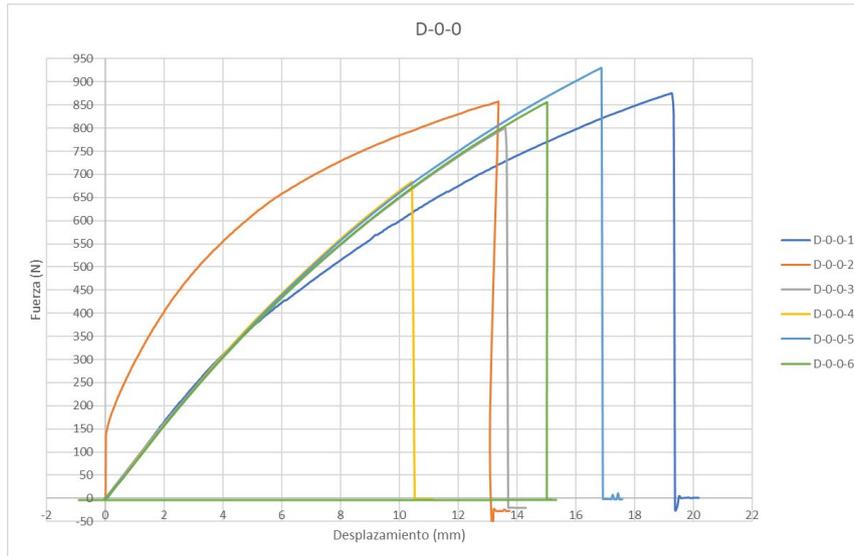


Figura 28. Curva fuerza-desplazamiento de las probetas EPS40 sólidas (D-0-0).

La fuerza máxima (P_Q) en las probetas ligeras tomó valores muy próximas a la media, mientras que en las densas se obtuvieron valores más dispares. Resolviendo la ecuación 27 con los valores de P_Q y las medidas reales de cada probeta se obtuvieron los valores de la resistencia a tracción (σ_t). En la tabla 6 se muestran los resultados de σ_t , siendo 68 kPa el valor medio en el EPS10 y 395 kPa en el EPS40.

Material	Probeta	P_Q (N)	σ_t (kPa)	Mean	Desv. Estándar
EPS 10	L-0-0-1	143,6	69,09	67,94	4,09
	L-0-0-2	156,6	75,33		
	L-0-0-3	137,1	65,96		
	L-0-0-4	140,1	68,30		
	L-0-0-5	137,1	66,21		
	L-0-0-6	132,0	63,38		
EPS 40	D-0-0-1	875,0	415,09	395,0	40,84
	D-0-0-2	856,5	408,60		
	D-0-0-3	801,1	381,71		
	D-0-0-4	683,1	323,90		
	D-0-0-5	930,3	443,60		
	D-0-0-6	855,9	408,33		

Tabla 6. Resultados de los ensayos de tracción.

Los resultados del ensayo se compararon con los de Gnip et al. (2007) [33]. En este caso, Gnip et al. obtuvieron la resistencia última de tracción en espumas de poliestireno expandido de 3 tipos de densidades: 125 kPa en EPS 13 kg/m³, 226 kPa en EPS 19,5 kg/m³ y 288 kPa en 26 kg/m³. En el EPS10, los resultados experimentales están dentro de un rango esperable, siendo inferiores a los del EPS más ligero de Gnip et al. Los resultados obtenidos en el EPS40 también se encuentran dentro de unos valores razonables al superar con diferencia la resistencia del EPS más denso de Gnip et al.

Con la comparativa de Gnip et al. (2007) y la similitud con los valores de referencia de la norma UNE-EN 92110 [27], 50 kPa para el EPS ligero y 350 kPa para el EPS denso, se dan los resultados del ensayo de tracción por validados.

4.3. Ensayo de flexión en tres puntos de muestras con entalla

En los ensayos de flexión en 3 puntos SENB se llevaron todas las muestras con entalla hasta rotura obteniendo las gráficas fuerza-desplazamiento en cada caso. En general, se observó como la carga máxima en los ensayos aumentaba conforme se incrementaba la entalla dentro del mismo material. Hubo varios casos de repetitividad de resultados; en cambio, hubo otros donde los valores de fuerza máxima variaban ligeramente y por eso se ensayaron las 6 probetas de cada tipo de entalla y material, con el fin de obtener el valor característico a pesar de las desviaciones. En la figura 29, la curva correspondiente a las probetas D-2-U, se muestra un ejemplo de una de las curvas obtenidas donde hubo unos resultados muy similares en las 6 muestras ensayadas.

Los desplazamientos fueron mayores en las probetas SENB ligeras en comparación con las densas. En cambio, los valores de carga máxima en las muestras densas fueron del orden de cinco veces superiores a los de las ligeras. Terminando con las comparaciones, las probetas con entallas H presentaron mayores valores en cuanto a desplazamientos y cargas máximas con respecto a las probetas con entalla U. En el *Anejo II – Resultados de los ensayos a flexión en tres puntos* se incluyen todas las gráficas fuerza-desplazamiento obtenidas en las probetas SENB.

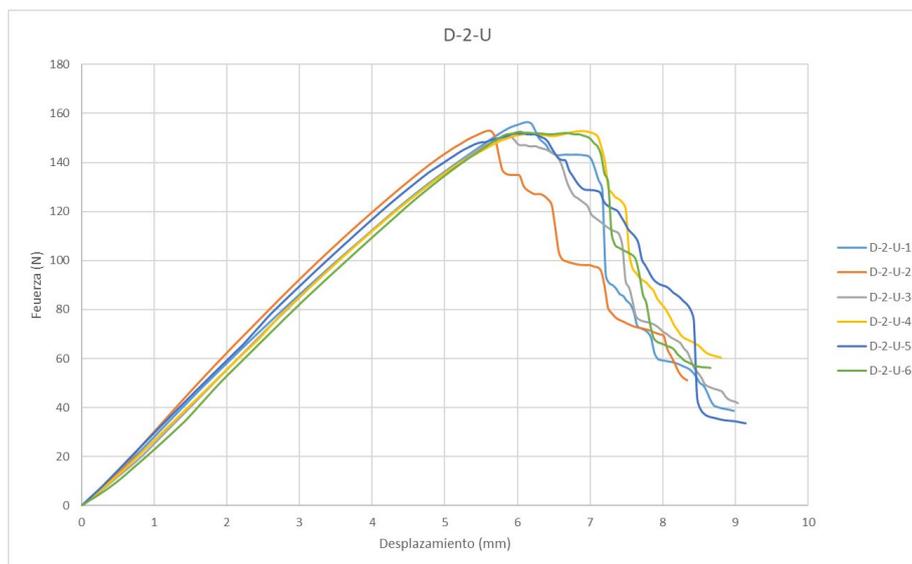


Figura 29. Curva fuerza-desplazamiento de las probetas EPS40 entalla 2 mm (D-2-U).

Una vez ensayadas todas las muestras SENB (con entalla) se procedió a la obtención de los valores de disipación de energía (U), que corresponde con el área total encerrada bajo la curva fuerza-desplazamiento hasta el punto de carga máxima. Haciendo uso de la ecuación 31, con los valores de energía calculados y las medidas reales de cada probeta, se obtuvieron los valores de la integral de contorno J de cada muestra. Correlacionando los valores de J con los valores experimentales del módulo E y los coeficientes de Poisson (ν) estimados, a través la ecuación 34, se obtuvieron los valores individuales de la tenacidad aparente del material K_{mat}^N . Estos valores para los dos tipos de entalla se encuentran desglosados, paso por paso, en el *Anejo II – Resultados de los ensayos a flexión en tres puntos*.

En la tabla 7 se muestra un resumen de los resultados del ensayo de fractura para la tenacidad aparente (K_{mat}^N), incluyendo los valores medios y la desviación estándar para cada radio de entalla del tipo semicircular (U). La desviación estándar es menor en las probetas ligeras, mostrando una mejor repetitividad de

resultados frente a las probetas densas. Con los resultados obtenidos se puede observar un cierto aumento de los valores medios de la tenacidad aparente conforme aumenta el radio de entalla dentro de las probetas de baja de densidad. En cambio, el efecto entalla no se observa en las probetas densas. Este fenómeno puede deberse a que el mecanismo de rotura es diferente al de las probetas ligeras. En las muestras densas, las perlas han sufrido un mayor grado de fusión de la espuma y por tanto la rotura puede no producirse entre los granos si no entre grupos de perlas fusionadas.

Material	Código	Radio entalla (mm)	$K_{mat}^N (kPa \cdot m^{0,5})$	
			Media	Desv. Estándar
EPS 10	L-2-U	1,00	12,10	0,56
	L-4-U	2,00	13,10	1,41
	L-8-U	4,00	13,19	0,99
	L-16-U	8,00	14,58	0,91
EPS 40	D-2-U	1,00	55,27	1,77
	D-4-U	2,00	54,83	2,48
	D-8-U	4,00	50,47	3,95
	D-16-U	8,00	57,78	2,17

Tabla 7. Resultados experimentales del ensayo de fractura en las probetas U.

Análogamente a las probetas con entalla en U, se obtuvieron los parámetros de fractura en las entallas H, observándose unos resultados interesantes. En la tabla 8 se refleja el resumen de valores medios y desviación estándar obtenidos. En el EPS10, se aprecia una clara tendencia al efecto entalla. En el EPS 40 el incremento del radio de entalla también tiende a aumentar la tenacidad a fractura, aunque de forma no tan uniforme. Los valores de desviación estándar son muy elevados en las probetas densas.

Material	Código	Radio entalla (mm)	$K_{mat}^N (kPa \cdot m^{0,5})$	
			Media	Desv. Estándar
EPS 10	L-2-H	1,00	12,86	0,82
	L-4-H	2,00	12,81	0,98
	L-8-H	4,00	14,06	1,26
	L-16-H	8,00	15,61	0,98
EPS 40	D-2-H	1,00	50,16	7,45
	D-4-H	2,00	59,89	4,79
	D-8-H	4,00	63,77	2,37
	D-16-H	8,00	60,57	5,92

Tabla 8. Resultados experimentales del ensayo de fractura en las probetas H.

- **Teoría de las Distancias Críticas**

Como ya se ha descrito en el primer capítulo, la Teoría de las Distancia Críticas ha sido aplicada a través de dos metodologías: la de punto (PM) y la de la línea (LM). Dentro de cada método se aplicaron dos enfoques para ajustar los dos parámetros característicos: la distancia crítica (L) y la tenacidad a fractura del material (K_{mat}).

- En el primero enfoque, se calculó un valor fijo de la distancia crítica L en base a la ecuación 12, donde depende de 2 características experimentales del material. La primera característica es K_{mat} , que se supone la tenacidad aparente (K_{mat}^N) del radio de entalla más pequeño al corresponder con el valor más próximo a la tenacidad de fractura. Esto se debe a que, al tener el radio más pequeño posible, las tensiones se concentran en un área más reducida, lo que resulta en la resistencia más baja alcanzada. La segunda característica es la tensión inherente σ_0 , que se supondrá el valor de la resistencia a tracción (σ_t), calculada para ambas densidades.
- En el segundo enfoque se ajustan los parámetros L y K_{mat} por mínimos cuadrados. Mediante un método iterativo se estiman las dos variables que muestren el menor error respecto a los valores experimentales de tenacidad.

El análisis mediante el método de la línea (LM) en las probetas SENB del material ligero se realizó en base a la ecuación 16 de referencia, dando lugar a los resultados mostrados en la figura 30. En esta gráfica se presentan los resultados experimentales de tenacidad y las líneas de ajuste (color azul) y calculada (en color verde). Como cabía esperar antes del análisis de la TCD, la aproximación LM ajustada se aproxima más a los valores experimentales de tenacidad. Sin embargo, el LM calculado también proporciona una tendencia aceptable. Se comprueba como el método de la Línea resultó ser una buena estimación de los valores de fractura y confirmó el efecto entalla en las espumas EPS10, aumentando la tenacidad del material conforme se incrementa el radio de entalla.

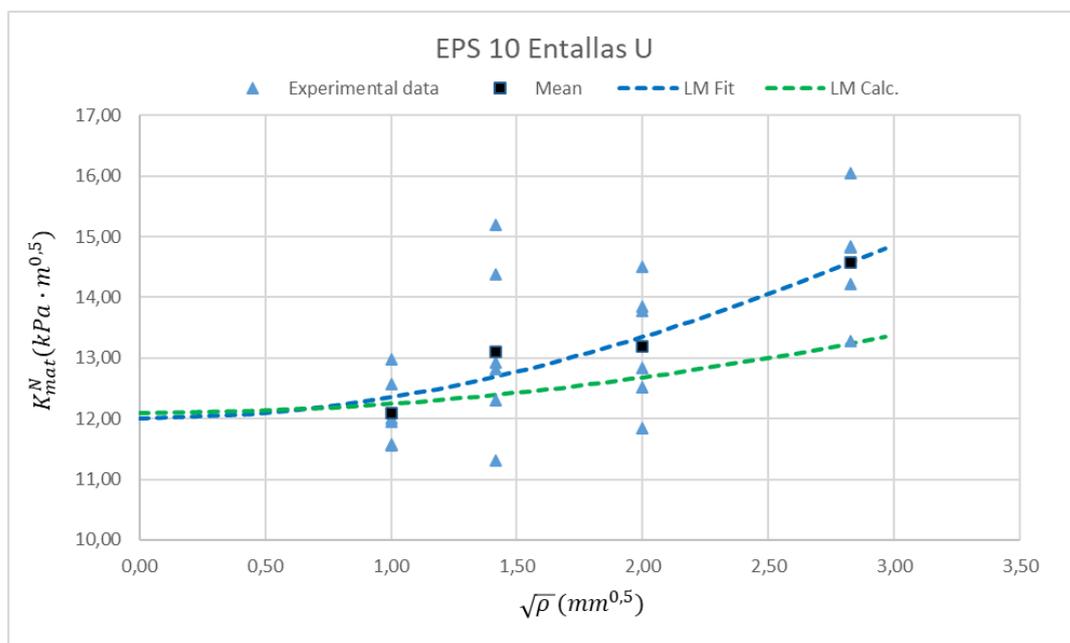


Figura 30. Análisis TCD mediante el LM en EPS10.

Por otra parte, en las espumas EPS40 ni la aproximación calculada (verde) ni la ajustada (azul) del método de la línea fueron adecuadas debido a que los resultados de fractura no siguen la tendencia del efecto entalla, como ya se ha explicado (Fig. 31).

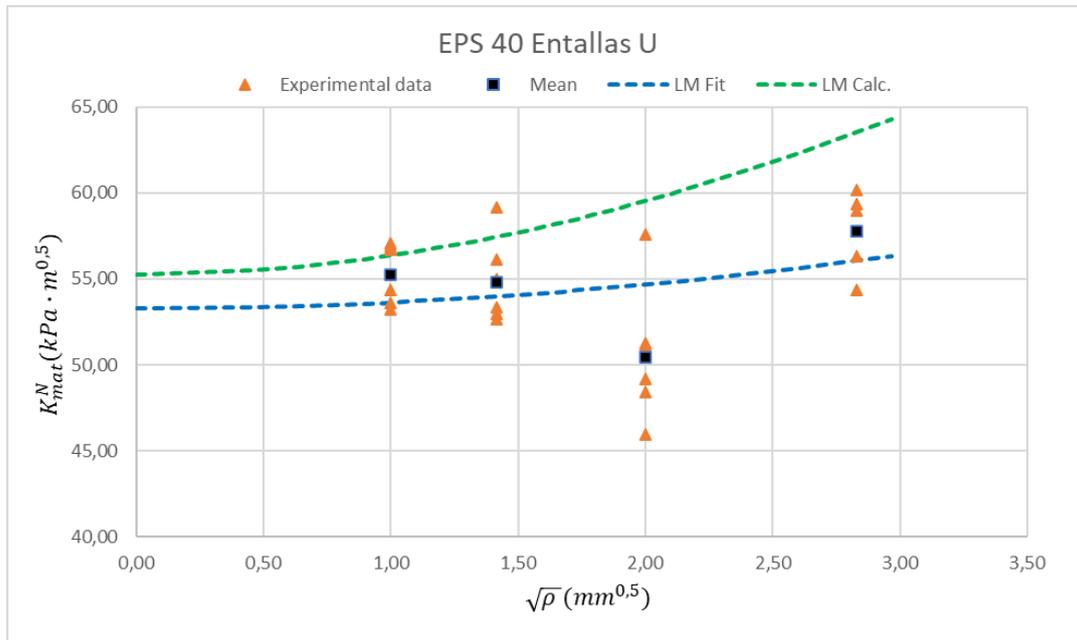


Figura 31. Análisis TCD mediante el LM en EPS40.

A continuación, se detallarán las curvas obtenidas por el método del punto (Ec. 14). Comenzando con las espumas ligeras EPS10 (Fig. 32), se observa como la línea calculada (verde) toma unos valores totalmente alejados de los experimentales. En cambio, la línea de ajuste por mínimos cuadrados (azul) se aproxima más los valores, pero con una tendencia que no es la correspondiente al efecto entalla. Este análisis nos rebeló como el PM es una peor aproximación que el LM en las probetas EPS10.

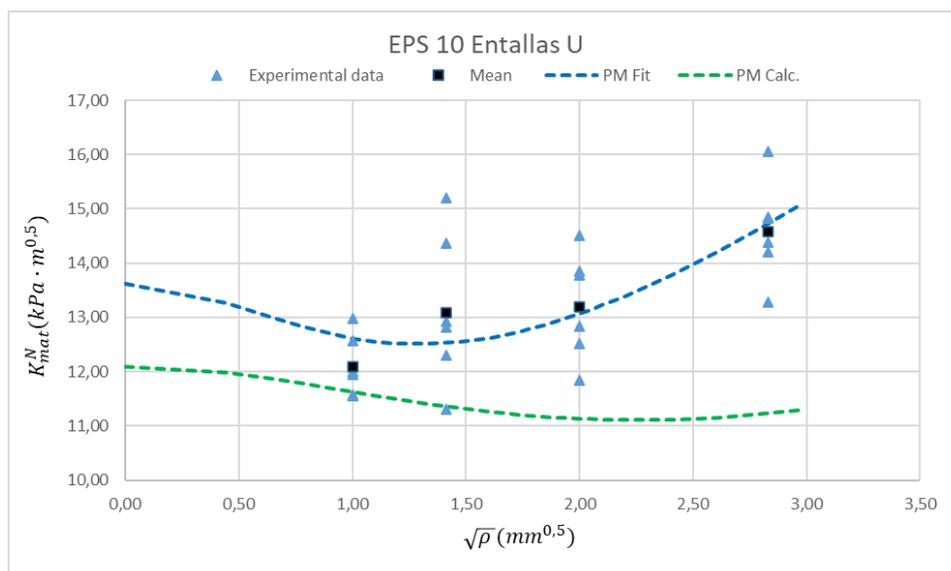


Figura 32. Análisis TCD mediante el PM en EPS10.

Aplicando el método del punto a las espumas densas (Fig. 33) se observó como la línea calculada (verde) parece seguir la tendencia de los resultados de fractura. Esto se confirma al dibujar la línea de ajuste (azul),

observando cómo las 2 líneas son prácticamente paralelas. La línea azul es la que más se aproxima a los valores medios de fractura. Por tanto, en las probetas densas EPS40 no se cumple el efecto entalla, sin embargo, el método del punto proporciona una estimación más cercana de los valores reales de tenacidad que el método de la línea.

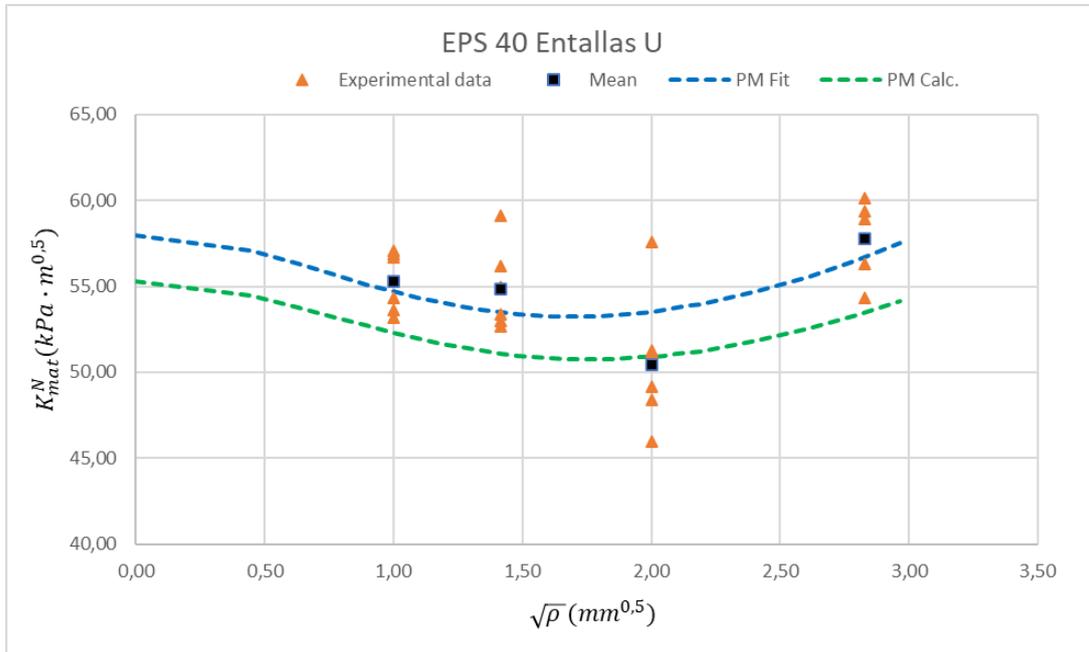


Figura 33. Análisis TCD mediante el PM en EPS40.

A modo de resumen se muestran las figuras 34 y 35, que representan las mejores aproximaciones del LM y PM a los valores de tenacidad experimentales.

En la figura 34, las espumas ligeras EPS10 se aproximan con claridad al LM de ajuste (rojo), siguiendo el aumento de la tenacidad con el radio de entalla esperado. Por el contrato el PM de ajuste (rosa) no refleja con precisión esta tendencia de incremento de la tenacidad del material.

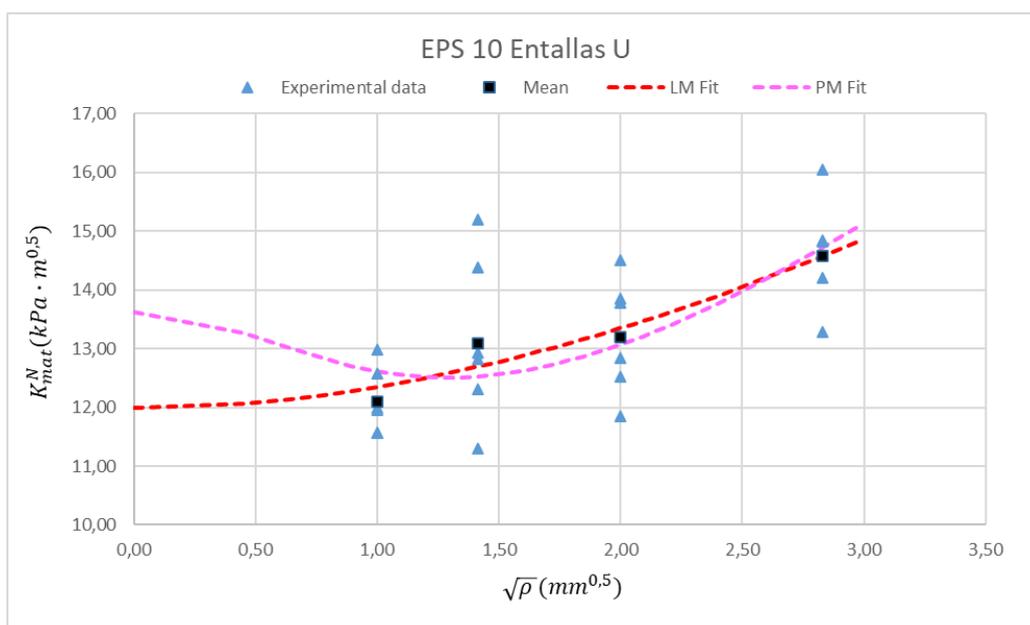


Figura 34. Mejores ajustes del LM y el PM en EPS10.

Los resultados experimentales en las probetas densas EPS40 (Fig. 35), aun no siguiendo un efecto entalla, son aproximados más fielmente por el PM de ajuste (rosa) que por el LM de ajuste (rojo).

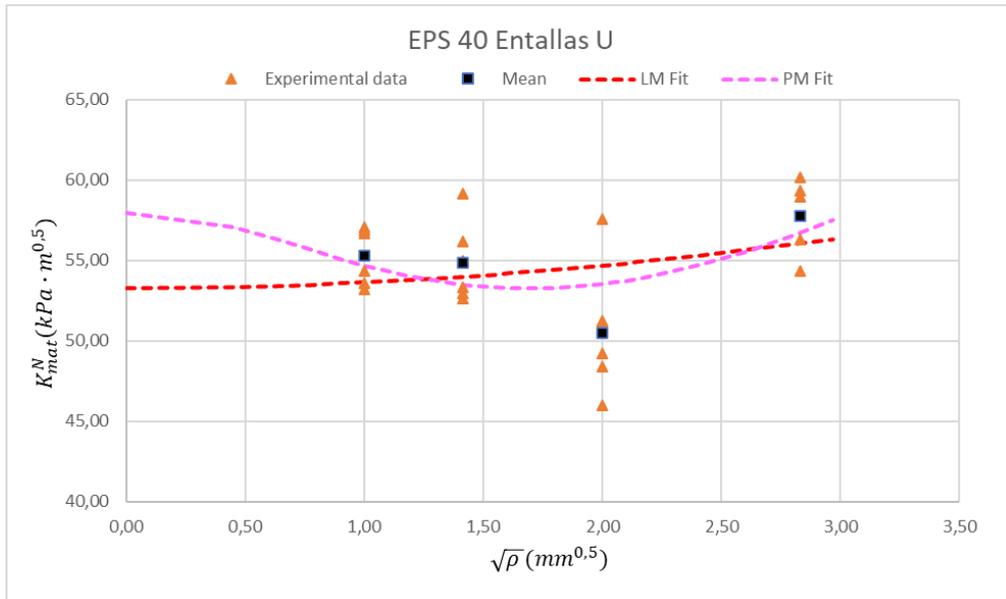


Figura 35. Mejores ajustes del LM y el PM en EPS40.

Por último, se muestran los parámetros de las aproximaciones realizadas por el método de la línea y el método del punto. El análisis mediante el método de la línea (LM) en las probetas SENB con entalla semicircular dio lugar a los parámetros mostrados en la tabla 9. En el ajuste a las muestras ligeras, los parámetros estimados son $K_{mat} = 12 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{0,5}$ y $L = 4,21 \text{ mm}$.

LM	EPS 10	EPS 40
$K_{mat} \text{ calc. } (kPa \cdot m^{0,5})$	12,10	55,27
L calc. (mm)	10,09	6,23
$K_{mat} \text{ fit } (kPa \cdot m^{0,5})$	12	53,28
L fit (mm)	4,21	18,68

Tabla 9. Resultados obtenidos de L y K_{mat} en LM.

Los parámetros obtenidos por el método del punto (PM) se muestran en la tabla 10. Los valores de tenacidad a fractura y distancia crítica para la mejor estimación del comportamiento en las espumas densas son $K_{mat} = 57,97 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{0,5}$ y $L = 5,72 \text{ mm}$.

PM	EPS 10	EPS 40
$K_{mat} \text{ calc. } (kPa \cdot m^{0,5})$	12,10	55,27
L calc. (mm)	10,09	6,23
$K_{mat} \text{ fit } (kPa \cdot m^{0,5})$	13,62	57,97
L fit (mm)	3,33	5,72

Tabla 10. Resultados obtenidos de L y K_{mat} en PM.

4.4. Granulometría

En el estudio del tamaño de las partículas de poliestireno expandido se midieron 100 perlas sueltas del material ligero y otras 100 sueltas del material denso, para tener una muestra significativa de cada tipo. Como ya se ha explicado, las perlas en el EPS10 son de mayor tamaño que las del EPS40 al tener un gran volumen de aire en su interior. Las mediciones se realizaron en base a fotografías tomadas con lupa, con hasta 7 aumentos en las perlas ligeras (Fig. 36.a) y hasta 12 aumentos en las densas (Fig. 36.b).

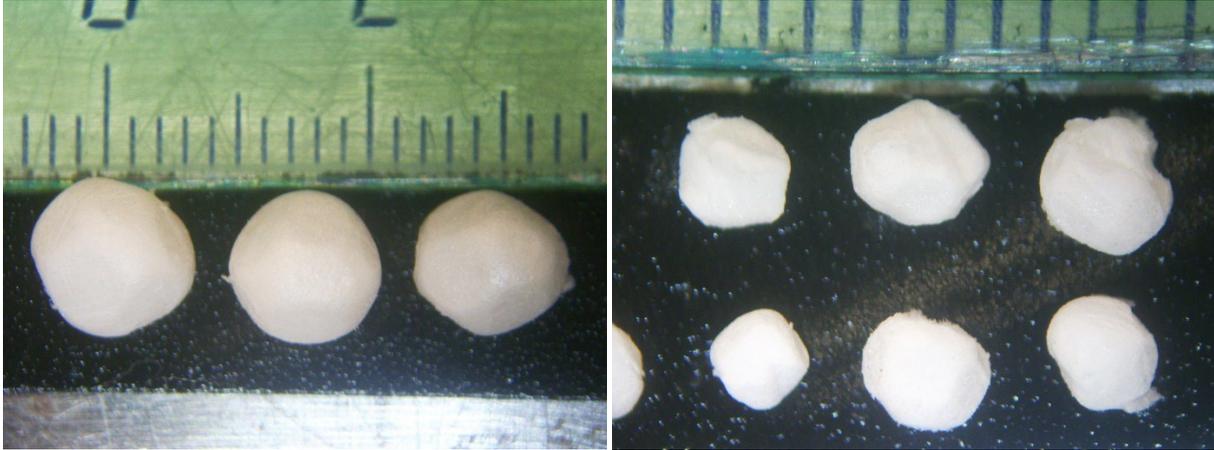


Figura 36. Perlas junto a marca de regla de 1 mm de (a) EPS10 baja densidad, (b) EPS40 alta densidad.

Una vez medidos los diámetros de los granos, se realizaron las curvas granulométricas y se obtuvieron los parámetros característicos del tamizado en suelos como son el coeficiente de uniformidad (C_u), el coeficiente de graduación (C_g) y el diámetro específico (D_{10}).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (37)$$

$$C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (38)$$

La mayor parte de los granos del EPS10 son inferiores a 6,5 mm, aunque con un pequeño porcentaje que presentan diámetros de hasta 8,3 mm. Los diámetros de las perlas ligeras se distribuyen como se muestran en la figura 37. La curva granulométrica de la figura 38 representa, para cada diámetro D , el porcentaje de partículas menores que D (mm) en las espumas ligeras EPS10.

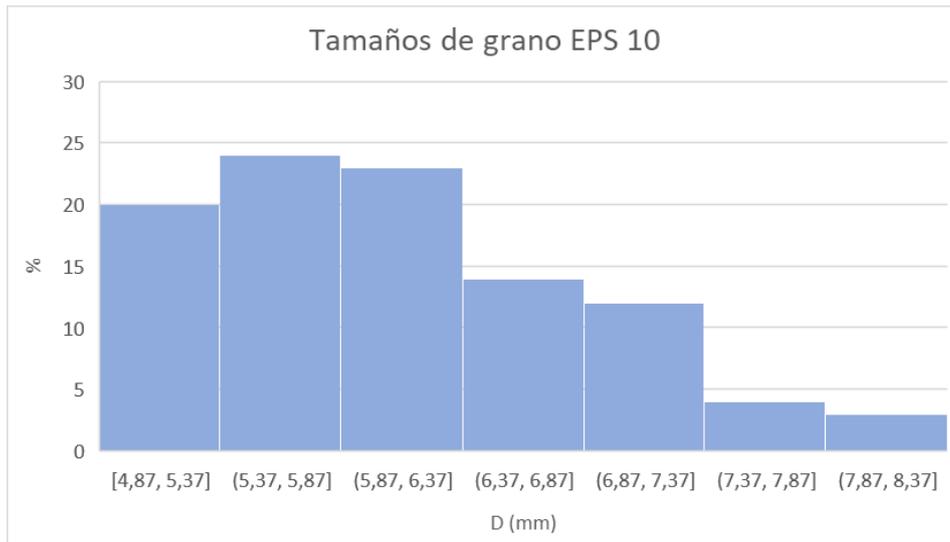


Figura 37. Distribución de los diámetros de las perlas ligeras.

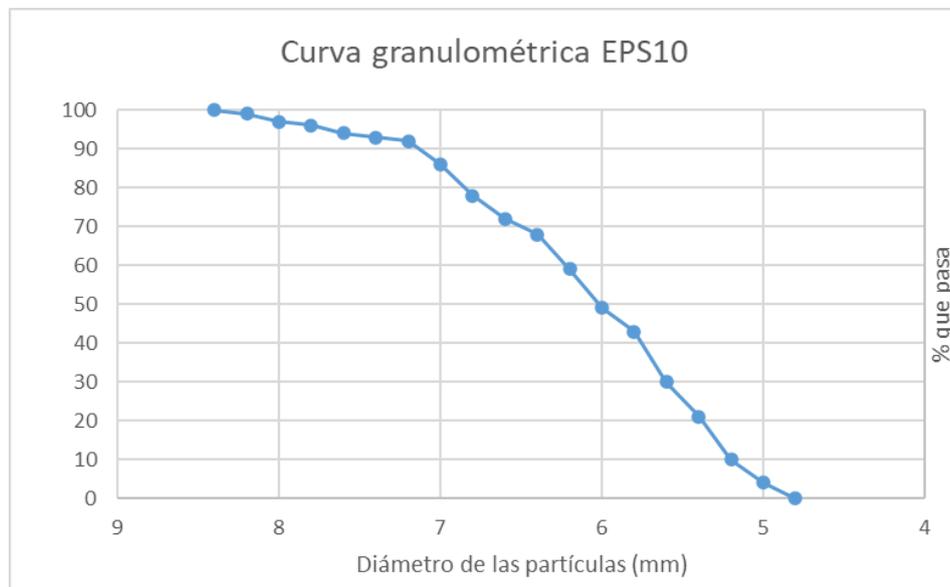


Figura 38. Curva granulométrica de las perlas ligeras.

Los diámetros de las perlas densas siguen una distribución muy normalizada, al encontrarse la mayoría alrededor de la media (Fig. 39). La mayoría de las partículas poseen un diámetro entre 1,8 y 2,8 mm. En la figura 40 se muestra la granulometría de las partículas del EPS de alta densidad.

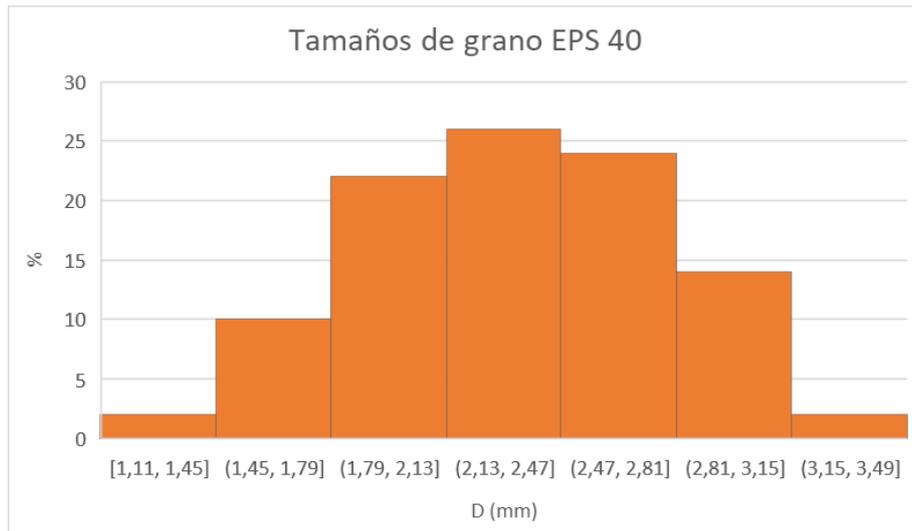


Figura 39. Distribución de los diámetros de las perlas densas.

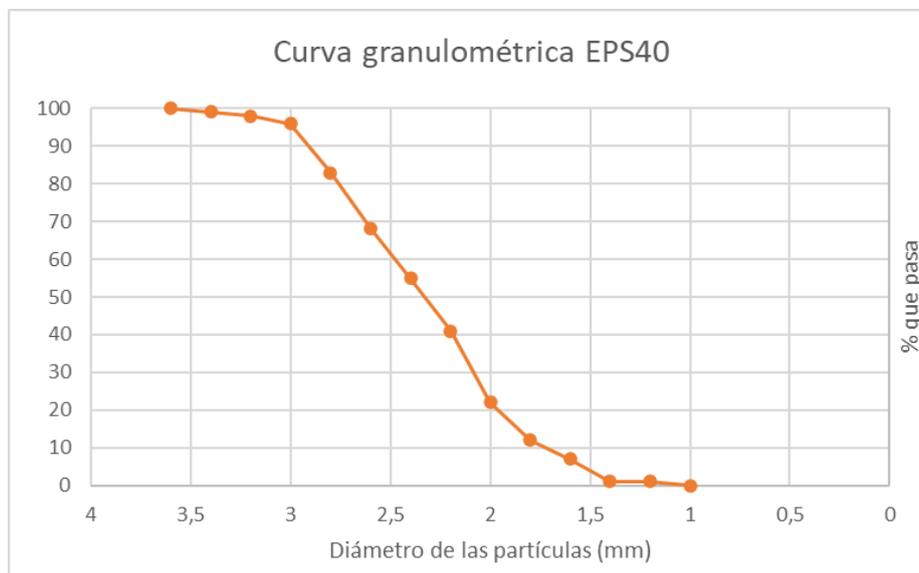


Figura 40. Curva granulométrica de las perlas densas.

Los tamaños medios de diámetro fueron 6,13 mm en las perlas del EPS 10 y 2,34 mm en las del EPS 40. La desviación estándar es inferior en las perlas densas, mientras que las perlas ligeras presentan un menor coeficiente de uniformidad (C_u). No hay diferencias muy grandes entre los granos del mismo material como así lo representan los valores de C_u próximos a uno.

Granulometría	EPS 10	EPS 40
D medio (mm)	6,13	2,34
Desv. Estándar	0,79	0,45
D mín. (mm)	4,87	1,11
D máx. (mm)	8,30	3,42
C_u	1,19	1,41
C_g	0,97	1,08
D_{10} (mm)	5,20	1,70

Tabla 11. Resumen de resultados del tamaño de grano.

4.5. Análisis de las superficies de fractura

Una vez analizados los ensayos de flexión en tres puntos y los tamaños de grano, se estudiaron la microestructura de las superficies de fractura. En el Poliestireno Expandido (EPS) los mecanismos de fractura son visibles a simple vista debido al tamaño de grano que poseen (Apartado 4.4).

La iniciación de la grieta se produjo en el hueco entre los granos de poliestireno, coincidiendo con la parte más vulnerable de la espuma (Figuras 41 a 48). En el caso de las entallas semicirculares (U), la grieta suele comenzar a propagarse en la parte de la entalla más cercana al rodillo de carga (Figuras 41, 42, 46 y 48), aunque hay excepciones, como son las figuras 45 y 47. Esto se debe a que la grieta comienza en los huecos entre los granos y en las probetas ligeras el grano es mayor en comparación a la entalla, por lo que los huecos se encuentran más separados y puede no coincidir con el punto más alto de la entalla. En las probetas densas, al tener granos más pequeños y huecos a menor separación, el punto de iniciación se respeta con más frecuencia que las probetas ligeras (Figuras 42, 46 y 48).

En las entallas con fondo recto (H), como se temía antes de comenzar los ensayos, la grieta comienza a extenderse desde una de las esquinas al ser un punto de concentración de tensiones (Figuras 43 y 44). Este hecho hace que no se respete el punto fijo de iniciación como si ocurre en la mayoría de entalla en U. Al tener 2 esquinas, se tienen 2 puntos posibles de iniciación y eso provoca que la resistencia frente a carga sea mayor porque las tensiones no se concentran en un único punto. Este hecho se ha podido comprobar con la caracterización a fractura, donde la tenacidad aparente era superior en las entallas H.

La propagación de la fisura se produjo de manera intergranular en ambos tipos de densidades de Poliestireno Expandido. Así lo demuestran las secciones transversales mostradas en las figuras 43 a 48, donde los granos están completamente enteros. La microestructura de la espuma no presenta ninguna diferencia, en este sentido, entre la fractura en entallas pequeñas, de 2 mm (Figuras 45 y 46), y entallas más grandes, de 8mm (Figuras 47 y 48). Sin embargo, en las muestras densas (Figuras 44, 46 y 48) se observan varios huecos en la superficie que podrían corresponder a varias perlas fusionadas. De este hecho se podría suponer que el mecanismo de fractura en las perlas densas es algo distinto, extendiéndose por grupo de perlas en lugar de perla a perla como así ocurre en las perlas ligeras. Finalmente, como ya se ha comentado, la propagación no rompe los granos y sigue los huecos entre las perlas de gran uniformidad, por lo que la estructura de rotura es similar independientemente del radio de entalla.

De estos resultados se concluye, que la entalla afecta únicamente en la iniciación de la grieta, no en la propagación. Cuanto menor es el radio de entalla, más posibilidades hay de que las tensiones se concentren en un área más reducida, lo que aumenta las posibilidades de que la grieta se inicie a menor carga, la carga de rotura será también menor y, por tanto, tendrá una menor tenacidad a fractura.

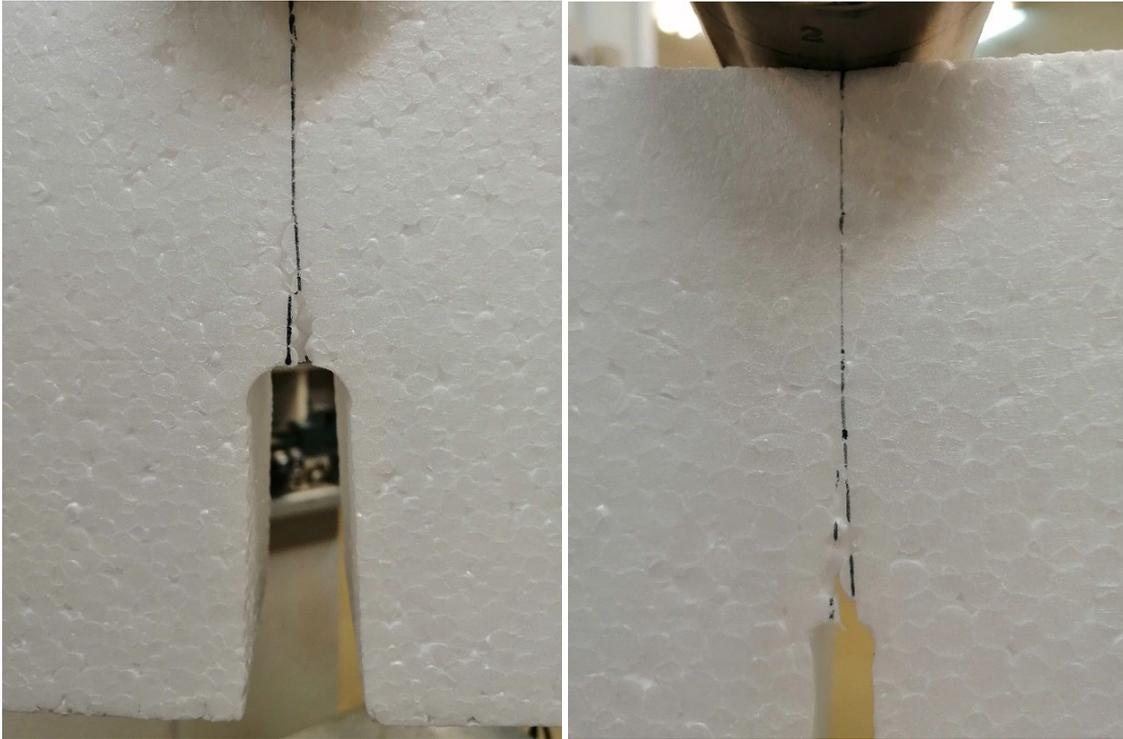


Figura 41. Propagación de la fisura en probetas ligeras (a) L-16-U-1 y (b) L-4-U-3.

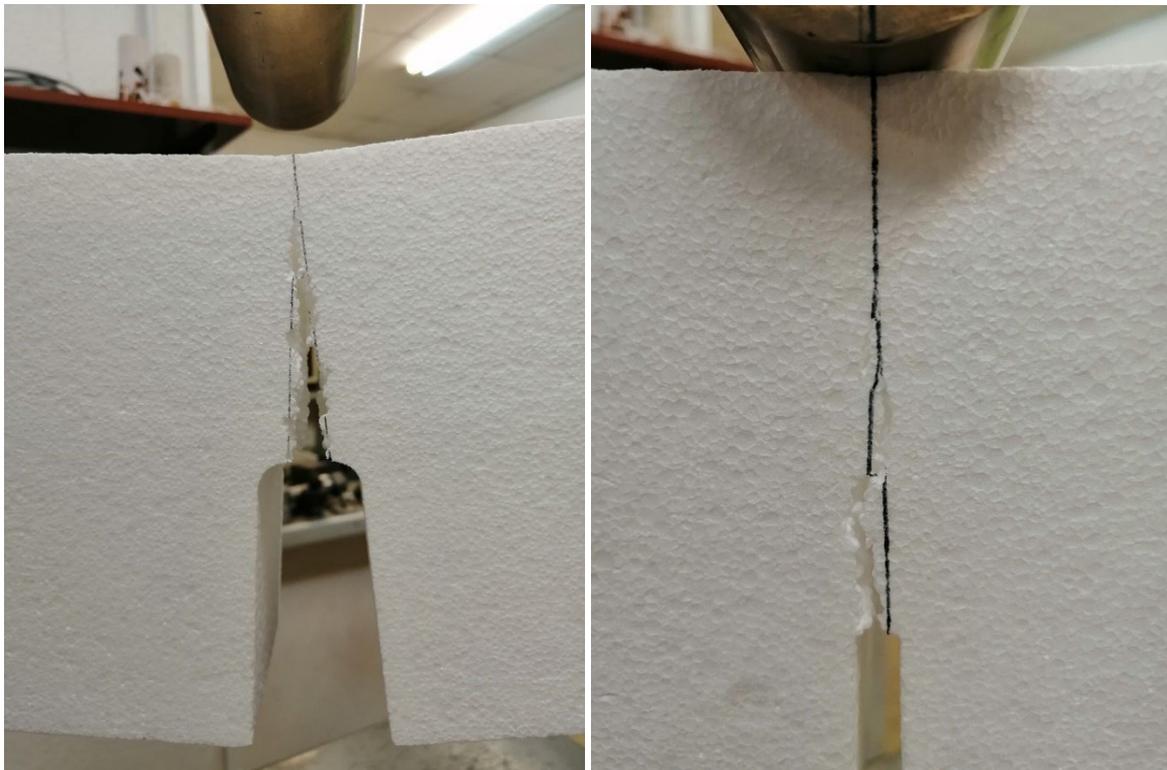


Figura 42. Propagación de la fisura en probetas densas (a) D-16-U-2 y (b) D-4-U-2.



Figura 43. Sección lateral y transversal de una probeta ligera con entalla H (L-16-H-6).

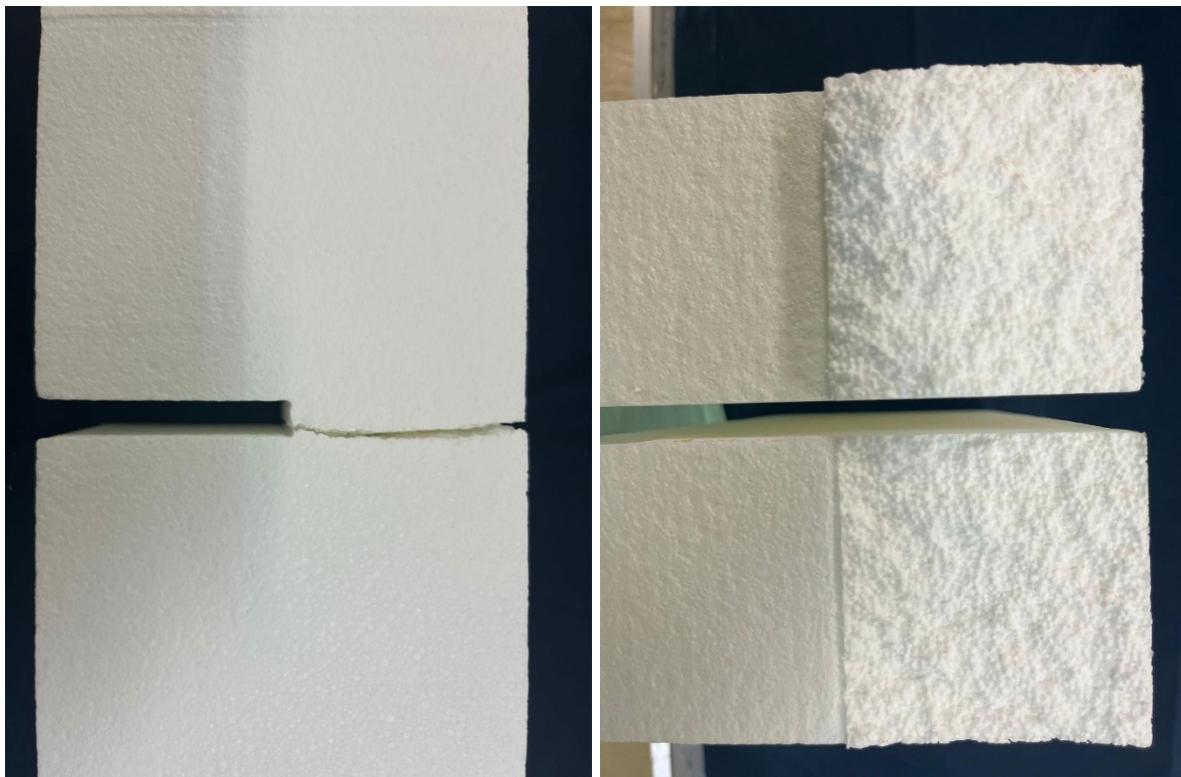


Figura 44. Sección lateral y transversal de una probeta densa con entalla H (D-8-H-6).



Figura 45. Sección lateral y transversal de una probeta ligera con entalla U de 2 mm (L-2-U-5).



Figura 46. Sección lateral y transversal de una probeta densa con entalla U de 2 mm (D-2-U-6).

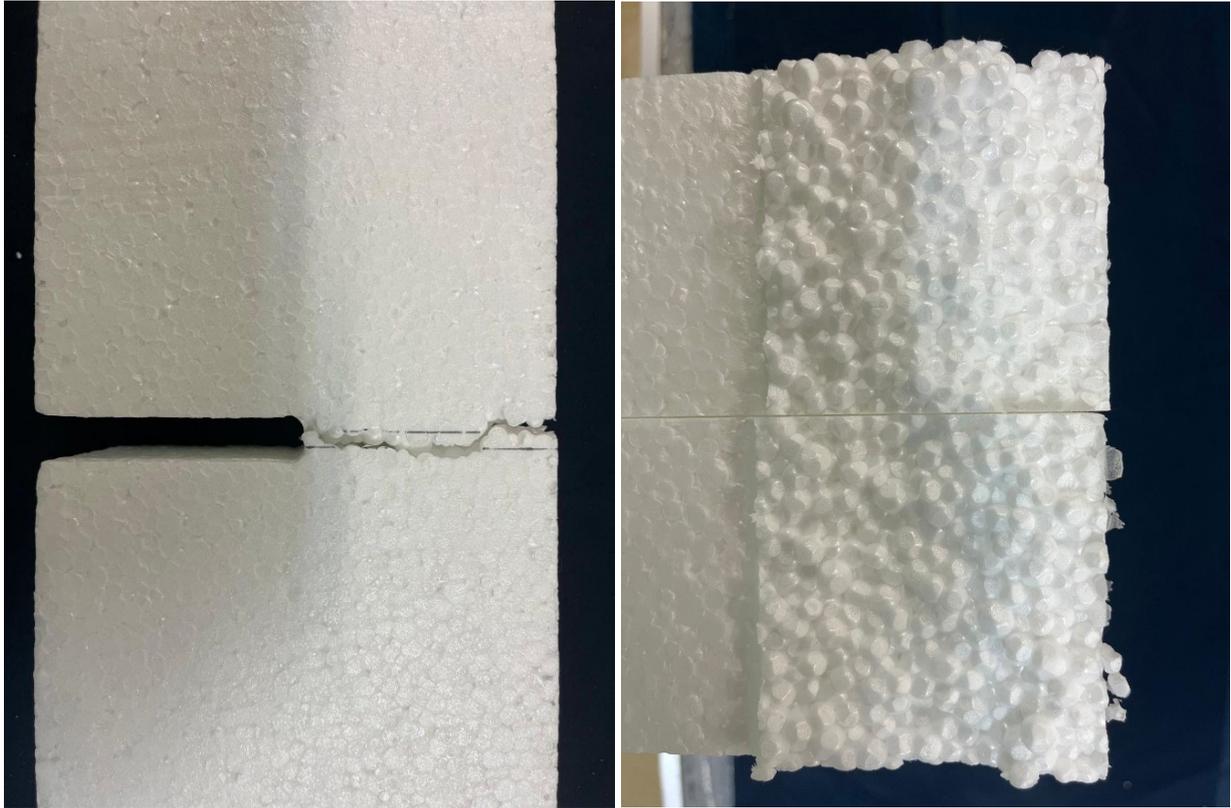


Figura 47. Sección lateral y transversal de una probeta ligera con entalla U de 8 mm (L-8-U-6).

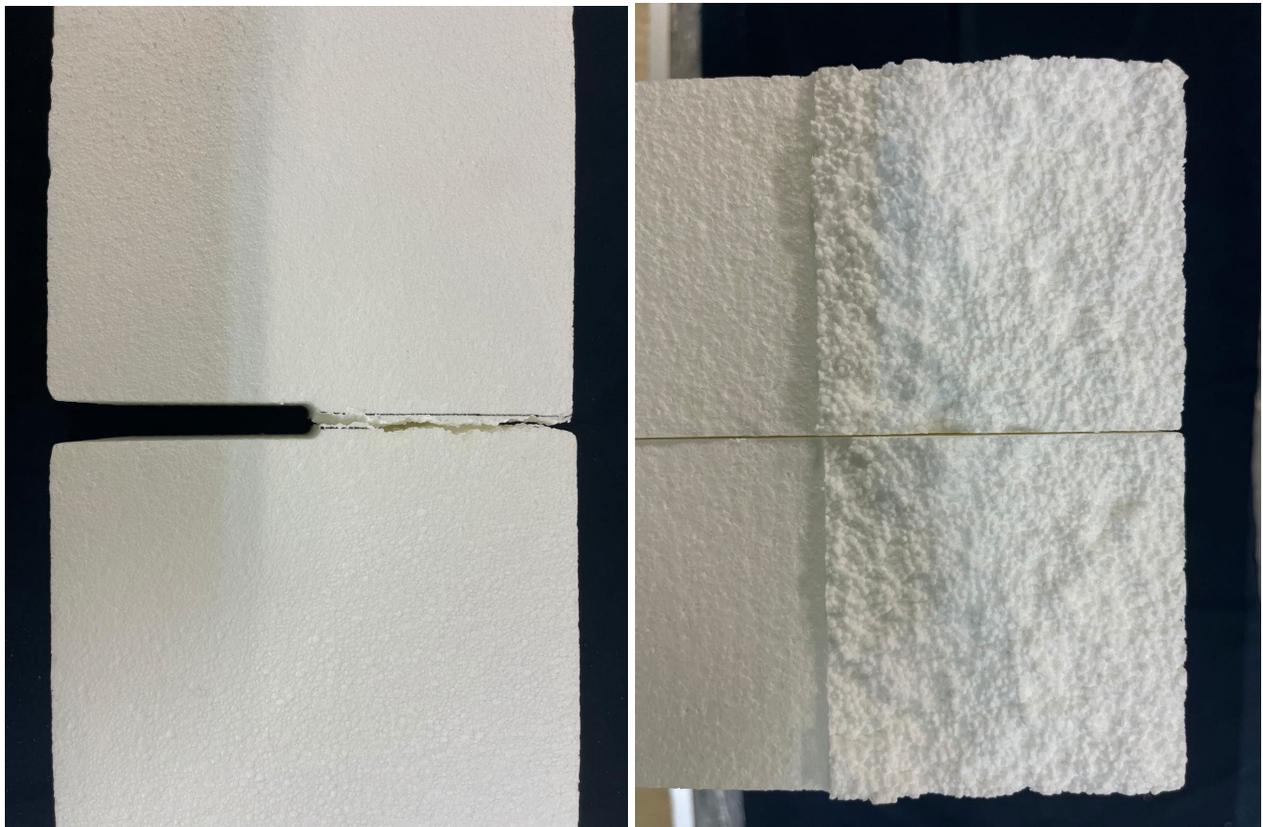


Figura 48. Sección lateral y transversal de una probeta densa con entalla U de 8 mm (D-8-U-3).

5. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster se han analizado el efecto entalla y la influencia del tamaño de grano en la fractura de espumas de Poliestireno Expandido. Se han ensayado dos tipos de densidades diferentes: 10 kg/m³ y 40 kg/m³; y cuatro tipos de radio de entalla distintos. El programa experimental ha consistido en ensayos de flexión para obtener el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción y ensayos de flexión en tres puntos con entallas (SENB) de diferentes radios. Se ha aplicado la normativa para la caracterización de fractura en materiales elastoplásticos, y se ha estudiado la aplicación de la Teoría de las Distancias Críticas (TCD) para predecir la tenacidad aparente de los dos tipos de densidades.

Las conclusiones más relevantes del presente trabajo se enumeran a continuación:

- El EPS10 mostró un claro efecto entalla y la validación de la Teoría de las Distancias Críticas mediante el ajuste al Método de la Línea. El valor de la distancia crítica obtenida mediante el mejor ajuste ($L=4$ mm) es similar al predicho con la tenacidad a fractura y la resistencia a tracción ($L=10$ mm). Además, estos valores son similares al tamaño de perla o grano (4-8 mm).
- El mecanismo de rotura en el EPS40 es diferente pudiendo deberse a que la fractura se propague por grupos de perlas fusionadas, provocando que no se haya observado el efecto entalla y el ajuste con la Teoría de las Distancias Críticas no sea adecuado para los ensayos realizados.
- Las probetas con entalla H se debieron a un error de fabricación y aunque se ha obtenido su tenacidad a fractura, no son aptas para su análisis al no tener un único punto concentrador de tensiones.
- La imposibilidad de disponer de medios con los que fabricar un radio de entalla inferior a 2 mm limita la exactitud de la tenacidad a fractura del material medida en laboratorio.
- El análisis granulométrico relevó que el Poliestireno Expandido es un material con una gran uniformidad en el tamaño de grano.
- El radio de entalla es un parámetro clave en la iniciación de la fisura y en la tenacidad aparente del material.
- La microestructura de fractura es intergranular e independiente del radio de entalla.

ANEJO I – Medidas de las probetas de ensayo

Probetas EPS10 lisas (sin entalla) de baja densidad:

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)
L-0	L-0-0-1	719	159,14	79,4
	L-0-0-2	717,25	159,04	79,54
	L-0-0-3	717,5	158,75	79,81
	L-0-0-4	717,88	158,65	78,85
	L-0-0-5	717,75	158,38	79,86
	L-0-0-6	718,13	158,73	79,95

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)	Masa (g)	Densidad, ρ (kg/m ³)
L-1	L-1-U-1	715,03	158,73	80,12	85,80	9,435
	L-1-U-2	715,01	158,71	79,92	85,91	9,473
	L-1-U-3	718	158,25	80,53	82,06	8,968
	L-1-U-4	716,5	159,39	80,5	82,02	8,922
	L-1-U-5	718,25	158,75	79,96	82,70	9,071
	L-1-U-6	718	158,75	80	83,50	9,157

Probetas EPS10 de baja densidad con entalla (U):

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)	t (mm)	s (mm)	2p (mm)	Fondo, f (mm)
L-16-U	L-16-U-1	717,75	158,5	80,06	16,79	16,45	17,52	76,61
	L-16-U-2	718,38	158,63	79,05	16,9	16,33	17,14	76,66
	L-16-U-3	717,75	158,5	80	16,83	16,49	17,36	76,59
	L-16-U-4	718,13	158,33	78,88	16,97	16,55	17,39	76,61
	L-16-U-5	718,38	158,68	78,32	16,92	16,33	17,46	76,81
	L-16-U-6	717,5	158,33	80,05	16,81	16,59	17,59	76,56
L-8-U	L-8-U-1	718	158,58	78,95	9,09	8,9	9,73	76,28
	L-8-U-2	718	158,33	79,76	9,04	8,79	9,4	76,69
	L-8-U-3	718	158,6	79,05	8,99	8,4	9,3	76,74
	L-8-U-4	717,88	158,55	78,71	8,99	8,13	9,39	77,08
	L-8-U-5	718,25	158,43	79,06	9,34	8,47	9,77	76,65
	L-8-U-6	717,25	158,5	79,36	8,93	8,6	9,64	76,62
L-4-U	L-4-U-1	717,88	158,15	78,75	5,21	4,73	5,75	77,4
	L-4-U-2	718	158,53	78,9	5,37	4,6	5,63	77,17
	L-4-U-3	718,75	158,53	80,03	5,36	4,67	5,62	77,06
	L-4-U-4	717,88	158,83	79,38	5,44	4,59	5,32	76,9
	L-4-U-5	717,63	158,5	79,66	5,13	4,68	5,46	77,22
	L-4-U-6	718,25	158,25	79,46	4,75	4,56	5,69	77,14
L-2-U	L-2-U-1	717,63	158,55	78,91	3,82	3,38	5,8	76,19
	L-2-U-2	717,37	158,9	79,77	3,69	3,27	7,1	76,06
	L-2-U-3	717,75	158,95	79,31	3,61	3,13	6,61	76,61
	L-2-U-4	717,25	158,95	79,91	3,79	2,89	6,49	76,09
	L-2-U-5	717,38	158,33	78,79	3,72	3,02	5,8	76,66
	L-2-U-6	717,5	158,48	78,59	3,57	3,09	5,74	75,93

Probetas EPS40 lisas (sin entalla)de alta densidad:

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)
D-0	D-0-0-1	718,38	159,18	80,49
	D-0-0-2	718,88	158,96	80,26
	D-0-0-3	718,13	159,6	79,72
	D-0-0-4	718,25	159,2	80,51
	D-0-0-5	718,38	158,98	80,28
	D-0-0-6	718,13	158,85	80,37

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)	Masa (g)	Densidad, ρ (kg/m ³)
D-1	D-1-U-2	718,13	159,25	80,35	374,00	40,70
	D-1-U-3	719	159,65	80,4	364,99	39,55
	D-1-U-4	718,73	159,75	80,7	367,49	39,66
	D-1-U-5	718,25	159	80,48	375,64	40,87
	D-1-U-6	718,63	158,25	80,52	374,24	40,87
	D-1-U-7	716,5	158,25	80,32	392,70	43,12

Probetas EPS40 de alta densidad con entalla (U):

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)	t (mm)	s (mm)	2ρ (mm)	Fondo, f (mm)
D-16-U	D-16-U-1	718,25	159,15	80,15	15,24	15,12	15,25	78,73
	D-16-U-2	717,88	159,73	80,34	15,35	15,08	15,35	79,01
	D-16-U-3	718	159,65	80,38	15,27	15,1	15,25	78,97
	D-16-U-4	718,25	159,4	80,32	15,34	15,05	15,19	78,91
	D-16-U-5	717,88	159,43	80,41	15,32	15,13	15,24	78,77
	D-16-U-6	718,13	159,65	79,48	15,58	15,47	15,31	78,71
D-8-U	D-8-U-1	718,13	159,98	80,18	7,45	7,06	7,32	79,63
	D-8-U-2	718,38	159,53	80,28	7,3	7,01	7,12	79,51
	D-8-U-3	718,38	159,55	80,41	7,31	7,03	7,11	79,51
	D-8-U-4	718,38	159,45	80,31	7,5	7,13	7,18	79,38
	D-8-U-5	718	159,18	80,37	7,61	7,28	7,36	79,2
	D-8-U-6	718	159,93	79,15	7,84	7,58	7,61	79,16
D-4-U	D-4-U-1	717,75	158,9	80,22	3,95	3,76	3,68	78,74
	D-4-U-2	717,88	159,15	80,52	4,21	3,45	3,36	78,85
	D-4-U-3	718,13	159,1	80,39	4,34	3,54	3,48	78,56
	D-4-U-4	718,13	159,45	80,33	4,39	3,53	3,46	78,74
	D-4-U-5	718,38	159,45	80,46	4,37	3,86	3,98	78,76
	D-4-U-6	718,25	159,25	79,15	4,42	4,14	4,07	78,24
D-2-U	D-2-U-1	718,5	159,23	79,23	2,68	2,07	3,27	77,27
	D-2-U-2	718,38	159,33	80,18	2,36	1,87	3,09	78,1
	D-2-U-3	718,63	159,38	80,33	2,58	1,93	2,92	77,68
	D-2-U-4	718,5	159,13	80,39	2,45	1,83	3,12	77,47
	D-2-U-5	718,25	159,15	80,35	2,53	1,99	2,92	77,72
	D-2-U-6	718,25	159,38	80,33	2,41	2,04	3,17	77,88

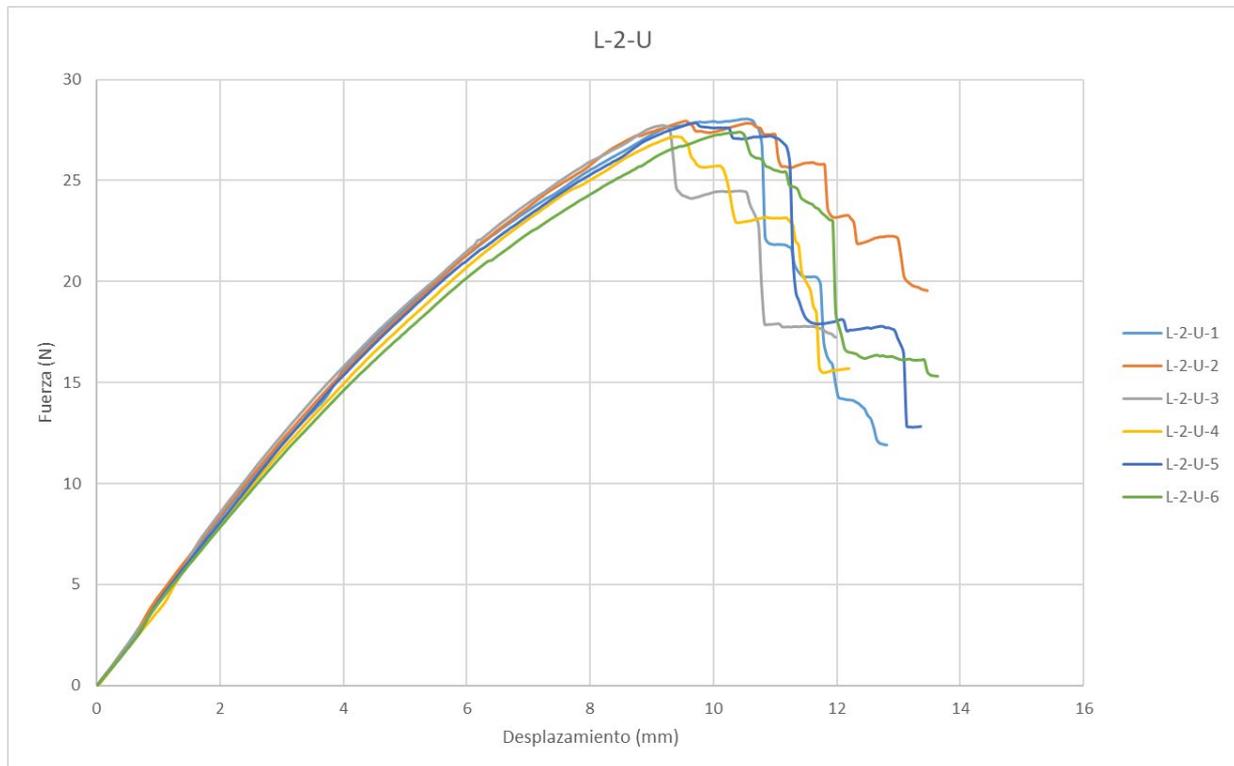
Probetas con fondo de entalla recto (H):

	CÓDIGO	Longitud, l (mm)	Altura, W (mm)	Espesor, B (mm)	t (mm)	s (mm)	2p (mm)	Fondo, f (mm)
L-16-H	L-16-H-1	719,13	158,89	78,77	16,99	16,13	18,02	77,49
	L-16-H-2	719,63	159,1	79,95	16,75	16,32	18,44	78,05
	L-16-H-3	719,63	159,45	80,05	16,63	16,22	18,15	78,02
	L-16-H-4	719,63	158,95	79,77	16,61	16,3	18,2	77,87
	L-16-H-5	719,75	158,94	80,03	17,03	16,77	18,73	77,71
	L-16-H-6	719,5	158,66	79,78	17,34	16,89	18,82	77,41
L-8-H	L-8-H-1	718,75	158,79	79,77	8,87	8,4	10,42	76,54
	L-8-H-2	719,5	158,56	79,85	9,04	8,77	10,81	76,64
	L-8-H-3	719,13	159,04	79,56	8,65	8,57	10,72	76,75
	L-8-H-4	719,13	158,91	79,82	8,49	8,5	10,59	76,99
	L-8-H-5	719,5	159,14	79,7	8,63	8,32	10,27	76,68
	L-8-H-6	718,5	158,76	79,24	8,84	8,47	10,75	76,11
L-4-H	L-4-H-1	718,34	158,69	79,85	4,88	4,3	5,64	77,17
	L-4-H-2	719,13	158,99	79,92	4,54	4,06	5,48	78,05
	L-4-H-3	719,34	159,18	80,04	4,61	4,24	5,95	76,92
	L-4-H-4	719,25	158,97	80,25	4,56	4,32	6,16	76,77
	L-4-H-5	718,88	159,06	79,9	4,56	4,28	6,7	76,86
	L-4-H-6	718,63	159,05	79,84	4,72	4,28	6,37	76,86
L-2-H	L-2-H-1	718,75	159,18	79,72	3,14	2,47	4,92	76,52
	L-2-H-2	718,75	158,98	80,21	3,13	2,15	4,3	77,18
	L-2-H-3	719,75	158,95	79,91	3,32	2,75	5,21	77,03
	L-2-H-4	719,25	159,13	79,9	3,21	2,31	4,93	76,8
	L-2-H-5	718,63	159,25	79,99	2,55	2,03	4,42	77,08
	L-2-H-6	719	159,03	80,27	2,23	2,07	4,21	76,96
D-16-H	D-16-H-1	719,13	159,5	80,51	16,08	15,55	16,22	78,16
	D-16-H-2	719,88	159,56	80,48	15,78	15,63	16,07	78,55
	D-16-H-3	720,13	159,63	80,37	15,92	15,68	16,15	78,64
	D-16-H-4	719,38	159,6	80,49	15,6	15,42	16,1	78,42
	D-16-H-5	718,88	159,68	80,41	16,04	15,68	16,26	78,15
	D-16-H-6	718,34	159,24	80,35	15,96	15,94	16,56	77,96
D-8-H	D-8-H-1	718,88	159,3	80,25	8,22	7,92	8,46	78,01
	D-8-H-2	719,25	159,43	80,34	8,06	7,84	8,43	77,96
	D-8-H-3	719,63	159,43	80,3	8,22	7,94	8,33	77,98
	D-8-H-4	719,13	159,34	80,26	8,35	8,17	8,6	77,8
	D-8-H-5	718,63	159,39	80,24	8,29	8,07	8,58	77,82
	D-8-H-6	718,5	159,26	80,29	8,42	8,07	8,42	77,66
D-4-H	D-4-H-1	719,13	159,41	80,26	4,26	4,02	4,36	78,36
	D-4-H-2	719,75	159,49	80,37	4,25	3,86	4,18	78,37
	D-4-H-3	720	159,68	80,23	4,45	3,85	4,36	78,14
	D-4-H-4	719,5	159,51	80,27	4,5	3,47	4,13	78,11
	D-4-H-5	718,75	159,79	79,98	3,74	3,34	3,71	78
	D-4-H-6	718,63	159,74	80,16	3,79	3,6	3,92	77,75
D-2-H	D-2-H-1	719,38	159,78	80,19	1,75	1,47	1,8	78,37
	D-2-H-2	719,63	160,15	80,19	1,8	1,55	2,06	78,26
	D-2-H-3	719,38	159,75	80,18	3,05	2,64	2,94	77,85
	D-2-H-4	719,13	159,68	79,98	2,39	2,6	2,42	78
	D-2-H-5	720	160,05	80,38	2,02	1,84	2,37	78,63
	D-2-H-6	720	160,15	80,37	2	1,65	1,92	78,31

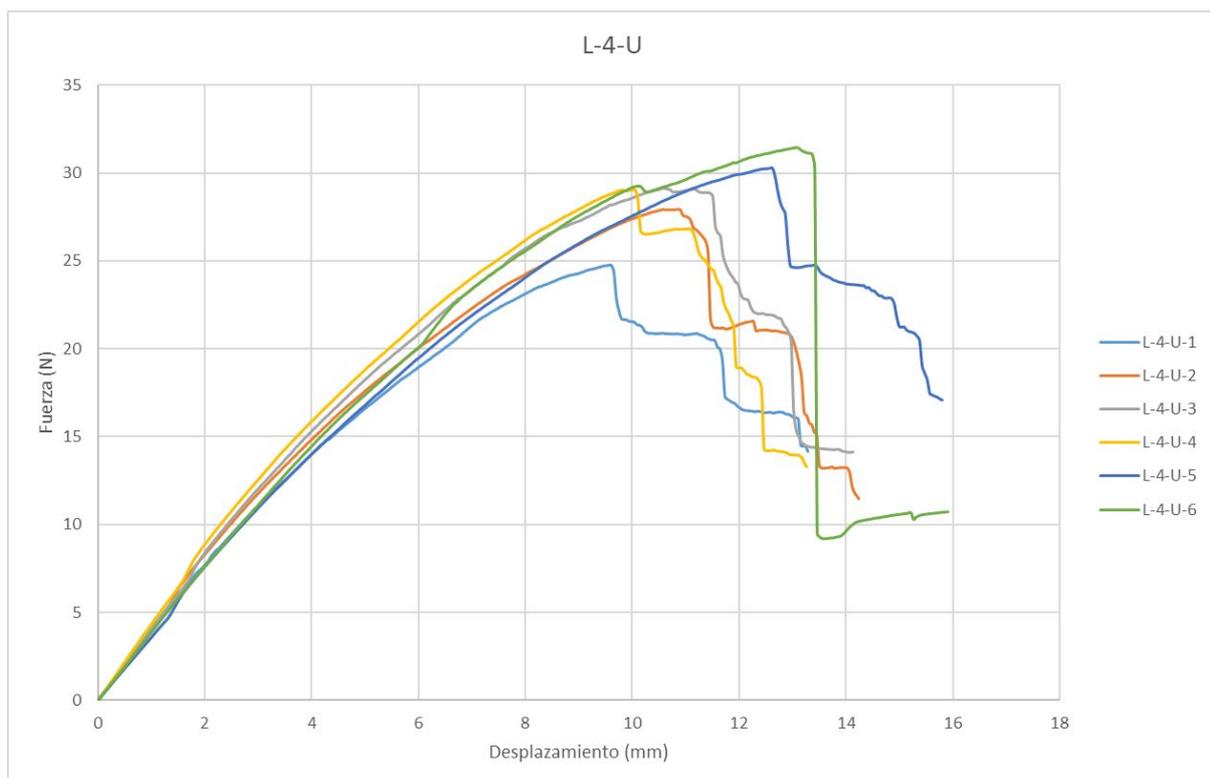
ANEJO II - Resultados de los ensayos a flexión en tres puntos

Curvas fuerza-desplazamiento en probetas con entalla semicircular (U)

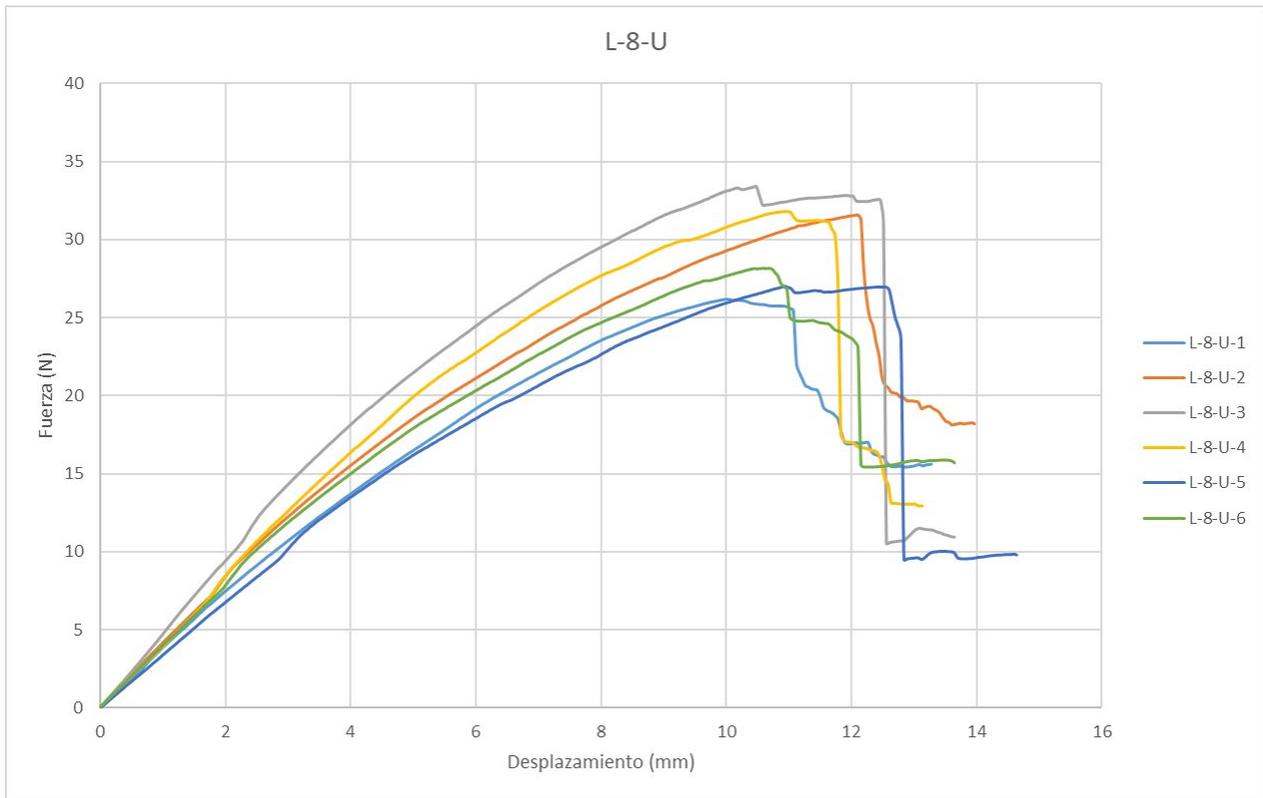
- Probetas ligeras con entalla U 2mm:



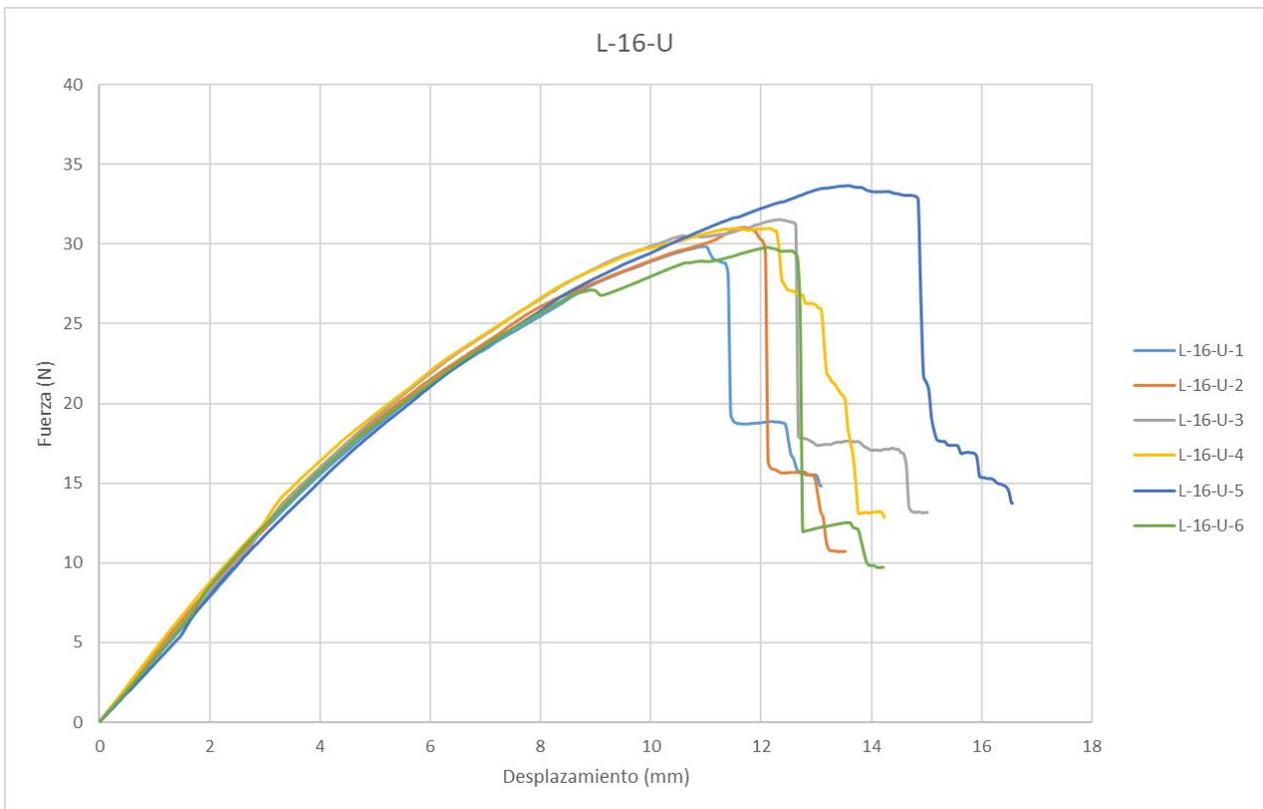
- Probeta ligera con entalla U 4 mm:



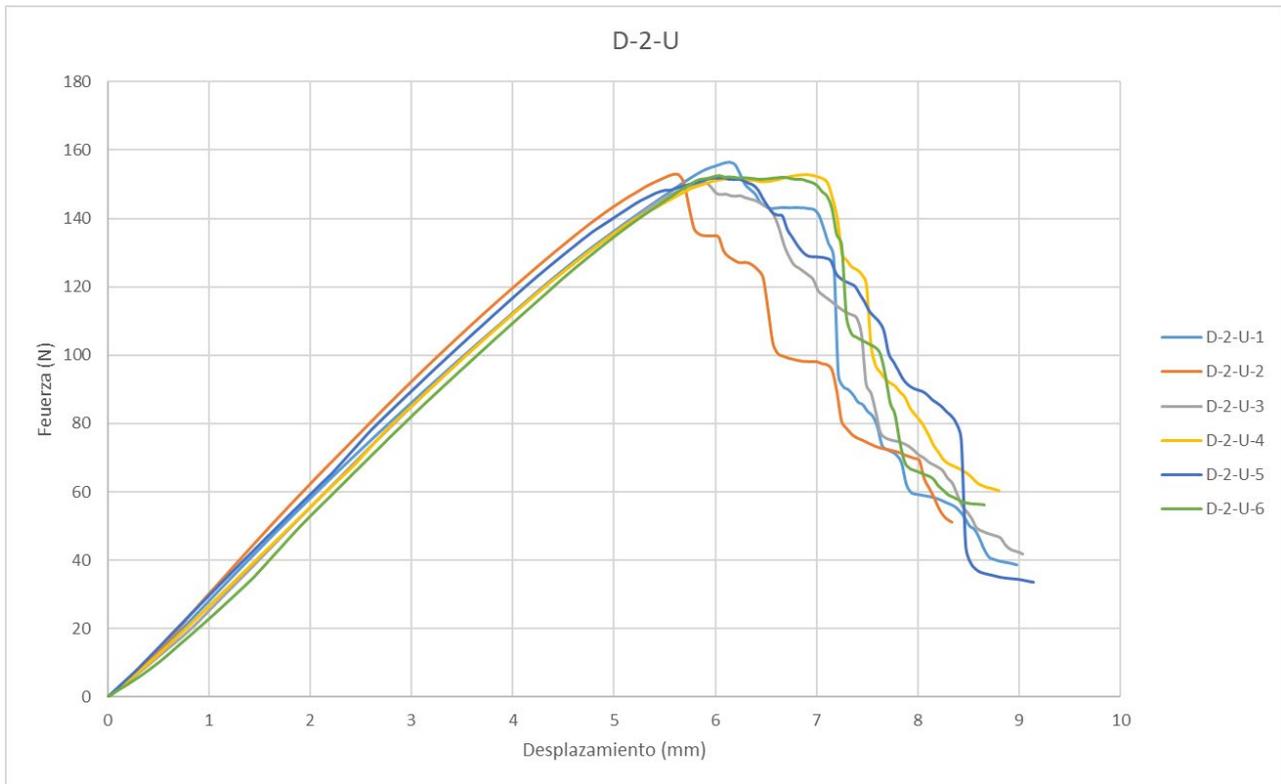
- Probetas ligeras con entalla U 8 mm:



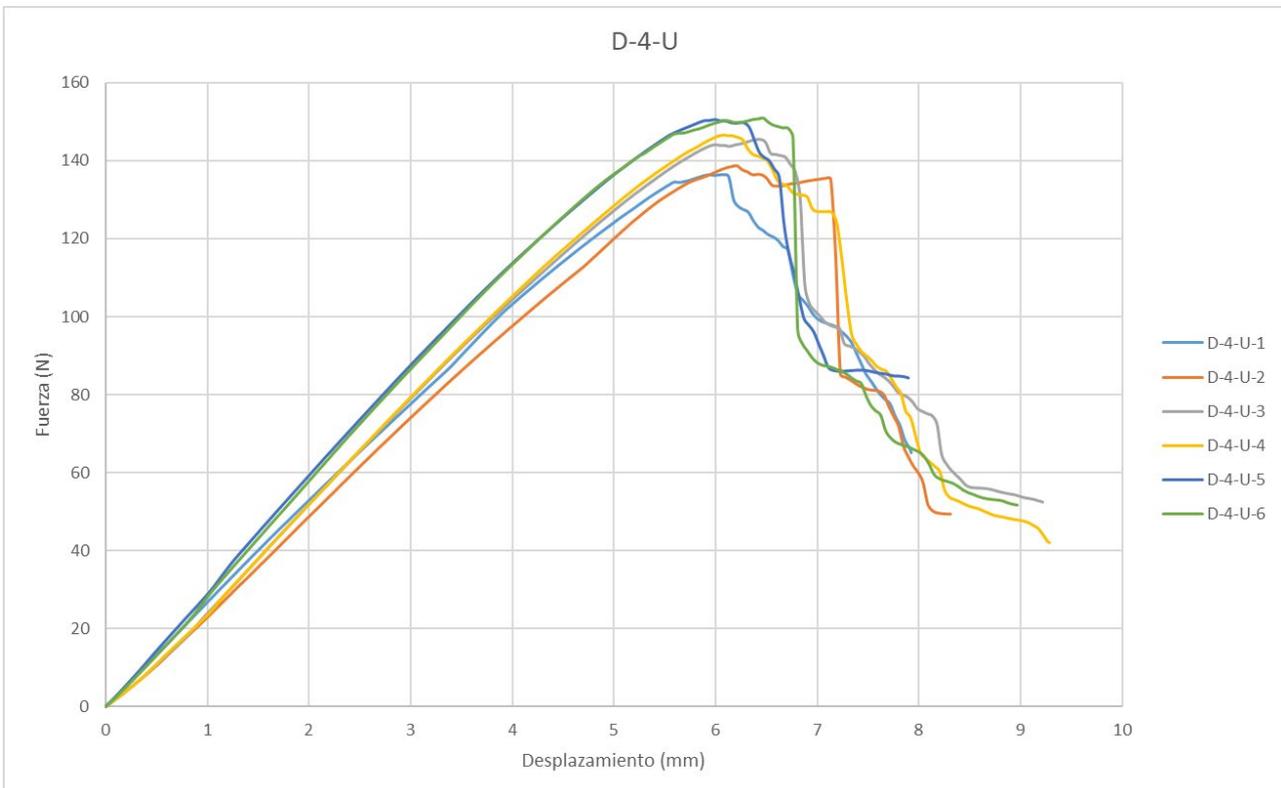
- Probetas ligeras con entalla U 16 mm:



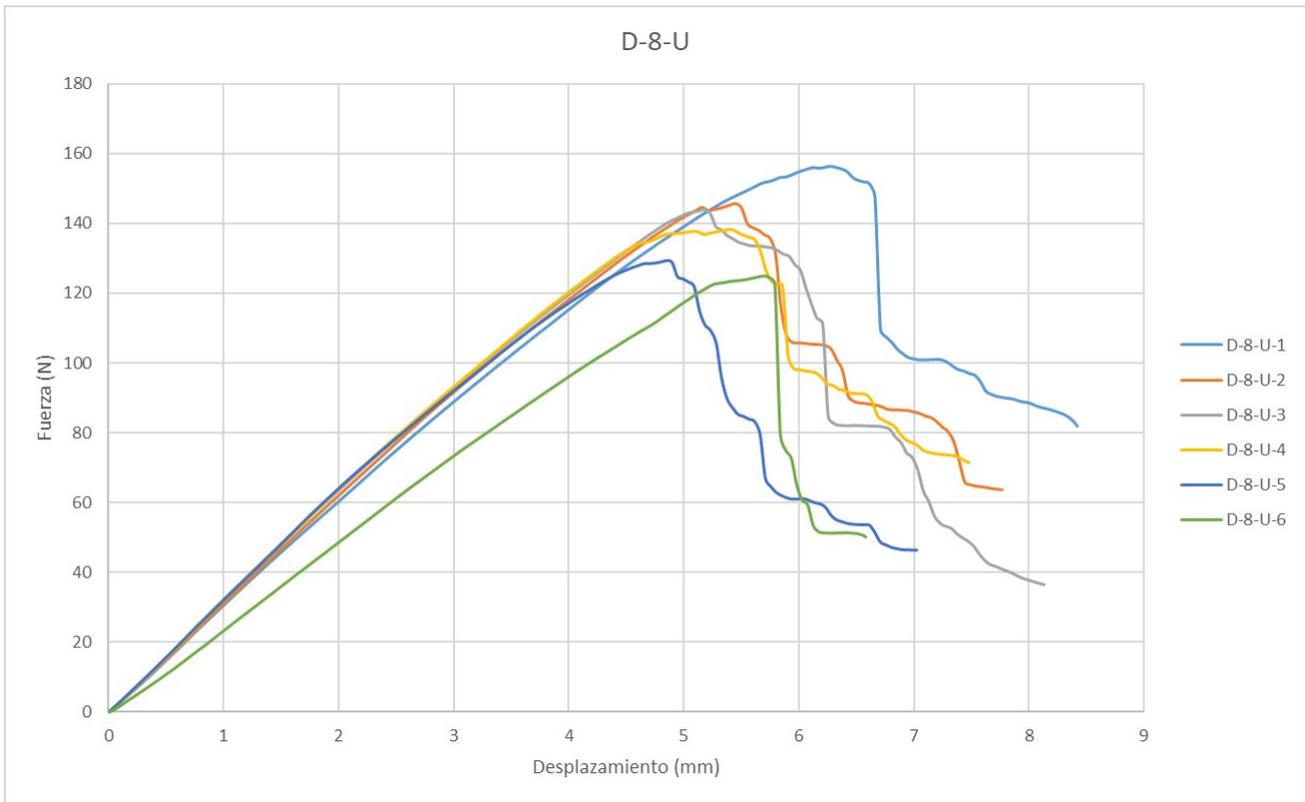
- Probetas densas con entalla U 2 mm:



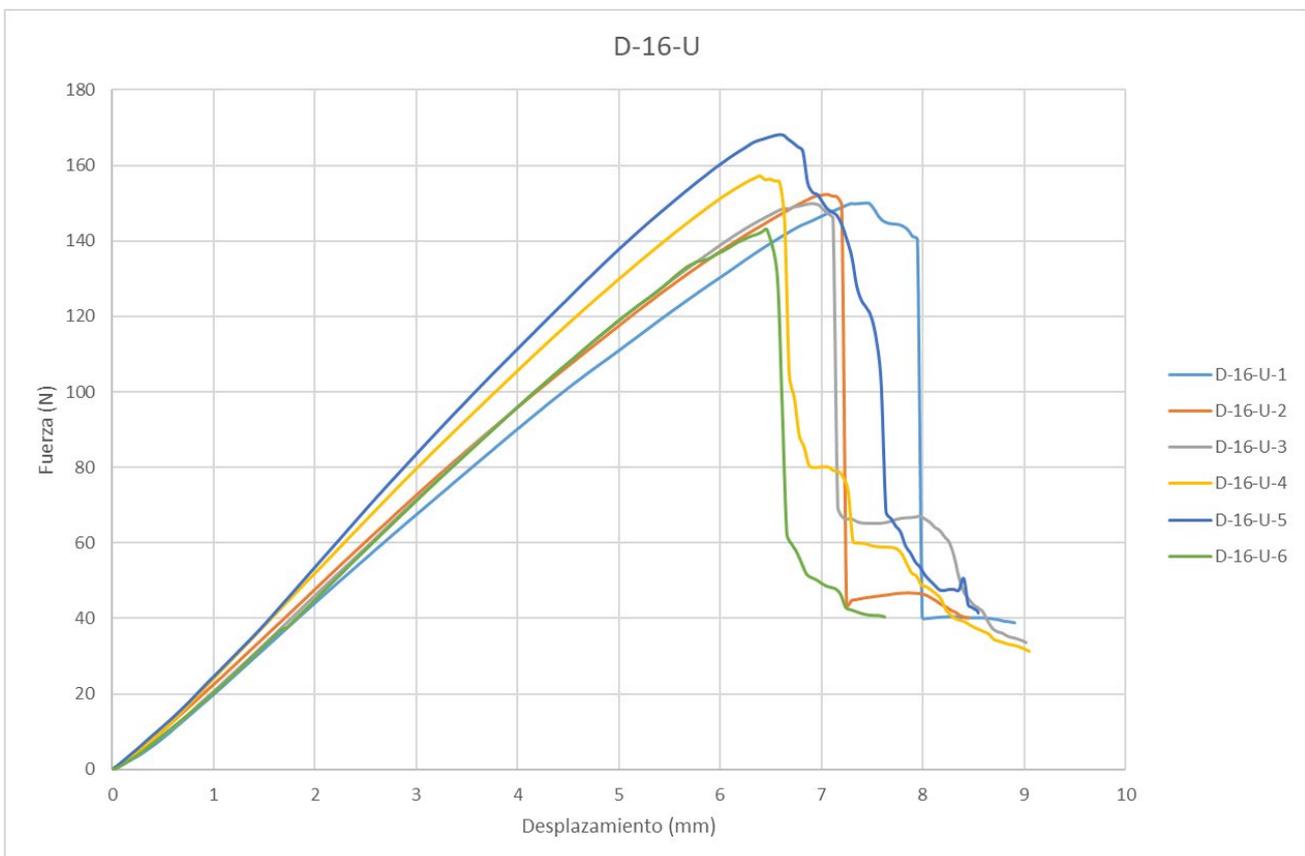
- Probetas densas con entalla U 4 mm:



- Probetas densas con entalla U 8 mm:

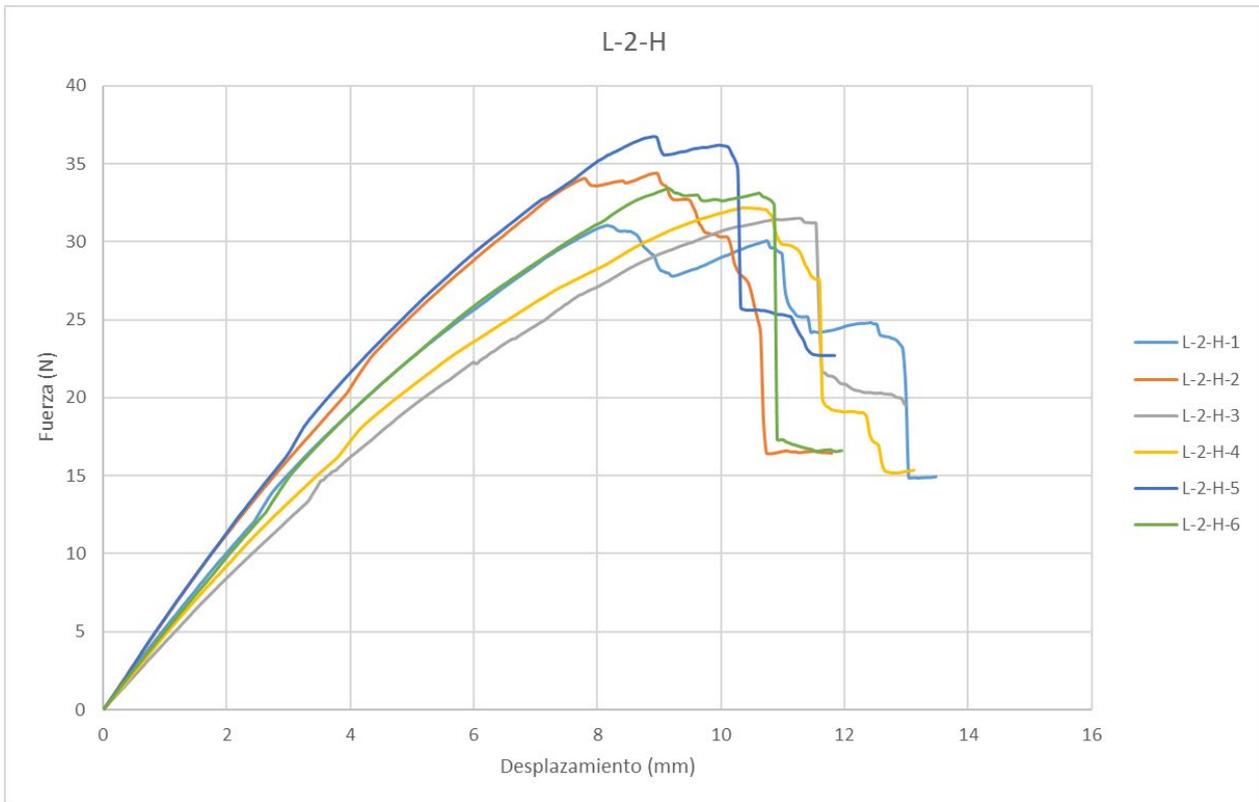


- Probetas densas con entalla U 16 mm:

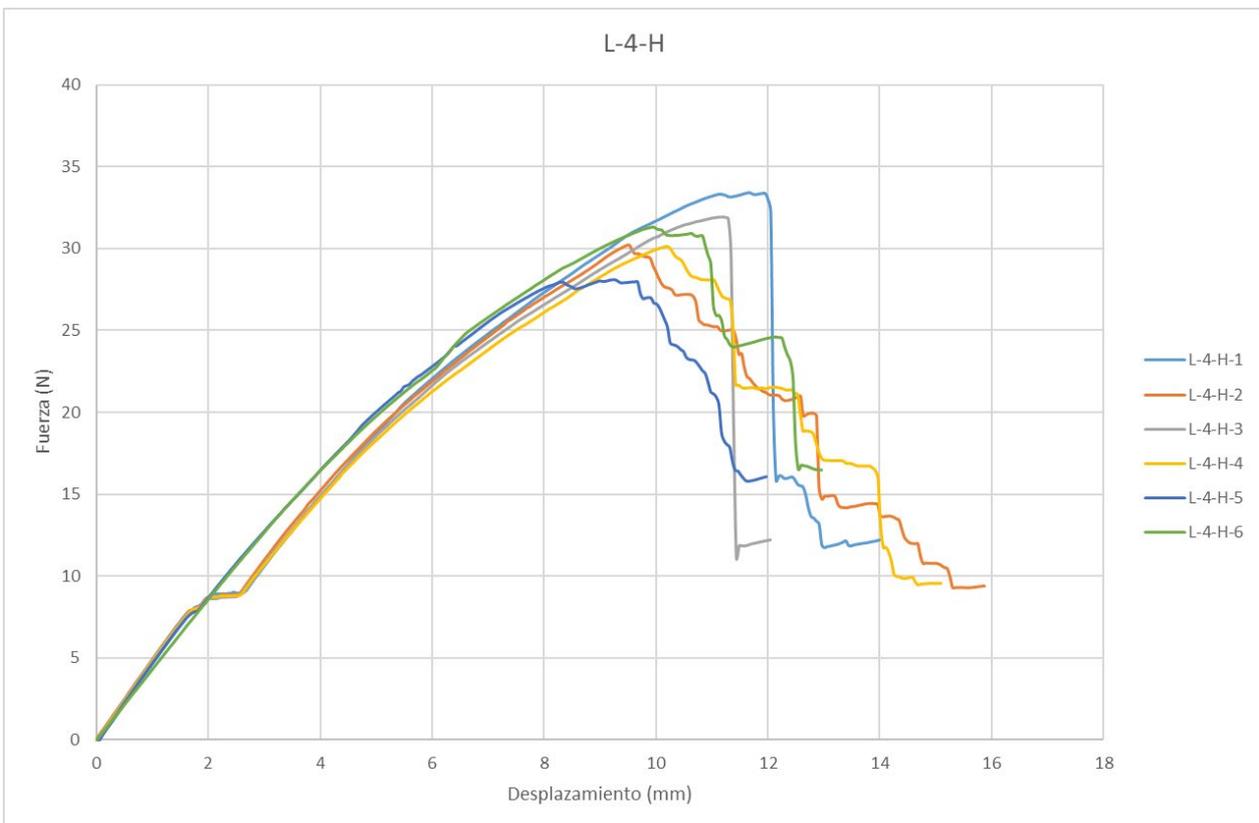


Curvas fuerza-desplazamiento en probetas con entalla recta (H)

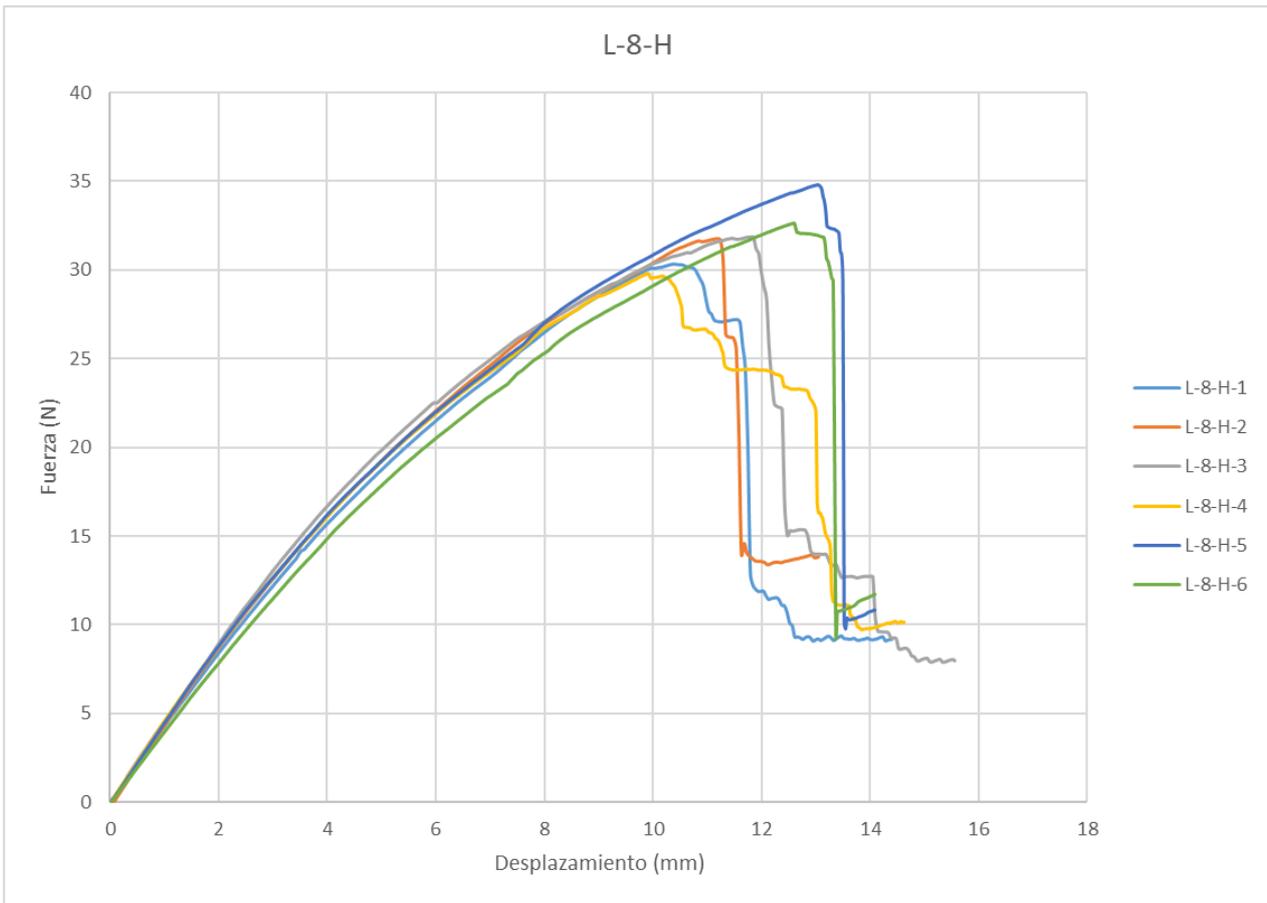
- Probetas ligeras con entalla H 2 mm:



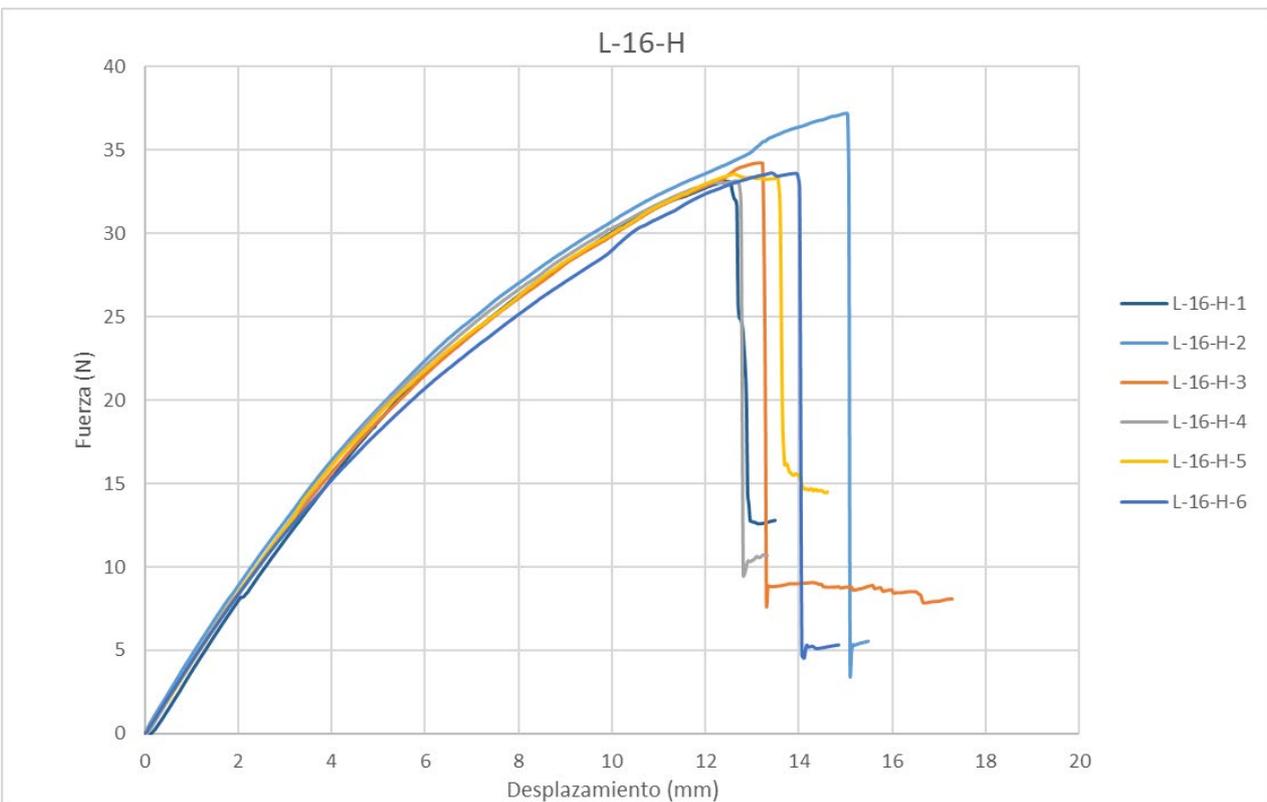
- Probetas ligeras con entalla H 4 mm:



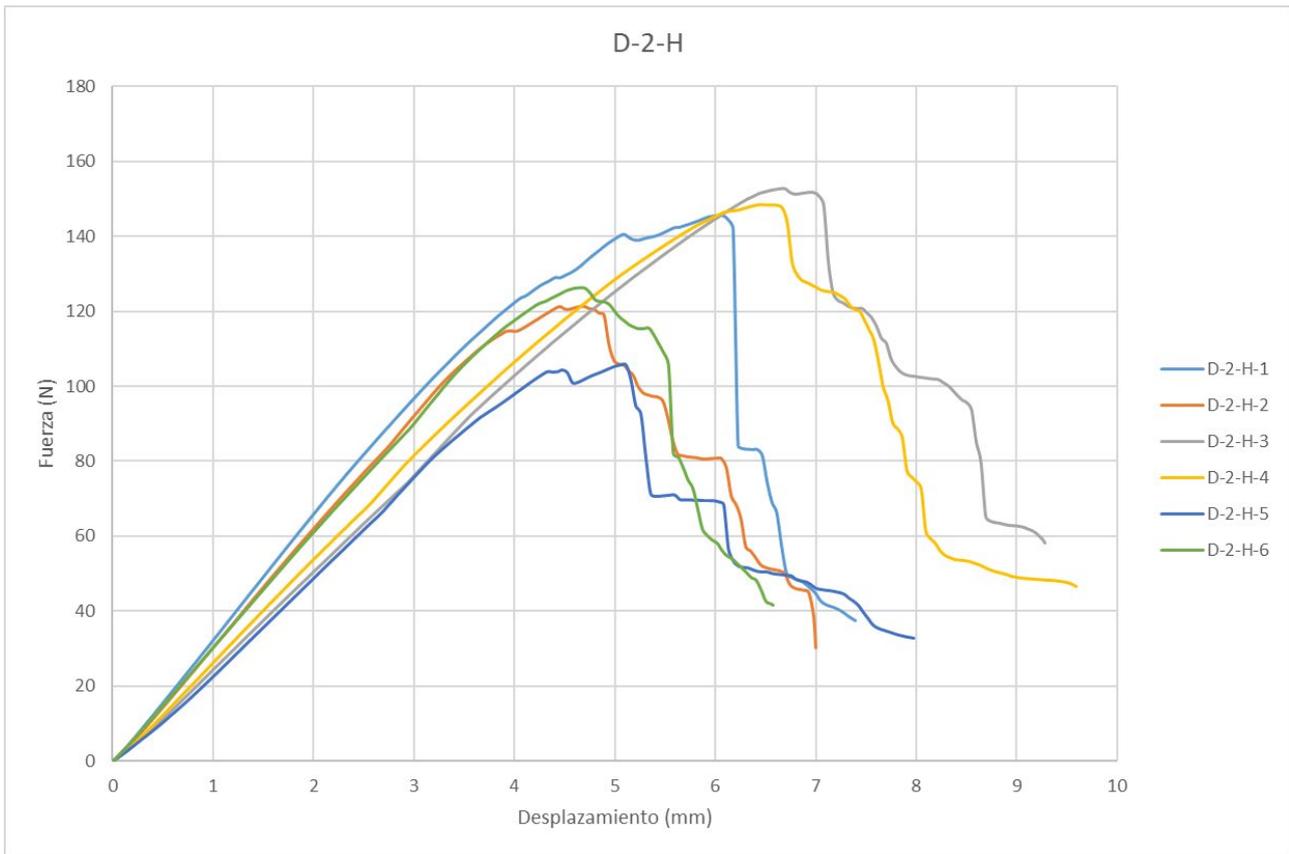
- Probetas ligeras con entalla H 8 mm:



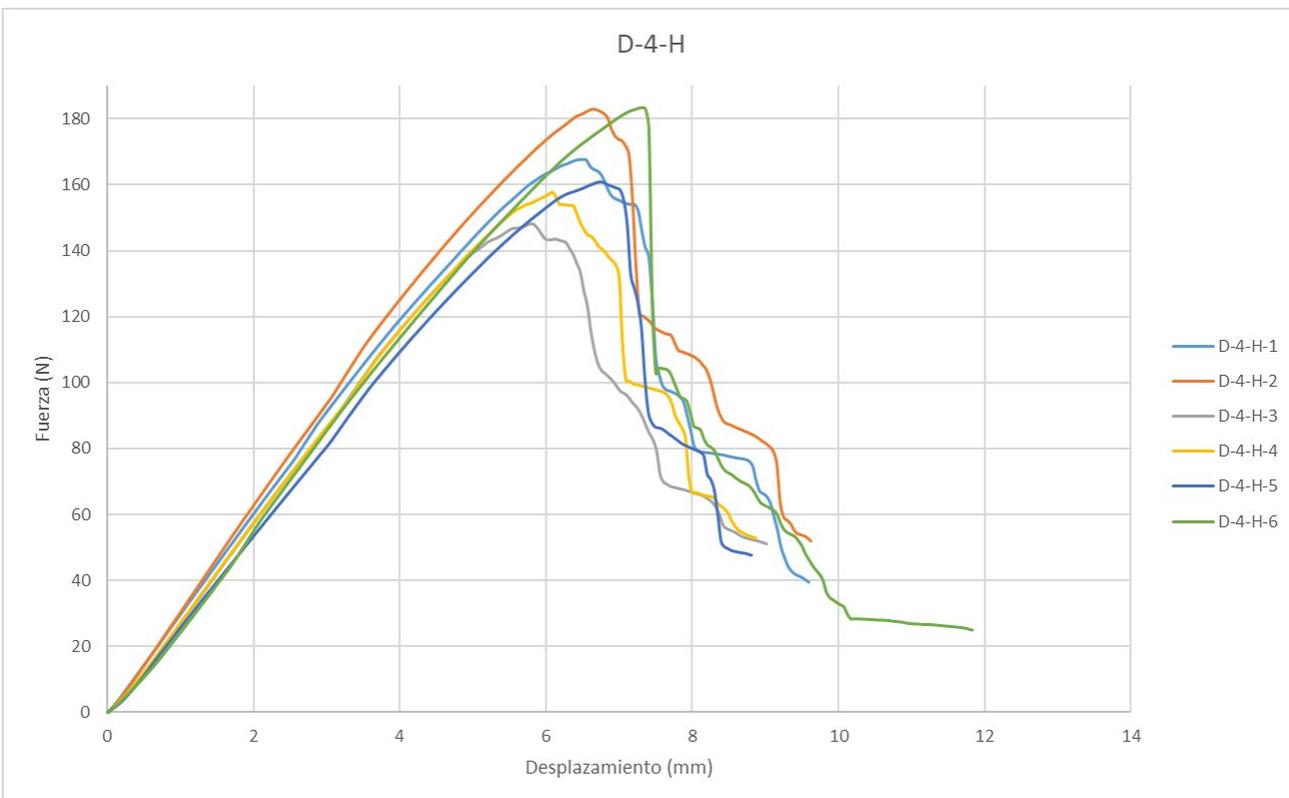
- Probetas ligeras con entalla H 16 mm:



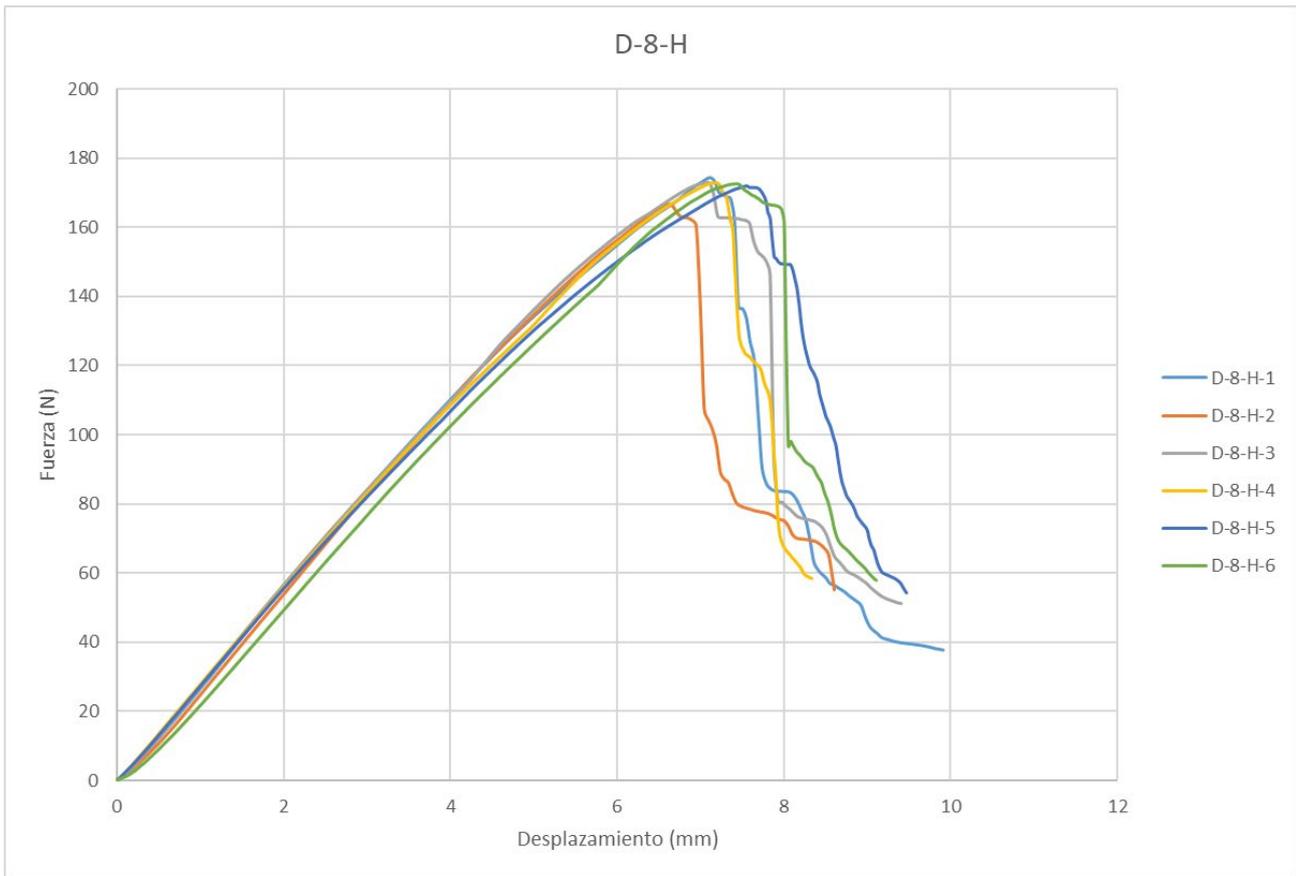
- Probetas densas con entalla H 2 mm:



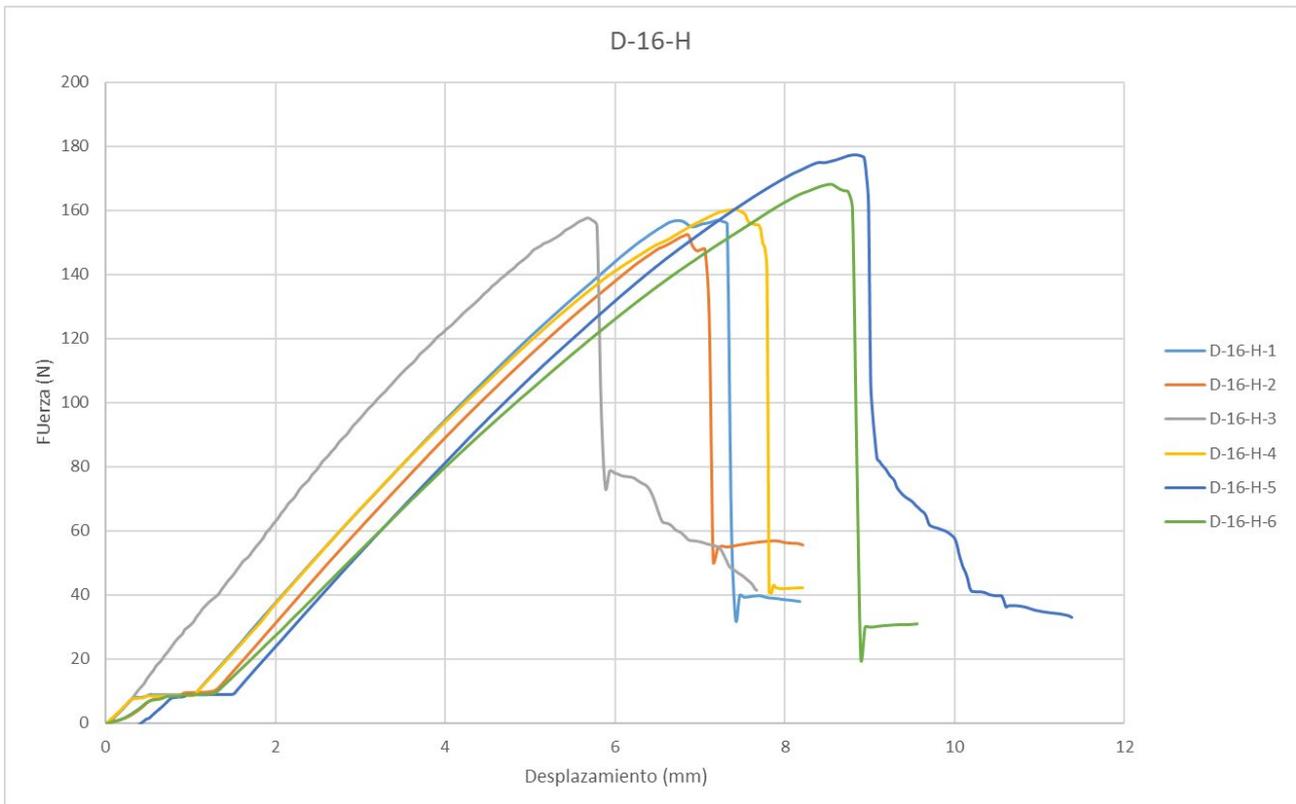
- Probetas densas con entalla H 4 mm:



- Probetas densas con entalla H 8 mm:



- Probetas densas con entalla H 16 mm:



Resultados individuales de la tenacidad aparente (K_{mat}^N) en las probetas con fondo semicircular (U):

Material	Código probeta		Radio entalla (mm)	U total (mJ)	J-integral (kJ/m ²)	K_{mat}^N (MPa · m ^{0,5})	Media	Desv. Estándar
EPS 10	L-2-U	1	1,00	185,8	0,0618	12,98	12,10	0,56
	L-2-U	2	1,00	159,2	0,0525	11,96		
	L-2-U	3	1,00	149,2	0,0491	11,57		
	L-2-U	4	1,00	149,3	0,0491	11,57		
	L-2-U	5	1,00	159,5	0,0528	12,00		
	L-2-U	6	1,00	173,0	0,0580	12,57		
	L-4-U	1	2,00	142,9	0,0469	11,30	13,10	1,41
	L-4-U	2	2,00	186,8	0,0614	12,93		
	L-4-U	3	2,00	186,2	0,0604	12,83		
	L-4-U	4	2,00	169,7	0,0556	12,31		
	L-4-U	5	2,00	233,3	0,0758	14,38		
	L-4-U	6	2,00	258,9	0,0848	15,20		
	L-8-U	1	4,00	155,0	0,0515	11,84	13,19	0,99
	L-8-U	2	4,00	236,4	0,0773	14,51		
	L-8-U	3	4,00	213,6	0,0704	13,85		
	L-8-U	4	4,00	211,3	0,0697	13,78		
	L-8-U	5	4,00	174,5	0,0576	12,53		
	L-8-U	6	4,00	184,0	0,0605	12,84		
L-16-U	1	8,00	198,6	0,0648	13,28	14,58	0,91	
L-16-U	2	8,00	224,7	0,0742	14,22			
L-16-U	3	8,00	247,7	0,0809	14,84			
L-16-U	4	8,00	243,6	0,0806	14,82			
L-16-U	5	8,00	284,5	0,0946	16,05			
L-16-U	6	8,00	233,0	0,0760	14,39			
EPS 40	D-2-U	1	1,00	523,2	0,1709	57,06	55,27	1,77
	D-2-U	2	1,00	465,2	0,1486	53,20		
	D-2-U	3	1,00	470,7	0,1509	53,61		
	D-2-U	4	1,00	528,6	0,1698	56,86		
	D-2-U	5	1,00	526,5	0,1686	56,68		
	D-2-U	6	1,00	484,9	0,1550	54,34		
	D-4-U	1	2,00	465,2	0,1473	52,97	54,83	2,48
	D-4-U	2	2,00	462,1	0,1456	52,66		
	D-4-U	3	2,00	522,8	0,1655	56,16		
	D-4-U	4	2,00	472,5	0,1494	53,35		
	D-4-U	5	2,00	503,0	0,1588	54,99		
	D-4-U	6	2,00	568,7	0,1837	59,15		
	D-8-U	1	4,00	555,9	0,1741	57,59	50,47	3,95
	D-8-U	2	4,00	440,2	0,1379	51,26		
	D-8-U	3	4,00	406,2	0,1271	49,20		
	D-8-U	4	4,00	438,2	0,1375	51,17		
	D-8-U	5	4,00	353,2	0,1110	45,98		
	D-8-U	6	4,00	385,2	0,1229	48,39		
D-16-U	1	8,00	599,6	0,1900	60,17	57,78	2,17	
D-16-U	2	8,00	579,0	0,1824	58,95			
D-16-U	3	8,00	556,3	0,1753	57,78			
D-16-U	4	8,00	527,4	0,1664	56,30			
D-16-U	5	8,00	585,5	0,1849	59,34			
D-16-U	6	8,00	484,8	0,1550	54,34			

Resultados individuales de la tenacidad aparente (K_{mat}^N) en las probetas con fondo de entalla recto (H):

Material	Código probeta		Radio entalla (mm)	U total (mJ)	J-integral (kJ/m ²)	K_{mat}^N (MPa · m ^{0,5})	Media	Desv. Estándar
EPS 10	L-2-H	1	1,00	147,1	0,0482	11,47	12,86	0,82
	L-2-H	2	1,00	189,1	0,0611	12,90		
	L-2-H	3	1,00	217,1	0,0705	13,86		
	L-2-H	4	1,00	202,5	0,0660	13,41		
	L-2-H	5	1,00	193,7	0,0628	13,08		
	L-2-H	6	1,00	178,9	0,0579	12,56		
	L-4-H	1	2,00	231,9	0,0753	14,32	12,81	0,98
	L-4-H	2	2,00	162,2	0,0520	11,90		
	L-4-H	3	2,00	211,7	0,0688	13,69		
	L-4-H	4	2,00	176,7	0,0574	12,50		
	L-4-H	5	2,00	159,6	0,0520	11,90		
	L-4-H	6	2,00	183,0	0,0596	12,75		
	L-8-H	1	4,00	187,3	0,0613	12,93	14,06	1,26
	L-8-H	2	4,00	216,1	0,0706	13,87		
	L-8-H	3	4,00	238,3	0,0780	14,58		
	L-8-H	4	4,00	175,4	0,0571	12,47		
	L-8-H	5	4,00	279,8	0,0916	15,80		
	L-8-H	6	4,00	247,8	0,0822	14,96		
L-16-H	1	8,00	248,8	0,0815	14,90	15,61	0,98	
L-16-H	2	8,00	352,8	0,1131	17,55			
L-16-H	3	8,00	275,3	0,0882	15,50			
L-16-H	4	8,00	263,0	0,0847	15,19			
L-16-H	5	8,00	259,1	0,0833	15,07			
L-16-H	6	8,00	276,4	0,0895	15,62			
EPS 40	D-2-H	1	1,00	533,0	0,1696	56,84	50,16	7,45
	D-2-H	2	1,00	326,2	0,1039	44,50		
	D-2-H	3	1,00	556,1	0,1782	58,26		
	D-2-H	4	1,00	533,0	0,1709	57,05		
	D-2-H	5	1,00	305,5	0,0967	42,92		
	D-2-H	6	1,00	321,9	0,1023	44,15		
	D-4-H	1	2,00	601,5	0,1913	60,36	59,89	4,79
	D-4-H	2	2,00	668,4	0,2122	63,58		
	D-4-H	3	2,00	469,2	0,1497	53,40		
	D-4-H	4	2,00	519,8	0,1658	56,20		
	D-4-H	5	2,00	592,9	0,1901	60,17		
	D-4-H	6	2,00	726,1	0,2330	66,62		
	D-8-H	1	4,00	673,3	0,2151	64,01	63,77	2,37
	D-8-H	2	4,00	581,4	0,1856	59,47		
	D-8-H	3	4,00	668,8	0,2136	63,79		
	D-8-H	4	4,00	677,7	0,2171	64,30		
	D-8-H	5	4,00	729,5	0,2336	66,71		
	D-8-H	6	4,00	682,2	0,2188	64,56		
D-16-H	1	8,00	590,6	0,1877	59,79	60,57	5,92	
D-16-H	2	8,00	499,7	0,1581	54,88			
D-16-H	3	8,00	487,7	0,1543	54,22			
D-16-H	4	8,00	613,3	0,1943	60,84			
D-16-H	5	8,00	785,9	0,2501	69,03			
D-16-H	6	8,00	718,3	0,2294	66,10			

Referencias

- [1] Justo, J., Konietzky, H., & Castro, J. (2020). Discrete numerical analyses of grain size influence on the fracture of notched rock beams. *Computers and Geotechnics*, 125, p. 103680.
- [2] Diosnado, J. A., Plascencia, H., Torres, M., & Mondragon, M. L. (2013). Microstructure Characterization of Low Density EPS. *Applied Mechanics and Materials*, 420, p. 167-176.
- [3] Marşavina, L. & Linul E. (2020). Fracture toughness of rigid polymeric foams: A review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 43(11), p.2483-2514.
- [4] Bai, T., Dong, B., Xiao, M., Liu, H., Wang, N., Wang, Y., Wang C., Liu, C., Cao, W., Zhang, J., Ma, Y. & Guo, Z. (2018). Polystyrene foam with high cell density and small cell size by compression-injection molding and Core Back foaming technique: evolution of cells in cavity. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(9), p. 1800110.
- [5] Materiales de uso técnico: <https://villalbaestano.wordpress.com/el-poliestireno/> [web]
- [6] Tang, N., Lei, D., Huang, D., & Xiao, R. (2019). Mechanical performance of polystyrene foam (EPS): Experimental and numerical analysis. *Polymer Testing*, 73, p. 359-365.
- [7] Raps, D., Hossieny, N., Park, C. B., & Altstädt, V. (2015). Past and present developments in polymer bead foams and bead foaming technology. *Polymer*, 56, p. 5-19.
- [8] British Plastics Federation (BPF): <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/expanded-and-extruded-polystyrene-eps-xps.aspx> [web]
- [9] Epsole: <https://epssole.com/expanded-polystyrene-density/> [web]
- [10] Sun, B., & Kulinsky, L. (2017). Fabrication of regular polystyrene foam structures with selective laser sintering. *Materials Today Communications*, 13, p. 346-353.
- [11] Janssen, M., Zuidema, J., & Wanhill, R. (2004). *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC Press.
- [12] A. International, *ASTM D5045-14, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- [13] Irwin, G. R. (1997). Plastic zone near a crack and fracture toughness.
- [14] O'Dowd, N. (2003). *Advanced Fracture Mechanics. Lectures on Fundamentals of Elastic, Elastic-Plastic and Creep Fracture*. Imperial College London.
- [15] Rice, J. R., (1968). *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Brown University.
- [16] El Bhilat, H., Hachim, A., Salmi, H., & El Had, K. (2020). Experimental and numerical investigation of the influence of temperature on the fracture behavior of high impact polystyrene evaluated by the J-integral approach using multiple specimen method. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 30(3), p. 91-100.

- [17] Maspoch Rulduà, M. L. (1992). *Estudio de la fractura de materiales compuestos por una matriz de plástico* (Doctoral dissertation). Universitat Politècnica de Catalunya.
- [18] Taylor, D. (2008). The theory of critical distances. *Engineering Fracture Mechanics*, 75(7), p. 1696-1705.
- [19] Justo, J., Castro, J., & Cicero, S. (2021). Application of the theory of critical distances for the fracture assessment of a notched limestone subjected to different temperatures and mixed mode with predominant mode I loading conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54(5), p. 2335-2354.
- [20] Cicero, S., Madrazo, V., & Carrascal, I. A. (2012). Analysis of notch effect in PMMA using the Theory of Critical Distances. *Engineering Fracture Mechanics*, 86, p. 56-72.
- [21] Justo, J., Castro, J., Cicero, S., Sánchez-Carro, M. A., & Husillos, R. (2017). Notch effect on the fracture of several rocks: Application of the Theory of Critical Distances. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 90, p. 251-258.
- [22] Horvath, J. S. (1995). *Geofoam Geosynthetic*, published by Horvath Engineering. PC, Scarsdale, New York, USA.
- [23] Hazarika, H. (2006). Stress-strain modeling of EPS geofoam for large-strain applications. *Geotextiles and geomembranes*, 24(2), p. 79-90.
- [24] Witthoef, A. F., & Kim, H. (2016). Numerical investigation of earth pressure reduction on buried pipes using EPS geofoam compressible inclusions. *Geosynthetics International*, 23(4), p. 287-300.
- [25] Athanasopoulos, G. A., Pelekis, P. C., & Xenaki, V. C. (1999). Dynamic properties of EPS geofoam: an experimental investigation. *Geosynthetics International*, 6(3), p. 171-194.
- [26] UNE-EN 12089:2013, *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a flexión*. AENOR, 2013.
- [27] UNE-EN 92110:1997, *Materiales aislantes térmicos utilizados en la edificación. Productos de poliestireno expandido (EPS). Especificaciones*. AENOR, 1997.
- [28] UNE-EN 826:2013, *Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a compresión*. AENOR, 2013.
- [29] A. International, *ASTM D6068-10 (Reapproved 2018), Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.
- [30] Livieri, P. (2008). Use of J-integral to predict static failures in sharp V-notches and rounded U-notches. *Engineering fracture mechanics*, 75(7), p.1779-1793.
- [31] Negussey, D., & Anasthas, N. (2001). Young's modulus of EPS geofoam by simple bending test. In *3rd international conference on geofoam blocks in construction applications, Salt Lake City, USA*. p. 10-12.
- [32] Eriksson, L., & Trank, R. (1991). *Properties of expanded polystyrene, laboratory experiments*. Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden.
- [33] Gnip, I. Y., Vejelis, S., Kersulis, V., & Vaitkus, S. (2007). Deformability and tensile strength of expanded polystyrene under short-term loading. *Polymer Testing*, 26(7), p. 886-895.

Autor: Iñigo Cabrera Goñi

Directores: Marina Miranda Manzanares, Jorge Castro González

OBJETIVOS

- Estudiar el comportamiento a fractura y la influencia del efecto entalla en espumas poliméricas, centrándonos en la caracterización de las espumas de poliestireno expandido (EPS), en base a ensayos de flexión sobre probetas con diferentes radios de entalla.
- Analizar los resultados utilizando la Teoría de las Distancias Críticas (TCD), la cual es adecuada para evaluar el campo de tensiones alrededor de la entalla, ya que emplea una propiedad intrínseca de los materiales, denominada distancia crítica (L).
- Relacionar la distancia crítica con el tamaño del grano, al ser este relativamente uniforme y producirse una rotura intergranular (como ocurre con las rocas), además de buscar analogías en su comportamiento.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

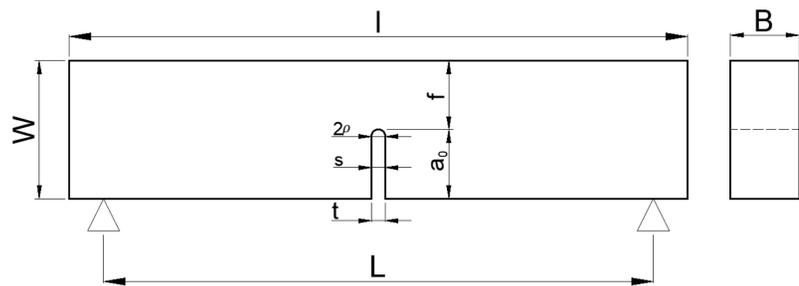
Norma ASTM D6068-10 (18). Mecánica de la Fractura Elastoplástica (MFEP).

Espumas de 2 densidades: 10 kg/m³ (EPS10) y 40 kg/m³ (EPS40).

4 diámetros de entalla (2ρ): 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm.

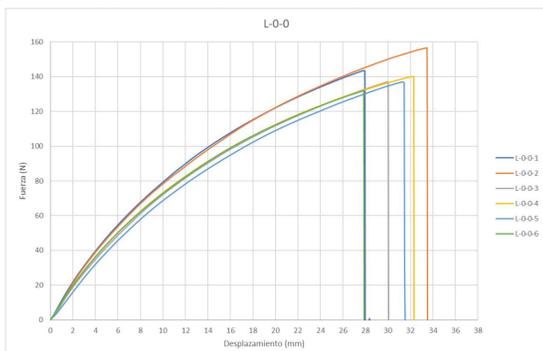
48 probetas ensayadas con entalla de fondo semicircular (U).

48 probetas ensayadas con entalla de fondo recto (H).



ENSAYOS DE TRACCIÓN

Ensayando probetas sin entalla a flexión en tres puntos se obtuvieron los parámetros característicos de las 2 densidades.



Módulo de elasticidad (E)

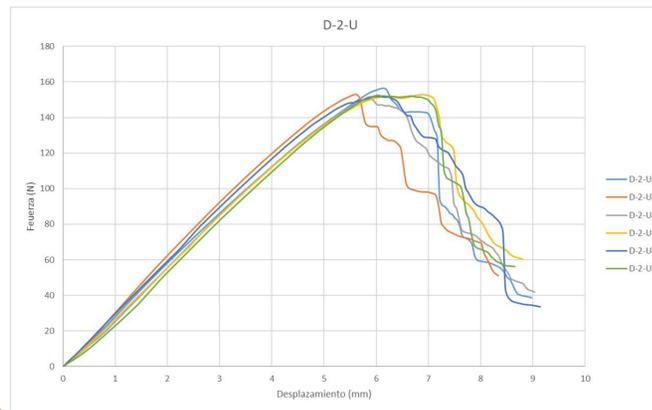
- EPS10: 2,72 MPa
- EPS40: 18,04 MPa

Resistencia de tracción (σ_t)

- EPS10: 68 kPa
- EPS40: 395 kPa

CÁLCULO DE LA TENACIDAD APARENTE DEL MATERIAL

En los ensayos de flexión de 3 puntos en las probetas con entalla, el área bajo las curvas fuerza-desplazamiento representa la energía disipada (U).



Integral de contorno J

$$J = \frac{\eta \cdot U}{B(W - a_0)}$$

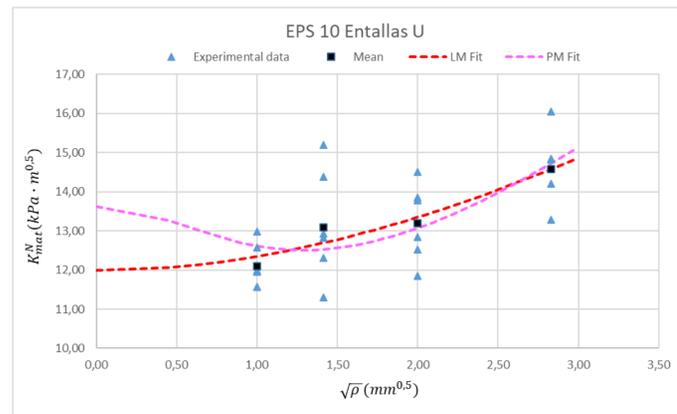
Tenacidad aparente (K_{mat}^N)

$$K_{mat}^N = \sqrt{\frac{J \cdot E}{1 - \nu^2}}$$

TEORÍA DE LAS DISTANCIAS CRÍTICAS

Efecto entalla: al aumentar el radio de entalla se incrementa la tenacidad del material.

Los valores de tenacidad en el EPS10 presentan un mejor ajuste al Método de la Línea (LM).



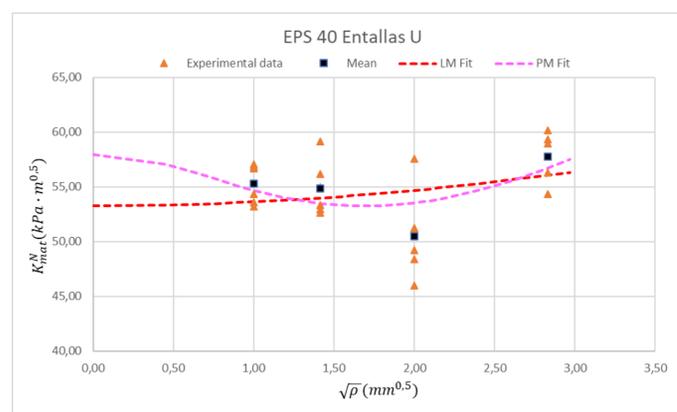
Distancia crítica (L)

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{\sigma_0} \right)^2$$

Método de la Línea (LM)

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{\frac{\rho}{4L} + 1}$$

Los valores del EPS40 se aproximan más al Método de la Punto (PM).



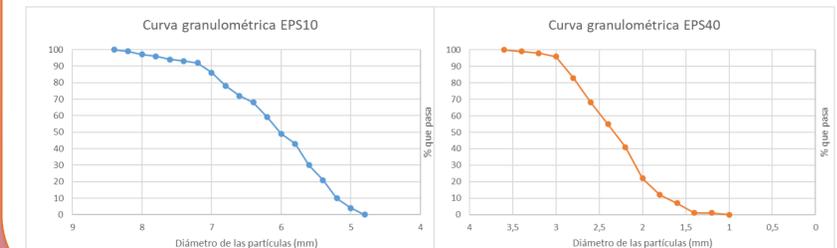
Método del Punto (PM)

$$K_{mat}^N = K_{mat} \frac{(1 + \frac{\rho}{L})^{3/2}}{(1 + \frac{2\rho}{L})}$$

GRANULOMETRÍA

Diámetro medio en perlas de EPS10: 6,13 mm

Diámetro medio en perlas de EPS40: 2,34 mm



MECANISMOS DE FRACTURA

EPS10:



EPS40:



CONCLUSIONES

- El EPS10 mostró un claro efecto entalla y la validación de la Teoría de las Distancias Críticas mediante el ajuste al Método de la Línea.
- El mecanismo de fractura en el EPS40 puede que se propague por grupos de perlas fusionadas, provocando que no se haya observado el efecto entalla y que no se ajuste adecuadamente a la Teoría de las Distancias Críticas.
- La microestructura de fractura es intergranular e independiente del radio de entalla.