

**CARACTERIZACION DEL PROCESO DE FRACTURA DE POLIMEROS
DUCTILES: TRABAJO ESENCIAL DE FRACTURA****F.J.Belzunce*, J. Bonhomme** y Rodriguez C.******* E.T.S.I. Industriales de Gijón (Universidad de Oviedo), 33203 Gijón****** Instituto Tecnológico de Materiales de Asturias, Parque Tecnológico, 33428
LLanera**

Resumen. Se presenta el trabajo esencial de fractura como una propiedad intrínseca capaz de describir el proceso de fractura de los polímeros dúctiles, que estirricionan antes de romper, y se describe un método experimental contrastado que permite su determinación, basado en la realización de ensayos de tracción sobre probetas con doble entalla lateral (DENT). Finalmente se realiza la aplicación del método con dos polipropilenos reforzados con diferentes proporciones de elastómero y con un polietileno de baja densidad.

Abstract. The essential work of fracture is an intrinsic material property which characterizes the fracture process of very ductile polymers, polymers which neck before its failure. An experimental method used to determine the essential work of fracture, based on tensile tests of double edge notched specimens (DENT), is described. Finally, the method is applied in the case of two polypropylenes filled with different percentages of rubber and a low density polyethylene.

1. INTRODUCCION

La Mecánica de la Fractura aplicada a los materiales frágiles es una técnica de análisis bien establecida y aceptada, que posibilita la caracterización de estos procesos de fractura mediante el uso de un único parámetro, el factor de intensidad de tensiones crítico (Kc) o la energía crítica de fractura (Gc). Sin embargo, en el caso de los materiales mas tenaces, las grandes zonas plásticas que se desarrollan en los alrededores de las entallas, grietas o de cualquier otro tipo defecto complican bastante estos análisis. Por ejemplo, en el curso de la fractura de un polímero dúctil, la mayor parte de la energía plástica disipada en los alrededores de una grieta no está directamente asociada al propio proceso de fractura del polímero, y además, aquella depende de la geometría de la probeta y de la configuración de la aplicación de la carga en el curso del ensayo. De este modo, el trabajo total medido en la fractura de una probeta agrietada no es una constante característica del material. Solo el trabajo de fractura por unidad de área

disipado en la zona donde tienen lugar los procesos (micromecanismos) de fractura sería una constante característica del material, que denominaremos, en los sucesivos, trabajo esencial de fractura (w_e).

Cotterell [1,2], en trabajos previos realizados con chapas finas metálicas, constató que en estos productos el trabajo esencial de fractura era una constante para cada espesor de chapa, independiente de la geometría de la probeta. Mas adelante, otros investigadores han extendido el rango de aplicación del trabajo esencial de fractura a los polímeros dúctiles, que estirricionan antes de romper [3,4,5].

En este trabajo se presenta el método mas aceptado en la actualidad, que está en vías de normalización por ESIS [6], para calcular el trabajo esencial de fractura de un polímero y los resultados obtenidos en su determinación experimental con diferentes polímeros dúctiles.

2. TRABAJO ESENCIAL DE FRACTURA

El método habitualmente empleado para la determinación experimental del trabajo esencial de fractura se fundamenta en un estudio de Broberg [7], en el que sugería que la región de comportamiento no lineal situada delante del frente de grieta podía dividirse en dos partes, una en la que tenía lugar el proceso de fractura, y una segunda, mas externa que rodearía a la primera, en donde se constataría una gran ductilidad en el material. En esta situación, se denomina trabajo esencial de fractura al trabajo específico desarrollado en la primera de las dos zonas, siendo de este modo el único que contribuye al proceso de fractura del polímero. Por otro lado, se denomina trabajo no esencial de fractura al que produce la deformación plástica en la región que rodea a la zona de proceso.

El trabajo esencial de fractura, w_e , puede determinarse utilizando probetas de tracción con doble entalla lateral (tipo DENT). En estos ensayos el trabajo total de fractura, W_f , se puede descomponer en sus componentes esencial y no esencial. La parte correspondiente al trabajo esencial de fractura, si se supone que éste es una constante característica del material, es proporcional a la longitud del ligamento, l , mientras que la parte no esencial variará con el cuadrado del ligamento:

$$W_f = w_e l t + w_p \beta l^2 t \quad (1)$$

t es el espesor de la probeta, w_p el trabajo plástico disipado por unidad de volumen y β un factor de forma que describe el tamaño de la zona plástica. Reorganizando la expresión (1) resulta:

$$w_f = W_f/l t = w_e + (\beta w_p) l \quad (2)$$

Si representamos w_f en función de l se obtiene una línea recta, de tal manera que w_e es la ordenada en el origen y βw_p la pendiente de la recta.

Normalmente se suele determinar el trabajo esencial de fractura en tensión plana, para lo que se exige que la longitud del ligamento sea mayor que tres veces el espesor de la muestra: en estos casos el trabajo esencial de fractura depende del espesor de la lámina de polímero. De cualquier manera, Saleemi [5] también ha mostrado la posibilidad de obtener este mismo valor en condiciones de deformación plana.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales empleados en este trabajo han sido láminas de polipropileno mezclado con un 10 y un 31% en peso respectivamente de elastómero, de 1.52 mm de espesor y polietileno de baja densidad de 0,3 mm de espesor.

Las propiedades mecánicas de los tres polímeros, obtenidas en ensayos de tracción según norma ASTM D638, se presentan en la tabla 1 (límite elástico, resistencia a la tracción y alargamiento)

	σ_{ys} (MPa)	σ_R (MPa)	A (%)
PP-10%	31,2	33,7	637
PP-31%	18,8	20,9	653
PEBD	13,2	38,7	1860

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los polímeros

Para la determinación del trabajo esencial de fractura, se han utilizado probetas rectangulares con una doble entalla lateral. La longitud del ligamento entre los extremos de las entallas debe ser menor que tres veces el ancho ($l < 3 W$) para evitar perturbaciones en la zona plástica que pudieran estar motivadas por efecto de los bordes de la probeta; por otro lado, la longitud l será mayor que tres veces el espesor de la lámina ($l > 3 t$) para asegurar el estado de tensión plana.

$$W/3 > l > 3 t$$

La longitud de la probeta no es una dimensión relevante y basta con dejar una longitud libre entre mordazas igual al ancho W de la probeta. El protocolo de norma de ESIS[6] recomienda utilizar un mínimo de veinte probetas con cada material, con el tamaño del ligamento distribuido de acuerdo a la tabla 2, con el fin de obtener una mayor densidad de resultados con los ligamentos menores e incrementar de este modo el grado de confianza en la medida extrapolada de w_e .

Longitud del ligamento		Nº Probetas
Máxima	Mínima	
0,33 W	0,27 W	2
0,27 W	0,20 W	3
0,20 W	0,13 W	5
0,13 W	3 t	10

Tabla 2. Características de las probetas DENT

Se han utilizado probetas de 150x75 mm, y la doble entalla se ha practicado con una cuchilla y posteriormente sus extremos fueron afilados con otra de filo mas fino. La longitud final del ligamento resistente se midió con la ayuda de un proyector de perfiles.

Los correspondientes ensayos de tracción se efectuaron a una velocidad de 20 mm/min hasta la rotura total de la probeta.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Con el fin de evaluar el valor del trabajo esencial de fractura, w_e , se ha realizado una regresión lineal con los puntos W_f-l , tal y como se pone de manifiesto en las figuras 1, 2 y 3. Con el fin de evaluar el parámetro de forma β , y a partir de él, el trabajo plástico disipado por unidad de volumen, w_p , se han construido igualmente los gráficos de h (altura de la zona estirada), véase

la figura 4, en función de la longitud del ligamento, l. La figura 5 muestra uno de estos gráficos.

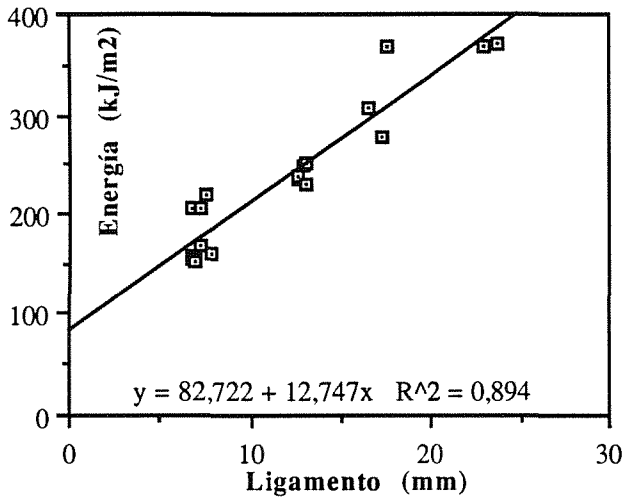


Figura 1. Determinación del trabajo esencial de fractura (PP-10%)

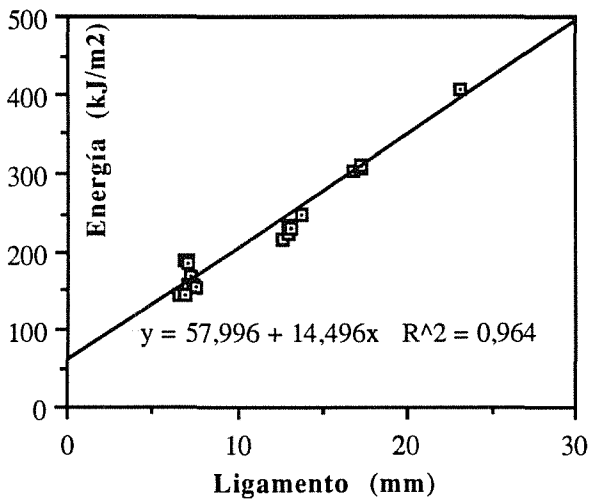


Figura 2. Determinación del trabajo esencial de fractura (PP-31%)

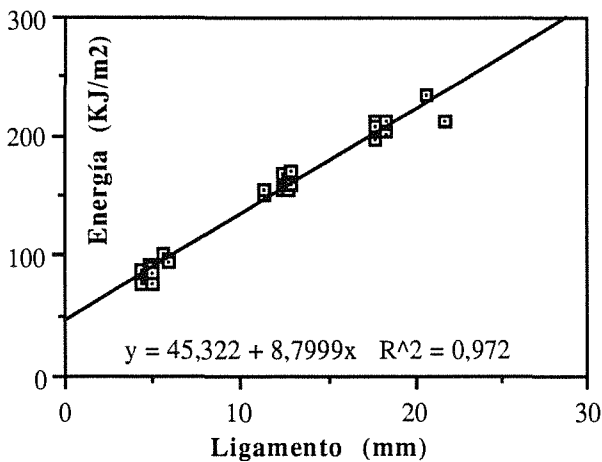


Figura 3. Determinación del trabajo esencial de fractura (polietileno de baja densidad)

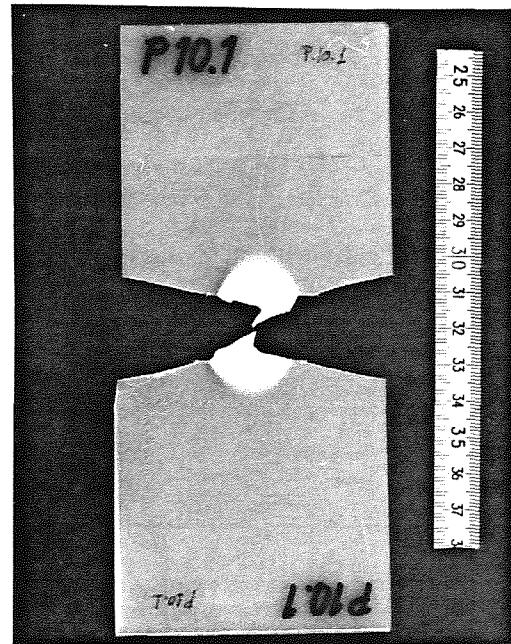


Figura 4. Zona estriccionada y zona difusa en la región de la entalla (PP-10%)

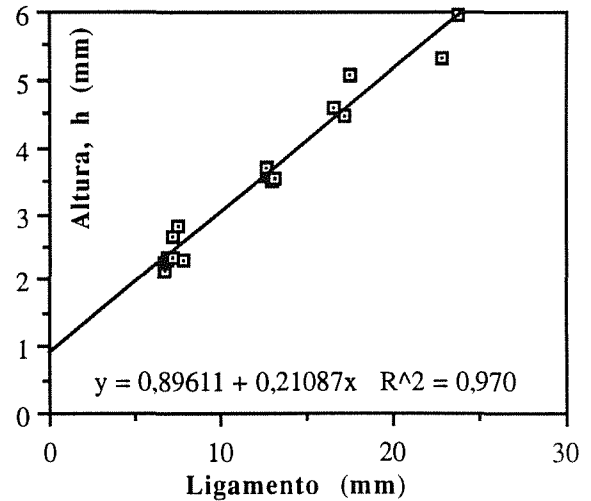


Figura 5. Determinación del parámetro β (PP-10%)

Todos los gráficos obtenidos muestran unos coeficientes de regresión altos. A continuación, la tabla 2 da cuenta de los resultados obtenidos en estos ensayos con los diferentes materiales empleados.

	w_e (KJ/m ²)	w_p (KJ/m ³)	β
PP-10%	83	121	0,105
PP-31%	58	83	0,175
PEBD	45	109	0,08

Tabla 3. Resultados de los ensayos de fractura

4.1. Comprobación

El protocolo del ESIS recomienda realizar una comprobación final con el fin de establecer la validez de los resultados obtenidos. Se basa en utilizar la carga máxima registrada en cada ensayo para determinar la tensión neta máxima soportada por la probeta y compararla con el límite elástico del material. Según la teoría de la plasticidad de Hill [8], la tensión máxima en la región del ligamento de esta geometría concreta, en condiciones de tensión plana, debe ser igual a $1,15 \sigma_{ys}$. En la figura 6 se presenta una de estas representaciones gráficas: la línea horizontal corresponde al criterio de Hill y se observa una buena correspondencia con los resultados de nuestros ensayos..

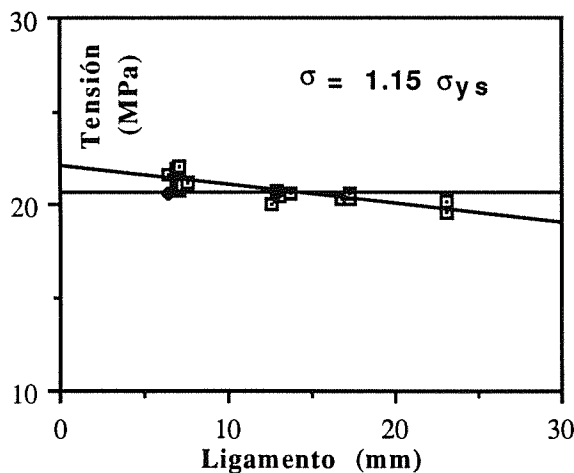


Figura 6. Tensión neta máxima (PP-31%)

Finalmente, Mai ha demostrado teórica y experimentalmente [3,4] que el trabajo esencial de fractura es, conceptualmente, un concepto similar al de la integral J crítica evaluada a lo largo de un camino que bordea la zona donde tiene lugar el proceso de fractura. Este autor ha comprobado la igualdad entre los citados parámetros en el caso del nylon 66 y diversos polietilenos de alta densidad. También, Hashemi [9], basado en el mismo fundamento, ha encontrado una buena correspondencia entre el trabajo esencial de fractura y el CTOD crítico en una polietileno (PEEK).

Según [9], el CTOD de estos polímeros se puede evaluar en el mismo ensayo de determinación del trabajo esencial de fractura realizando la representación gráfica del alargamiento a rotura ($l-l_0$) frente al ligamento resistente y extrapolando el valor de aquél para un ligamento igual a cero. La figura 7 muestra el cálculo del CTOD del PP-31% de acuerdo con el método expuesto. Se han obtenido valores del CTOD iguales a 3.8 y 4.2 en el caso de los dos polipropilenos (10 y 31 % respectivamente).

El valor del parámetro λ que resulta de la relación entre J ($=w_e$) y el CTOD es igual a 0.7

$$w_e = J = \lambda \sigma_{ys} \text{ CTOD}$$

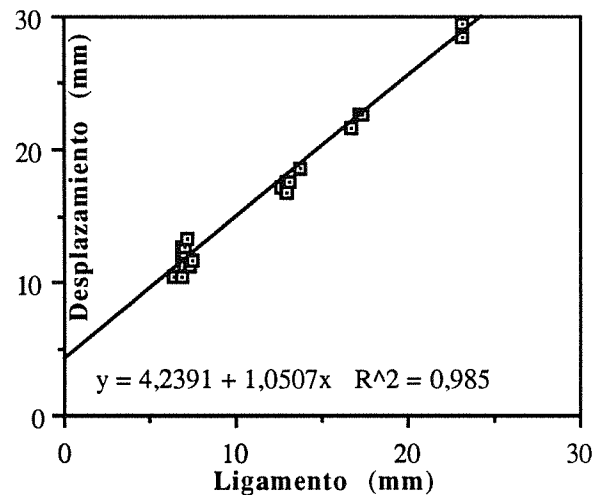


Figura 7. Determinación del CTOD (PP-31%)

5. CONCLUSIONES

El trabajo esencial de fractura es una propiedad del material, independiente de la geometría y de la forma de aplicación de la carga, que caracteriza la fractura de un polímero termoplástico dúctil, que en condiciones de tensión plana solo depende del espesor, en vías de normalización por ESIS, para la determinación experimental de la citada propiedad y se ha comprobado su utilidad en la caracterización de tres polímeros diferentes que estriccionan fuertemente antes de romper. Finalmente el concepto del trabajo esencial de fractura se considera equivalente al de la integral J crítica.

6. REFERENCIAS

- [1] Cotterell B. y Reddell J.K., "The essential work of plane stress ductile fracture", *Int. J. Fract.*, 13 (1977) 267.
- [2] Mai Y.W. y Cotterell B., *Eng. Fract. Mech.*, 21 (1985) 123.
- [3] Mai Y.W. y Cotterell B., "On the essential work of ductile fracture of polymers", *Int. J. Fract.*, 32 (1986) 105.
- [4] Mai Y.W. y Powell P., "Essential work of fracture and J-Integral measurements for ductile polymers", *J. Poly. Sci.: PartB: Poly. Phys.*, 29 (1991) 785.
- [5] Salemi A.S. y Nairn J.A., "The plane-strain essential work of fracture as a measure of the toughness of ductile polymers", *Poly. Eng. Sci.*, 30, 4 (1990) 211
- [6] ESIS, "Testing protocol for essential work of fracture", "European Structural Integrity Society (Julio, 1993).
- [7] Broberg K.B., *J. Mech. Phys. Solids*, 23 (1975) 215.
- [8] Hill R., *J. Phys. Solids*, 1 (1952) 19.
- [9] Hashemi S. y O'Brien D., "The essential work of plane-stress ductile fracture of PEEK thermoplastic", *J. Mat. Sci.*, 28 (1993) 3977.