

## ENERGÍA ESENCIAL DE FRACTURA DE LAS TRANSPARENCIAS

J. Aldazabal\*, J. Brunel\*, R. Conte\*, J. Jaimerena\*, A. López Barberena\*,  
A. Macazaga\*, A. Martín Meizoso\*, M. Merchán\*

\* Escuela Superior de Ingenieros, TECNUN, Universidad de Navarra  
Paseo de Manuel Lardizábal, 13, 20018 San Sebastián, Guipúzcoa, España

**Resumen.** Se determina la energía esencial de fractura de las hojas de transparencias de acetato de celulosa. Este trabajo se plantea como un trabajo práctico dentro del Laboratorio de Materiales sobre Propiedades Mecánicas. Para medir la energía esencial de fractura se ensayan a tracción hojas de transparencias con una grieta central de distintos tamaños y a diferentes velocidades de ejecución del ensayo de tracción. Se concluye que la medida de la energía esencial de fractura es una buena técnica experimental para la determinación de la tenacidad en este tipo de películas delgadas. La energía esencial de fractura aumenta al hacerlo la velocidad a la que se estiran los acetatos.

**Abstract.** The essential work of fracture has been measured on transparency foils (cellulose acetate). This work has been proposed as a practical work on a Laboratory on the Mechanical Properties of Materials. Center cracked panels have been tested in tension to measure the essential work on fracture, with different crack sizes and at different crosshead displacement rates. It is concluded that the measurement of the essential work of fracture is a convenient experimental technique for the determination of the toughness of such polymer thin films as the acetates. It is shown that the essential work of fracture increases versus the displacement rate imposed to the acetates.

### 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de un Laboratorio de Materiales dedicado a la docencia sobre las Propiedades Mecánicas de los Materiales, se propone a los alumnos realizar la medida de la tenacidad, en particular de la energía esencial de fractura, de las hojas de las transparencias que se usan en las presentaciones desde los retroproyectors.

### 2. MATERIALES

Se ensayan las hojas de una caja, de 100 transparencias, comercializada por Staedtler®, Lumocolor photocop film. Estas transparencias son de acetato de celulosa y tienen un grosor nominal de 100  $\mu\text{m}$  y llevan un tratamiento antiestático en ambas caras (Art. Nr. 636 10 DT1, EAN 40 07817 610169, [info@staedtler.de](mailto:info@staedtler.de)). Un resumen de las propiedades del acetato de celulosa, un polímero termoplástico, se puede encontrar en la referencia [1].

### 3. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las hojas de transparencias (DIN A4: 210  $\times$  297 mm) se ensayan a tracción en una máquina electromecánica Instron modelo 4467, de 30 kN de capacidad, sobre la que se disponen los utillajes (fabricados a la medida) que se muestran en las Figuras 1 y 2.



**Fig. 1.** Dispositivo experimental empleado para la realización de los ensayos de tracción de las transparencias.



**Fig. 2.** Detalle de los útiles empleados para fijar las láminas de transparencias por sus extremos superior e inferior. Se observa cómo se montan sobre una garras de cuña que se emplean normalmente para la realización de ensayos de tracción.

Típicamente se introducen en las garras dos centímetros de cada extremo de los acetatos (superior e inferior), con lo que altura libre entre las garras, al comienzo del ensayo es de 257 mm.

La fricción en los amarres es suficiente como para realizar los ensayos sin que se produzcan resbales en los amarres, salvo que se ensayen los acetatos sin grietas o con grietas muy pequeñas (lo que no tiene interés en nuestro caso).

#### 4. RESULTADOS

Inicialmente se ensayaron hojas de transparencias con dos cortes laterales, hechos mediante un “cutter”, con un ligamento centrado en la anchura de las transparencias. Las primeras experiencias mostraron que al crecer ambas grietas se repelen, tendiendo a dejar una lenteja de material entre ambas grietas que se propagan. La dificultad estriba en ahora decidir sobre qué longitud se debe definir la energía absorbida en el proceso de propagación de la grieta.

Como recordatorio sobre la técnica de la medida de la energía esencial de fractura, se postula que la energía disipada, durante el proceso de fractura, se distribuye en dos términos: uno correspondiente a la zona que se plastifica, en el ligamento entre las dos grietas, y una segunda correspondiente al trabajo realizado sobre las superficies de la grieta y que sería el trabajo esencial

(no plástico), realizado sobre el plano de las dos entallas. El primero se escala con el cuadrado del tamaño del ligamento, mientras que el segundo se escala con la longitud que avanza la grieta: la anchura del ligamento entre las entallas, según la ecuación:

$$U = w_e B(W - 2a) + \beta w_p (W - 2a)^2 \quad (1)$$

En donde  $U$  representa la energía total absorbida,  $w_e$  la componente esencial del trabajo de fractura,  $w_p$  la componente plástica,  $W = 210$  mm la anchura total de la probeta,  $B$  el grosor del acetato (en nuestro caso),  $a$  el tamaño de cada una de las dos grietas laterales y  $\beta$  es un factor de forma que tiene en cuenta la geometría de la zona plástica en la probeta.

Si normalizamos la energía total, en la Ec. (1) de la manera siguiente:

$$\frac{U}{B(W - 2a)} = w_e + \beta w_p (W - 2a) \quad (2)$$

obtenemos la ecuación de una recta, frente a la anchura del ligamento, con ordenada en el origen:  $w_e$ , la energía esencial de fractura, que tratamos de determinar, y pendiente  $\beta w_p$ . En las referencias [2-5] se puede encontrar detalles del protocolo de ensayo, sus hipótesis, sus limitaciones, etc.

A la vista de los resultados iniciales con dos trayectorias inicialmente divergentes de las trayectorias de las dos grietas, se decidió modificar la geometría de la probeta de ensayo y ensayar acetatos con una única y gran grieta centrada en el ancho de la hoja con dos ligamentos uno a cada lado de la hoja. De esta manera se consiguen dos trayectorias rectas de las grietas. Por el contrario los dos ligamentos rara vez rompen simultáneamente, si no que normalmente se rompe primero uno de los dos extremos y a continuación, con una carga de aproximadamente la mitad de la anterior, el segundo ligamento.

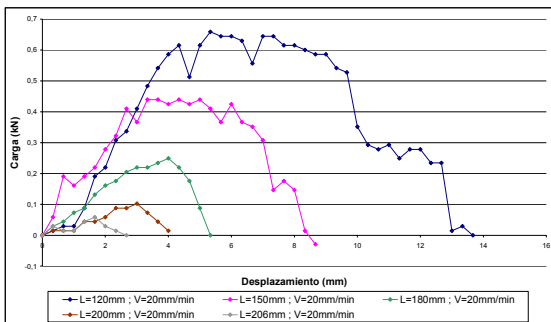
Las propiedades de los polímeros son función de la velocidad a la que se aplican las cargas o las sollicitaciones (véase, por ejemplo, [4]). Además de ensayar probetas con diferentes anchuras de los ligamentos laterales se ensayarán, cada conjunto con diferentes anchuras de ligamentos, a diferentes velocidades de desplazamiento de la cruceta de la máquina de ensayo, lo que corresponde a diferentes velocidades para la extensión de la hoja de acetatos, sujeta por ambos extremos.

Es evidente, durante la realización de los ensayos el alargamiento de la hoja de acetato, y su estrechamiento por su zona central, hasta el momento de la fractura.

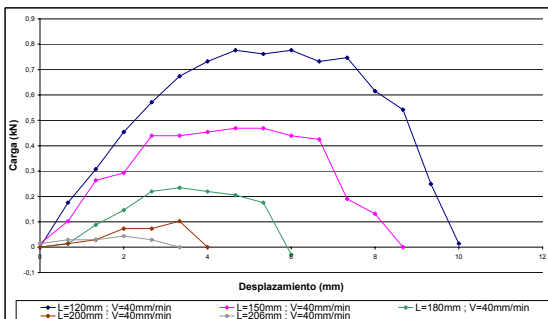
La Fig. 3 muestra los registros de carga frente al desplazamiento de la cruceta para los acetatos

ensayos a una velocidad de 20 mm/minuto y diferentes anchuras de los ligamentos, o -lo que es lo mismo- diferentes tamaños de la grieta inicial, comprendidos entre  $120 \text{ mm} \leq 2a \leq 206 \text{ mm}$ . Se observa cómo típicamente la energía absorbida se reduce al reducirse la anchura de los ligamentos.

La Fig. 4 muestra los resultados obtenidos con el doble de velocidad de desplazamiento de la cruceta (40 mm/minuto). Las grietas iniciales tienen, igualmente, longitudes,  $L = 2a$ , comprendidas entre 120 y 206 mm. Como es obvio, las cargas máximas alcanzadas durante la ejecución de los ensayos se reducen al hacerlo las anchuras de los ligamentos.



**Fig. 3.** Evolución de la carga frente a la extensión del acetato para varias anchuras del ligamento. La velocidad de extensión es de 20 mm/minuto.



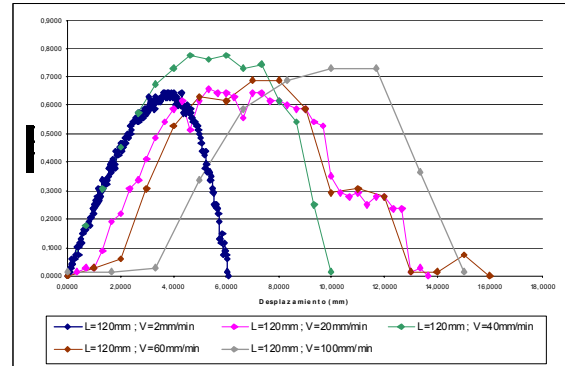
**Fig. 4.** Carga frente a desplazamiento de la cruceta, para varias anchuras del ligamento, para una velocidad de desplazamiento de 40 mm/minuto.

La Figura 5 nos muestra los ensayos realizados para una geometría concreta, y anchura de los ligamentos laterales, a varias velocidades de desplazamiento de la cruceta, comprendidas entre 2 y 100 mm/minuto.

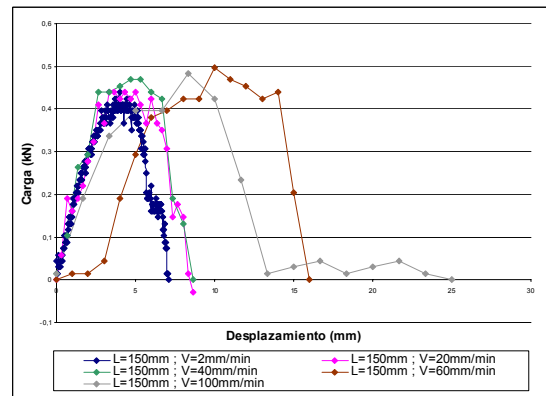
En la Fig. 5 es evidente el aumento de la energía total absorbida al hacerlo la velocidad de sollicitación. Sin embargo no se aprecian grandes diferencias en lo que respecta a la carga máxima alcanzada durante el ensayo.

En las Figuras 6 y 7 se observa lo que ocurre con la carga al variar la anchura del ligamento ( y la velocidad de sollicitación). Al ser la grieta más larga, es más

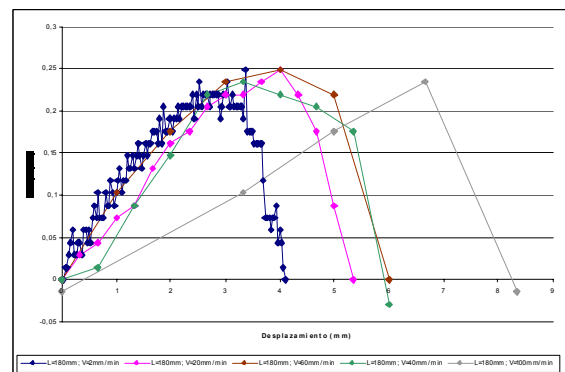
estrecho el ligamento, son menores las cargas máximas alcanzadas, son más reducidos los tiempos a rotura y el número de datos experimentales que se muestrean también se reduce (pues se muestrea a velocidad constante de adquisición de los datos: uno por segundo).



**Fig. 5.** Carga frente a desplazamiento, para una misma geometría,  $2a = 120 \text{ mm}$ , y diferentes velocidades de sollicitación.



**Fig. 6.** Idem. para una grieta centrada de 150 mm de longitud y velocidades entre 2 y 100 mm/minuto.



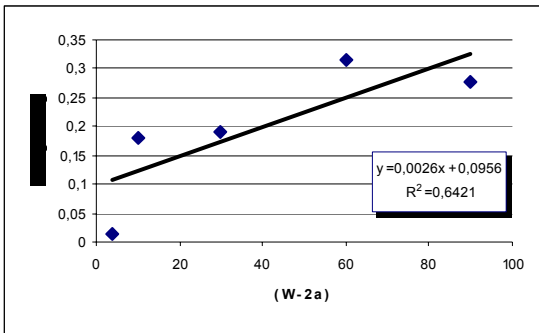
**Fig. 7.** Idem para  $2a = 180 \text{ mm}$ .

En las Figs. 5 a 7 se observa a menudo un pequeño “palier” durante la descarga. Esto ocurre cuando ya se ha roto uno de los dos ligamentos y toda la carga se transmite a través del único ligamento restante (aproximadamente a la mitad de la carga máxima). Se

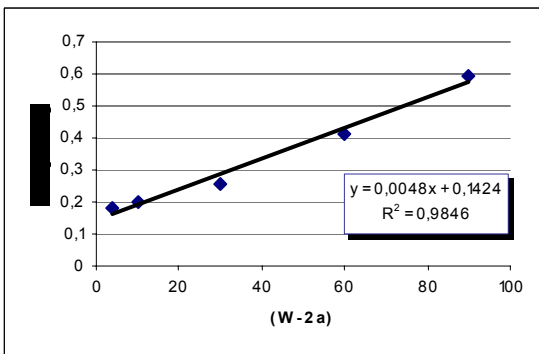
recuerda que el sistema de ensayo es aproximadamente de desplazamiento, y no carga, impuesta.

Las áreas bajo las curvas de carga frente al desplazamiento de los puntos de aplicación de las cargas (las garras) nos proporcionan el trabajo total absorbido,  $U$ . El método que se emplea para evaluar el área es la integración numérica mediante el método de Simpson (esencialmente se ajusta una parábola a cada segmento de 3 datos experimentales y se calcula, ese segmento de área, como el área bajo la parábola sustentada, véase [6]).

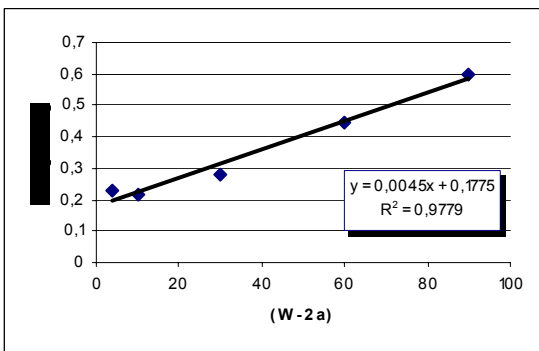
Las Figuras 8 a 12 muestran los resultados en los gráficos normalizados que se explicaban en la Ec. (2).



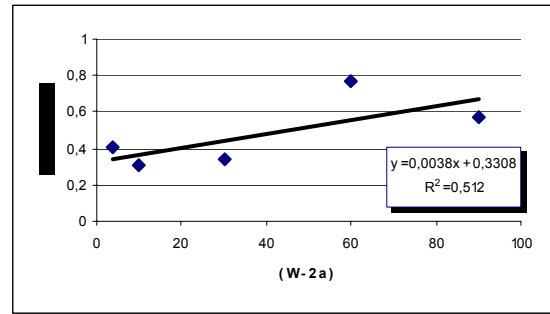
**Fig. 8.** Energía absorbida por unidad de área de grieta frente a la anchura del ligamento, para 5 ensayos con diferentes tamaños iniciales de grieta, para una velocidad de estiramiento del acetato de 2 mm/minuto.



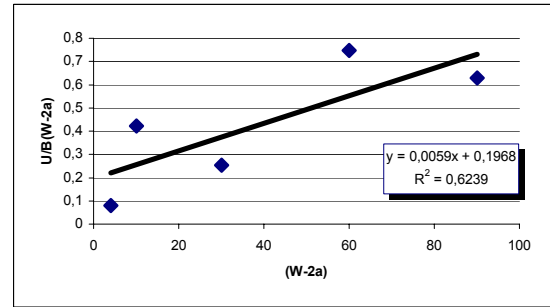
**Fig. 9.** Idem. para 20 mm/minuto.



**Fig. 10.** Idem. para 40 mm/minuto.



**Fig. 11.** Idem. para 60 mm/minuto.



**Fig. 12.** Idem. para 100 mm/minuto.

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos para las diferentes velocidades de sollicitación ensayadas, junto con los coeficientes de correlación ( $R$ , de Pearson, al cuadrado) obtenidos para los diferentes ajustes.

Las Figuras 13 y 14 representan la energía esencial de fractura y la componente plástica del trabajo absorbido, respectivamente, que se han obtenido para las diferentes velocidades de sollicitación.

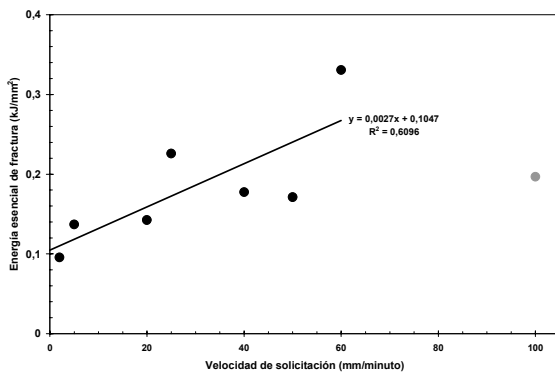
**Tabla 1.** Energía esencial de los acetatos y trabajo plástico en función de las velocidades de estiramiento de los acetatos.

Velocidad (mm/minuto)	$w_e$ (kJ/mm <sup>2</sup> )	$\beta w_p$ (kJ/mm <sup>3</sup> )	$R^2$ (-)
2	0.0956	0.0026	0.6421
5	0.1369	0.0022	0.9363
20	0.1424	0.0048	0.9846
25	0.2260	0.0034	0.9334
40	0.1775	0.0045	0.9779
50	0.1711	0.0040	0.9397
60	0.3308	0.0038	0.5120
100	0,1968	0.0059	0.6239

**5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

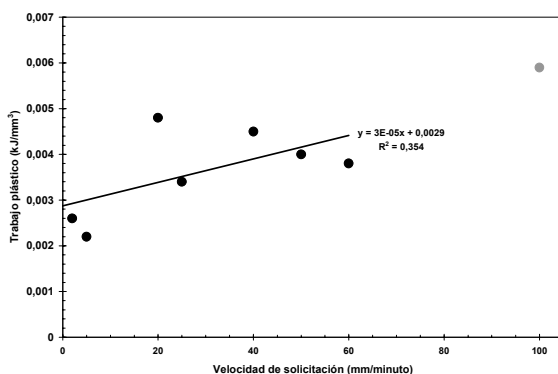
Como se observa en la Tabla 1 y la Figura 13, la energía esencial de fractura aumenta con la velocidad de sollicitación de los acetatos. El resultado para la velocidad de sollicitación más elevada debería ignorarse pues los ensayos duran muy poco tiempo y el número de

datos experimentales registrado resulta ser demasiado pequeño.



**Fig. 13.** Energía esencial de fractura en función de la velocidad de sollicitación.

La metodología de la determinación de la energía esencial de fractura parece muy adecuada para la determinación de la tenacidad de las películas delgadas de materiales poliméricos, como son los acetatos de celulosa.



**Fig. 14.** Componente plástica de la energía absorbida, en función de la velocidad de sollicitación.

Los alumnos han desarrollado recursos e iniciativas para sortear las inevitables dificultades experimentales que se encuentran: cambio en la geometría de las probetas, variación de la tenacidad con las velocidades de sollicitación, cálculo de las áreas sustentadas por las curvas, redacción de un informe, etc.

La energía esencial de fractura en el acetato de celulosa, y para los espesores típicos de las transparencias, aumenta al hacerlo la velocidad de aplicación de la deformación.

La energía esencial de fractura se sitúa en torno a los  $w_e \cong 0,15 \text{ kJ/mm}^2$  para velocidades moderadas de aplicación de las cargas (entre 5 y 50 mm/minuto para un folio de tamaño DIN A4, estirado en vertical y en esa posición).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Escuela Superior de Ingenieros, Tecnun (Universidad de Navarra) la provisión de los medios experimentales requeridos para la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] [http://www.goodfellow.com/csp/active/static/S/Acetato\\_de\\_Celulosa.HTML](http://www.goodfellow.com/csp/active/static/S/Acetato_de_Celulosa.HTML)
- [2] J. Gil Sevillano, A. Martín Meizoso, B. Goes, J. M. Martínez Esnaola, M. Fuentes, "Energía esencial de fractura del papel. Una experiencia didáctica". *Anales de Mecánica de la Fractura*, 16 (1999) 338-341.
- [3] ESIS (European Structural Integrity Society), "Testing Protocol for Essential Work of Fracture". Version 3 (1995).
- [4] Ferrer, D., MasPOCH, M. U., Santana, O. y Martínez, A. B., "Influencia de las variables de ensayo sobre el trabajo esencial de fractura en films de polipropileno", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 15, 150-155 (1998).
- [5] R. W. Truss, "Polymer Fracture.pdf", p. 27-29.
- [6] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky y W. T. Vetterling, "Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing", Cambridge University Press, Cambridge, 1986.