

**ENERGÍA ESENCIAL DE FRACTURA DEL PAPEL. UNA EXPERIENCIA DIDÁCTICA****J. Gil Sevillano, A. Martín Meizoso, B. Goes, J. M. Martínez Esnaola, M. Fuentes****Centro de Estudios e Investigaciones Técnicas de Gipuzkoa (CEIT)  
Paseo de Manuel Lardizábal, 15, 20009 San Sebastián  
y****Alumnos del curso 97/98 de Ciencia de Materiales 1****Escuela Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Navarra,  
Apdo. 1674, 20008 San Sebastián.**

**Resumen:** Se presenta un trabajo práctico realizado por alumnos de Ingeniería Industrial en la asignatura de Ciencia de los Materiales. El trabajo consistía en medir la energía específica esencial de fractura de hojas o láminas (papel o “foil” de aluminio). El tipo de hojas y el método de medida quedaba a su libre arbitrio y sólo se les suministraron indicaciones sumarias sobre la propiedad a medir y posibles métodos a utilizar. Este trabajo presenta los resultados obtenidos al medir la energía esencial de fractura de un papel para fotocopidora, de  $80 \text{ g/m}^2$ , el que la mayoría de los alumnos escogieron, utilizando el método de desgarradura con 2 grietas (probeta de 3 “patas”). Los métodos de medida de la carga empleados fueron aproximados y muy variados. Pese a todo, se obtienen unas medidas razonables y se pueden extraer algunas conclusiones sobre la resistencia a rasgadura del papel que concuerdan bien con datos disponibles en la bibliografía.

**Abstract:** Results of a practical work carried out by 2<sup>nd</sup> year engineering students are presented. The work consisted in measuring the specific essential work of fracture of sheet materials (paper, aluminium foil, etc.). Here we present measurements carried out on  $80 \text{ g/m}^2$  copy paper using a shearing method (three-legs sample). The techniques used for measuring loads were approximate and indeed very varied. Anyway, a reasonable figure for the essential work of fracture of paper was obtained, in good agreement with available data from the literature.

**1. INTRODUCCIÓN**

Los métodos tipificados para la medida de la tenacidad a fractura consideran el caso de grandes espesores y condiciones de deformación plana. Los métodos disponibles para la medida de la tenacidad en condiciones de tensión plana son mucho más escasos. Pese a todo, el número de materiales que se fabrican en forma de láminas delgadas, hojas y películas es muy elevado. Uno de los métodos propuestos para la medida de la tenacidad en estas condiciones es el de la energía esencial de fractura, muy utilizado ya para la caracterización de polímeros (1,2).

Dentro del contexto de la asignatura de Ciencia de los Materiales, en la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de San Sebastián, se propuso como ejercicio práctico a los alumnos de segundo curso (primer ciclo) que midieran la energía esencial de fractura de láminas de papel (de calidad copia o prensa) o “foil” de aluminio.

**2. MATERIALES**

El material y método exacto quedaban a su libre arbitrio, con indicación de que en el informe del trabajo (en forma de panel) detallaran las características experimentales necesarias. Se les orientó únicamente sobre el concepto de “trabajo específico esencial de fractura” y, genéricamente, sobre los métodos de medida en modo I y modo III. Los montajes y métodos de medición a usar debían ser “de cocina”, no de laboratorio. El objetivo de la práctica era, además de consolidar un concepto importante de fractura de materiales, enfrentarles por primera vez a las dificultades de medición de distintas magnitudes reales y a la solución de un problema experimental relativamente abierto. Se les animó a que trataran también de estimar la precisión de la medida y los errores cometidos.

Los alumnos escogieron papel y hojas de aluminio de distintos gramajes y marcas, o recortes de periódicos diferentes (Diario Vasco, La Vanguardia, ABC, El País,...), obviamente de gramajes variados. El papel más utilizado fue el que, en este momento, vendía el Servicio de Reprografía de la Escuela: papel Navigator Universal (Soporcel, Portugal) de 80 g/m<sup>2</sup> y espesor nominal de 0'1 mm.

### 3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Con respecto a los métodos de medida empleados, éstos se pueden clasificar en ensayos de tracción de una probeta con dos entallas laterales (irrealizable correctamente sin algún tipo de "máquina de ensayo" con registro de la carga en función del desplazamiento) y ensayos de desgarradura (la opción más frecuente). Dentro de los ensayos de desgarradura los hay de dos tipos: con una sola grieta (2 patas) o dos grietas (3 patas), como muestra la Fig. 1. El estudio lo limitaremos a este último ensayo, del que se dispone de un mayor volumen de datos relativamente fiable.

Los métodos de medida de la carga al alcance de la imaginación de los alumnos son de lo más variados: se emplearon tornillos, canicas, arroz, arena,... como "unidades" de medida. Y los dispositivos experimentales (horizontales o verticales) se construyeron en su mayoría con hilo de pescar, papel "cello", poleas, palos de helados, platillos,... o cosas más sofisticadas: bobinas eléctricas, dinamómetros, balanzas,... No todo fue muy ortodoxo desde el punto de vista científico, pero tampoco hay que quitar mérito al ingenio de los alumnos.

### 4. RESULTADOS

Reducido el experimento al modo de desgarradura con 2 grietas (3 patas), la energía de fractura se obtiene como el cociente entre el trabajo realizado por la carga externa:

$$W_{ext} = F \cdot 2\Delta a \quad (1)$$

(en donde  $F$  es la fuerza para desgarrar el papel,  $\Delta a$  el incremento de longitud de las grietas, y el incremento de área de las grietas (2 en este caso):

$$\Delta S = 2 \cdot t \cdot \Delta a \quad (2)$$

luego, la energía de fractura valdrá:

$$w_S = \frac{2 \cdot F \cdot \Delta a}{2 \cdot t \cdot \Delta a} = \frac{F}{t} \quad (3)$$

en donde  $t$  es el espesor del papel.

En principio  $w_S$  es función de la anchura de las patas en el experimento y la energía esencial se define como:

$$w_e = \lim_{W \rightarrow 0} w_S \quad (4)$$

en donde  $W$  representa la anchura del ligamento de papel, véase la Fig.1.

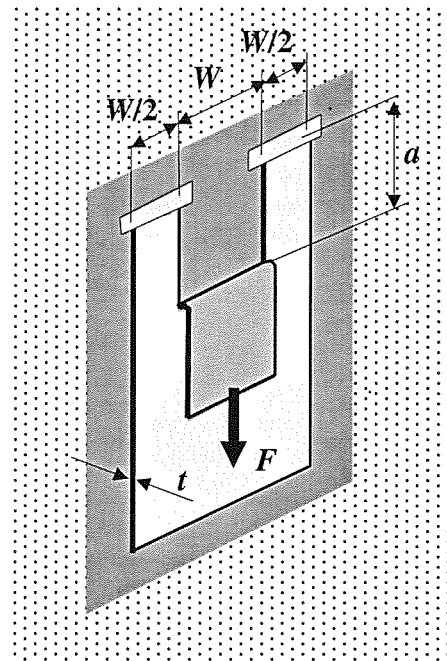
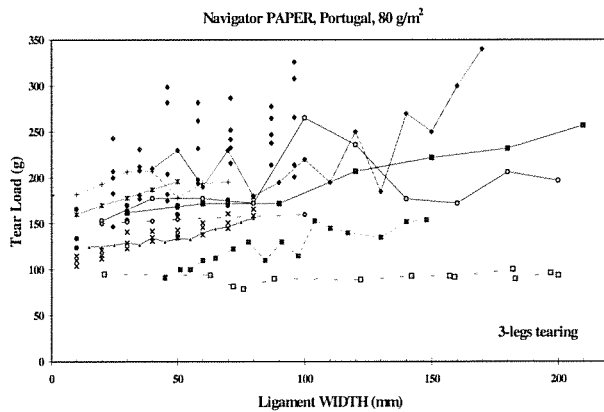


Fig. 1. Esquema del dispositivo experimental empleado en la realización de ensayos de rasgadura del papel.

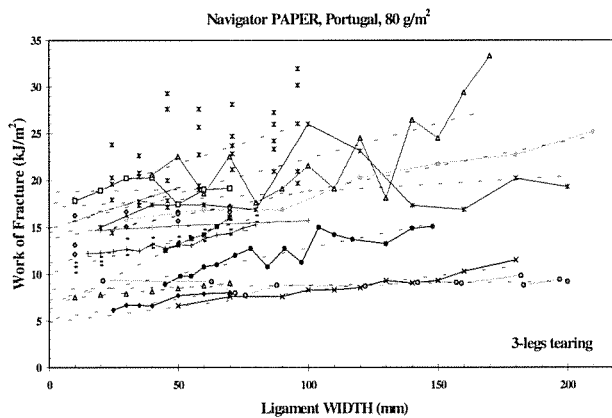
El método para calcular este límite consiste en obtener el trabajo de fractura para diferentes valores de  $W$  y posteriormente, extrapolar a cero el valor del ligamento.

Las medidas de las cargas de desgarradura obtenidas para diferentes anchuras del ligamento se resumen en la Fig. 2. Como es evidente, la enorme dispersión se debe tanto a la heterogeneidad de los métodos empleados para la medida de la carga, como a las diferentes restricciones de desplazamiento impuestas por los distintos grupos y, en menor medida, a la propia dispersión del papel, diferencias de humedad y temperatura, etc. El tipo de grieta de iniciación también ha podido influir significativamente. Además, tampoco se ha documentado la dirección de la grieta respecto a la de fabricación del papel, cuya anisotropía puede ser muy importante (3).



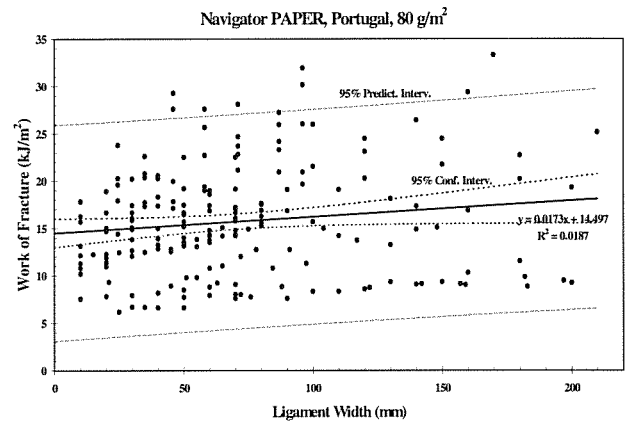
**Fig. 2.** Cargas de desgarro en función de la anchura del ligamento para el papel Navigator de 80 g/m<sup>2</sup>. Los diferentes símbolos representan las medidas de 12 grupos diferentes de trabajo y, en consecuencia, con diferentes métodos de medida de la carga y arreglos experimentales.

A través de la Eq. (3), se calcula el trabajo de fractura, utilizando el espesor nominal del papel:  $t = 100 \mu\text{m}$ . Las medidas del trabajo de fractura en función de la anchura del ligamento se recogen en la Fig. 3.



**Fig. 3.** Medidas del trabajo de desgarro del papel en función de la anchura del ligamento realizadas por los diferentes grupos.

Los diferentes grupos miden trabajos específicos esenciales de fractura comprendidos entre 4'8 y 18'8 kJ/m<sup>2</sup> y pendientes comprendidas entre 5 y 137 kJ/m<sup>3</sup>.

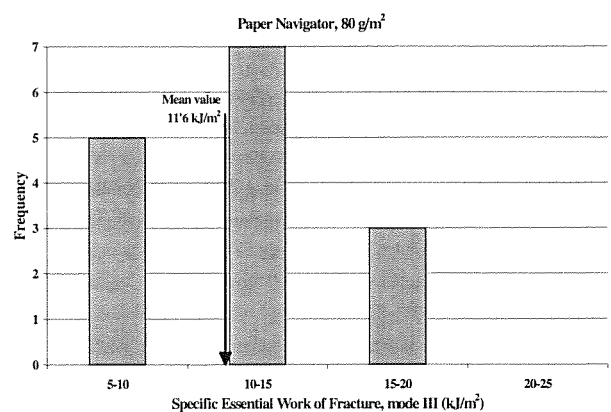


**Fig. 4.** Medidas del trabajo de desgarro del papel en función de la anchura del ligamento.

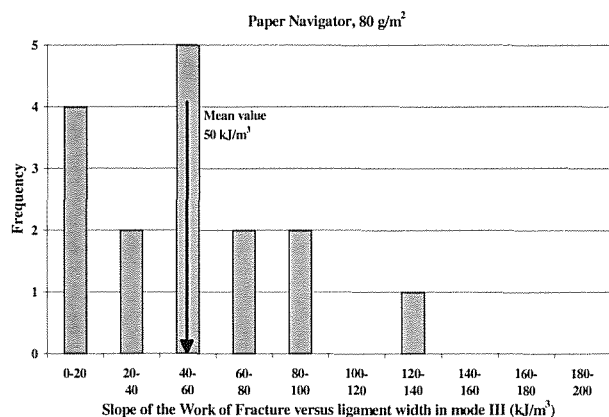
La Fig. 4 muestra la recta de regresión para el conjunto de los datos experimentales junto con los intervalos de confianza al 95% tanto para la población como para la recta de regresión. De su ordenada en el origen, se obtiene, para el trabajo esencial de fractura para el papel Navigator de 80 g/m<sup>2</sup>,

$$W_{es} = 14'5 \pm 1'5 \text{ kJ/m}^2 \text{ (i.c. 95\%)} \quad (5)$$

Resulta un valor razonable comparándolo con los datos que aparecen en la bibliografía, que sitúan este parámetro, en el modo I, entre 4'5 y 21'5 kJ/m<sup>2</sup>, dependiendo del tipo de papel y de la dirección de ensayo (4-6), y entre 10 y 29 kJ/m<sup>2</sup> en modo III (7), con un valor, en este último caso, de 12'7 kJ/m<sup>2</sup> para un papel similar al aquí ensayado.



**Fig. 5.** Distribución de las energías específicas de fractura medidas por cada uno de los 16 grupos.



**Fig. 6.** Distribución de los valores de la pendiente del trabajo de fractura en función del espesor del ligamento, obtenidos por los 16 diferentes grupos.

El otro hecho relevante es la escasa pendiente de la recta media (17'3 kJ/m<sup>3</sup>). La independencia del trabajo de fractura del espesor del ligamento entra cómodamente dentro del intervalo de confianza para este valor medio de la pendiente. Al promediar todos los valores indiscriminadamente, sin tener en cuenta que los resultados de cada grupo de trabajo cubrían intervalos muy diferentes de longitud del ligamento, se ha podido falsear el verdadero resultado. Si se tienen en cuenta los resultados de cada grupo de medida, se obtienen los histogramas de las Figs. 5 y 6, más acordes con los resultados de la bibliografía, con esta componente del trabajo de fractura, considerada en bibliografía como "trabajo específico no-esencial".

## 5. CONCLUSIONES

- Los métodos de bricolaje empleados por los alumnos para la medida de la carga son poco fiables, pero muestran que con muy pocos medios es posible experimentar y medir una magnitud fundamental de la Mecánica de la Fractura.

- En cualquier caso, el trabajo específico esencial de fractura del papel Navigator de 80 g/m<sup>2</sup> se sitúa en torno a los 14'5 kJ/m<sup>2</sup>.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los alumnos de 2º curso de Ingeniería Industrial (97/98) sus esfuerzos en la realización de estas medidas (compensados, eso sí, con una pequeña fracción de la calificación final).

## 7. REFERENCIAS

- (1) ESIS (European Structural Integrity Society). "Testing Protocol for Essential Work of Fracture". Version 3 (1995).
- (2) Ferrer, D., Maspoch, M. U., Santana, O. y Martínez, A. B. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 15, 150 (1998).
- (3) Korteoja, M., Salminen, L. I., Nikanen, K. J. y Alava, M. J. *Mater Sci. Eng. A*, A248, 173 (1998).
- (4) Mai, Y.-W., *Int. J. Mech. Sci.*, 35, 995 (1993).
- (5) Mai, Y.-W., He, H., Leung, R. y Seth, R. S., "Fracture Mechanics: 26<sup>th</sup> Volume", ASTM STP 1256, W. Reuter, J. H. Underwood y J. C. Newman, Jr., eds., ASTM, Philadelphia (EEUU), 1995.
- (6) Yu, Y. y Kärenlampi, P., *J. Mater. Sci.*, 32, 6513 (1977).
- (7) Atkins, A. G. y Mai, Y. W., *J. Mater. Sci.*, 14, 2747 (1979).