

CRITERIOS DE FRACTURA APLICABLES A LOS POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRAS EN PRESENCIA DE ENTALLAS

Belzunce, F.J., Gutiérrez, A. y Viña J.

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica
ETS Ingenieros Industriales (Universidad de Oviedo)
Carretera de Castiello, s/n. 33204 GIJON (ASTURIAS)

Resumen.- Se ha utilizado el factor de intensidad de tensiones para caracterizar la fractura de probetas de poliéster reforzado con mat y con tejido bidireccional de fibra de vidrio. Se utilizaron ensayos de tracción de probetas con una entalla lateral de tamaño variable. Asimismo se han determinado las curvas R de estos materiales y aplicado el criterio de fractura energético correspondiente. Este último criterio permite predecir con un grado de precisión notable las tensiones de fractura de estos materiales en presencia de entallas.

Abstract.- The stress intensity factor was used to characterize the fracture of chopped strand mat and woven roving glass fibre reinforced polyester by means of single edge notched tensile specimens with variable crack lengths. Their R-curves were also determined in order to apply the energetic criterion. This criterion allows the accurate prediction of fracture stresses when these materials have some kind of notches.

1. INTRODUCCION

Los polímeros reforzados con fibra de vidrio empiezan ya a utilizarse en grandes cantidades en aplicaciones estructurales muy variadas como son la fabricación de depósitos, reactores químicos, tuberías, paneles de automóviles, etc. y todos los datos apuntan en la línea del incremento continuado de su utilización en ingeniería. Sin embargo, los ingenieros no suelen conocer el efecto que tienen sobre este tipo de materiales la presencia de discontinuidades y entallas. Generalmente este desconocimiento, junto con otros factores intrínsecos derivados del propio proceso de fabricación utilizado, conduce a que los códigos establezcan unas tensiones de diseño muy inferiores a la resistencia real de estos materiales en virtud de la aplicación de factores de seguridad enormes en comparación con los utilizados en los diseños con aleaciones metálicas. Por estas razones es actualmente muy importante conocer y divulgar el comportamiento de los polímeros reforzados con fibras en presencia

de concentradores de tensiones y establecer criterios de fractura en estas situaciones, soportados por una base teórica lo más rigurosa posible, contrastados experimentalmente y de fácil aplicación en ingeniería.

2. SENSIBILIDAD A LA ENTALLA DE LOS POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

Los polímeros reforzados con fibras son, al igual que el resto de los materiales utilizados en ingeniería, sensibles al efecto de las entallas como se deduce del hecho de que sus correspondientes tensiones de fractura en modo I son claramente inferiores a las que resultarían si la tensión de fractura de la sección real permaneciera invariable con el tamaño de la entalla. Este supuesto se representa en la figura 1 por la recta de ecuación

$$\sigma = \sigma_u (1-a/W) \quad (1)$$

σ_u es la resistencia a la tracción del material sin entallar, W el ancho de la probeta y a la

longitud de la entalla.

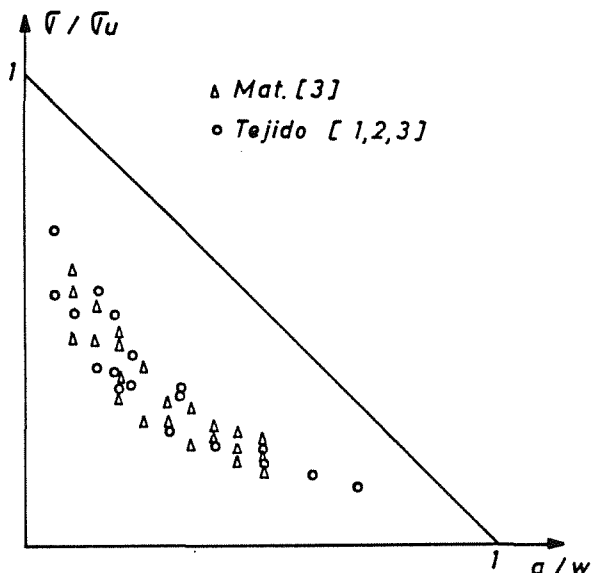


Fig. 1. Tensiones de fractura de probetas entalladas de resinas poliéster y epoxi reforzadas con mat y con tejido de vidrio

Los datos bibliográficos [1,2,3], representados en la figura 1, correspondientes a diferentes resinas de poliéster y epoxi reforzadas con mat o tejido de fibra de vidrio muestran con claridad la sensibilidad a la entalla de estos materiales. Estos resultados indican que la tensión de fractura de las probetas entalladas de los materiales reforzados con fibras es aproximadamente inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño de la entalla a , lo que representaría la aplicabilidad de la teoría de la mecánica de la fractura elástica lineal.

3. CRITERIOS DE FRACTURA

La resistencia mecánica de los polímeros reforzados con fibras ha sido analizada por Nuismer y Whitney [4], quienes propusieron los denominados criterios de la tensión puntual ("point stress") y de la tensión media ("average stress") de amplia difusión y aceptación. El criterio de la tensión puntual, deducido para una placa de dimensiones infinitas con una grieta centrada de tamaño $2a$, predice el fallo cuando la distribución de la tensión normal delante de aquélla es tal que se alcanza la resistencia mecánica del material σ_u a una determinada distancia característica b_0 medida desde el frente de la grieta. Se concreta en la expresión siguiente:

$$\sigma = \sigma_u (1 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \quad \alpha = a/(a+b_0) \quad (2)$$

El criterio de la tensión media predice el fallo en aquél mismo supuesto cuando el valor medio de la tensión normal en una determinada distancia característica c_0 alcanza la resistencia mecánica del material σ_u , y se expresa:

$$\sigma = \sigma_u [(1-\beta)/(1+\beta)]^{\frac{1}{2}} \quad \beta = a/(a+c_0) \quad (3)$$

Las ecuaciones (2) y (3) expresadas en términos

del factor de intensidad de tensión crítico K_Q resultan ser respectivamente:

$$K_Q = \sigma_u Y [a(1-\alpha^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$K_Q = \sigma_u Y [a(1-\beta)/(1+\beta)]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Y es el factor adimensional que tiene en cuenta la geometría de la probeta. Estas expresiones (5) y (6) se aproximan asintóticamente a valores constantes para grietas suficientemente grandes ($a > b_0, c_0$), definidos para los criterios de la tensión puntual y de la tensión media respectivamente por las ecuaciones:

$$K_Q = \sigma_u (2\pi b_0)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$K_Q = \sigma_u (\pi c_0/2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Numerosos resultados experimentales han probado la adecuación de estos criterios a los polímeros reforzados con fibras para una gran variedad de éstas y de orientaciones de las mismas, lo que en principio sugiere la posibilidad de aplicación de la teoría de la mecánica de la fractura elástica en la determinación del fallo de este tipo de materiales. Los valores de las constantes características obtenidas en los ensayos de Nuismer y Whitney fueron $b_0=1\text{mm}$ y $c_0=3.8\text{mm}$.

Por otro lado Wells y Beaumont [5] e igualmente Harris [6], tras una amplia recopilación de datos correspondientes a una gran variedad de polímeros reforzados con tipos y orientaciones de fibras diversas mostraron que, exceptuando las entallas menores (inferiores a 2 mm.), el fallo de estos materiales se produce para tensiones inversamente proporcionales a la raíz cuadrada de la longitud de la entalla, bajo condiciones del factor de intensidad de tensión crítico K_Q constante, independiente del tamaño de la entalla practicada. Además, estos autores obtuvieron relaciones de proporcionalidad entre el factor de intensidad de tensiones crítico K_Q y la resistencia mecánica del material no entallado σ_u , tales que el 90% de sus datos quedaban recogidos por la igualdad:

$$K_Q/\sigma_u = 0.07 \pm 0.02 \text{ m}^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Esta expresión muestra que, a diferencia de lo que ocurre con las aleaciones metálicas y con los polímeros, donde normalmente todo aumento de la resistencia mecánica se consigue a expensas de la tenacidad, dado que los mecanismos de endurecimiento estructural (que inhiben el movimiento de las dislocaciones) dificultan al mismo tiempo la extensión de zonas plásticas localizadas, consumidoras de energía; los materiales reforzados con fibras poseen tanta mayor tenacidad cuanto mayor es su resistencia mecánica, hecho éste justificado en términos generales por la dificultad adicional que oponen las fibras a la progresión del daño.

4. MATERIALES Y EXPERIMENTACION REALIZADA

El material utilizado en este trabajo fué una

resina de poliéster ATLAS 382-05AD reforzada con mat y con tejido bidireccional de fibra de vidrio. Se prepararon placas de 400x250 mm² y 2 mm. de espesor por moldeado a mano bajo vacío y curado posterior a 80°C durante tres horas.

Las probetas de ensayo utilizadas fueron de forma rectangular de 30 y 40 mm. de ancho. Con excepción de unas pocas probetas, sobre las que se midió la resistencia mecánica de los materiales no entallados, se practicaron entallas laterales de tamaños en relación al ancho (a/w) variables entre 0.1 y 0.5. Todas las entallas fueron afiladas con una cuchilla aguda con objeto de asegurar un radio en el extremo de 0.1 mm.

Se efectuaron ensayos de tracción uniaxial bajo control de desplazamiento en una maquina servohidráulica MTS de 250 KN con una velocidad de desplazamiento de las mordazas de 2 mm/min. Un extensómetro lateral situado a una distancia fija de 3 mm. respecto del borde lateral de la probeta nos permitió medir continuamente la abertura de la entalla en el proceso de carga. Finalmente, se obtuvo el registro gráfico de la fuerza aplicada en función de la deformación localizada en la zona de la entalla, COD.

El factor de intensidad de tensiones bajo condiciones de tensión plana K_I se calculó a partir de la fórmula siguiente:

$$K_I = (P/W.t)Y\sqrt{a}$$

P es la fuerza aplicada, W y t el ancho y el espesor respectivamente, a el tamaño de la entalla, e Y el factor adimensional geométrico siguiente:

$$Y = 1.99 - 0.41(a/W) + 18.7(a/W)^2 - 38.48(a/W)^3 + 53.85(a/W)^4$$

Aunque la expresión del factor de intensidad de tensiones utilizada es únicamente válida para el caso de materiales isotrópicos y homogéneos, puede también aceptarse para la caracterización de los materiales que se han utilizado en este trabajo [7].

5. RESULTADOS Y DISCUSION DE LOS MISMOS

5.1. Tenacidad a la fractura

La figura 2 muestra las curvas fuerza-abertura del extensómetro (COD) típicas que se obtienen con este tipo de materiales para diferentes tamaños de las entallas. Todos estos gráficos son inicialmente lineales, pero más adelante se desvían de la linealidad debido a la acumulación de daño estructural en el frente de la entalla antes de que tenga lugar la fractura final de la probeta. Hay que tener presente que estos materiales no se deforman plásticamente.

Estos gráficos nos han permitido determinar el factor de intensidad de tensiones de iniciación del daño K_I (de acuerdo con la norma ASTM E399, se ha calculado a partir de la carga para la que se aprecia una desviación de la rigidez inicial de un 5%) y el factor de intensidad de tensiones crítico K_{IQ} (utilizando la carga máxima). Igualmente hemos calculado las distancias características b_0 y c_0 de

ajuste de nuestros resultados con el modelo de Nuismer y Whitney. En la tabla 1 se presentan los valores medios de todos estos parámetros para el poliéster reforzado con mat y con tejido de vidrio. Mientras el factor K_I era independiente del tamaño de la entalla, el parámetro K_{IQ} aumentaba ligeramente con aquélla. Las distancias características b_0 y c_0 obtenidas en estos ensayos fueron algo mayores que las deducidas por Nuismer y Whitney, hecho este achacable a diferencias en los procesos de fabricación seguidos en uno y otro caso.

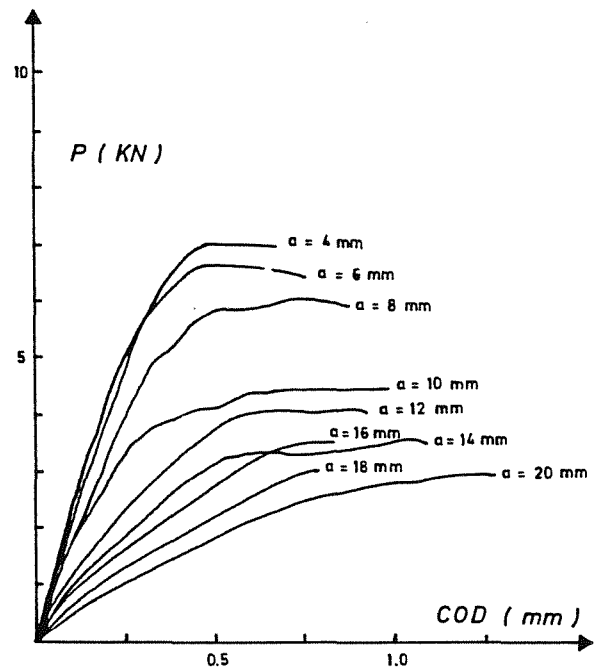


Fig. 2. Gráficas Fuerza-desplazamiento del extensómetro correspondientes a probetas entalladas de poliéster reforzado con mat de vidrio (W=40mm).

TABLA 1. Propiedades mecánicas y parámetros característicos del poliéster reforzado con mat y con tejido de vidrio.

	v_f (%peso)	E (MPa)	σ_u (MPa)	K_I (MPa \sqrt{m})	K_{IQ} (MPa \sqrt{m})	b_0 (mm)	c_0 (mm)
Poliéster/Mat	46.9	7920	181	9.3	17.9	1.4	5.6
Poliéster/Tejido	69.9	10980	359	13.1	35.9	1.5	6.3

La figura 3 muestra los valores de σ_u y K_{IQ} obtenidos con los materiales utilizados en este trabajo junto a otros datos bibliográficos correspondientes a materiales similares. La recta de regresión obtenida muestra un buen coeficiente de correlación (0.94), digno de ser tomado en consideración si se tiene en cuenta que estamos tratando con materiales diversos obtenidos en condiciones de fabricación diferentes, y una pendiente (relación entre K_{IQ} y σ_u) de 0.075 m^{3/2}. Es de destacar la excelente correspondencia de estos resultados con los expresados por la ecuación (9), lo que

confirma una vez más que la tenacidad a la fractura de los polímeros reforzados con fibras aumenta paralelamente con su resistencia mecánica. Siendo estos materiales esencialmente frágiles, se comportan de modo tenaz en presencia de entallas como consecuencia de la aparición de una zona dañada delante de aquéllas, al modo de las zonas plásticas que se crean en las aleaciones metálicas. Esta similitud aparente, unida a la posibilidad contrastada de utilizar el factor de intensidad de tensiones K para caracterizar el proceso de fractura en estos materiales, indujo a plantear la posibilidad de evaluar su comportamiento en presencia de entallas mediante las curvas de resistencia o curvas R [11,12,13].

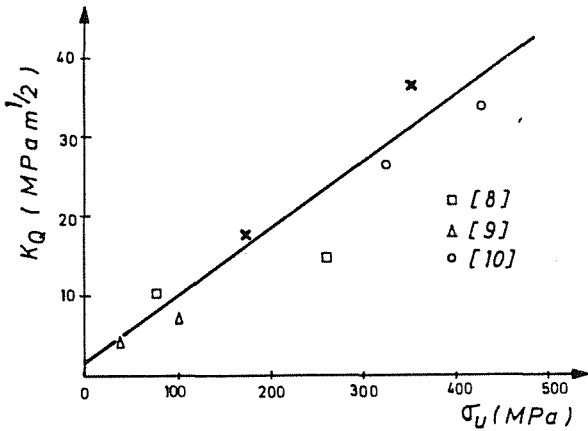


Fig. 3. Representación de la relación existente entre el factor de intensidad de tensiones crítico y la resistencia mecánica de los materiales ensayados junto con otros datos obtenidos de las referencias [8], [9] y [10].

5.2. Curvas R

La forma de las curvas fuerza-abertura del extensómetro obtenidas experimentalmente con las probetas entalladas (Fig. 2) sugiere la aparición primero y el crecimiento luego de una zona dañada delante de la entalla que finalmente lleva a la fractura inestable de la probeta. Sin embargo, no se puede caracterizar el crecimiento de este daño como la extensión de una grieta desde el frente de la entalla, sino que más bien se identifica como una zona más o menos extensa de daño estructural donde ocurren fenómenos como roturas de fibras, agrietamientos irregulares de la fase matriz y separaciones de las intercaras fibra-matriz.

Este daño estructural puede ser asimilado a una grieta equivalente o extensión de la entalla original que da lugar a una flexibilidad de la probeta idéntica. Midiendo la flexibilidad inicial de probetas entalladas para relaciones del tamaño de la entalla inicial al ancho de las mismas a_0/w variables entre 0.1 y 0.5 se pueden obtener las curvas de flexibilidad de las probetas entalladas. La figura 4 muestra una de estas representaciones así como el buen ajuste de los datos experimentales logrado con una curva de regresión parabólica.

Conocidas las curvas de flexibilidad de las probetas ensayadas es posible calcular para cada carga de los gráficos fuerza-abertura del extensómetro (Fig. 2), la flexibilidad en cada

instante, y a continuación el tamaño de la grieta efectiva o equivalente a_e . Con todos los datos obtenidos al ensayar probetas de igual geometría se determina la curva de resistencia o curva R del material representando los valores del factor de intensidad de tensiones efectivo $K_I(a_e)$ frente al crecimiento de la grieta Δa ($\Delta a = a_e - a_0$).

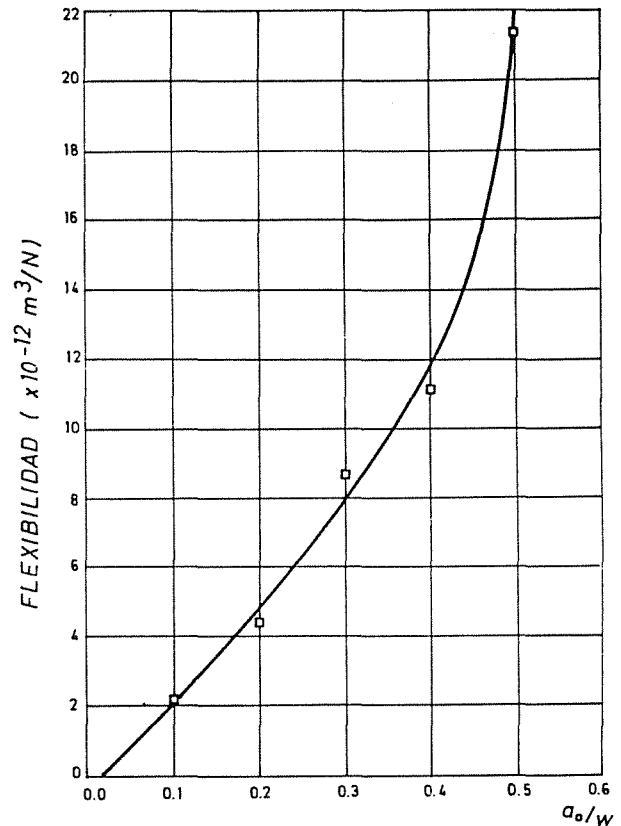


Fig. 4. Curva de flexibilidad de probetas entalladas de poliéster reforzado con mat de vidrio ($w=40\text{mm}$).

La figura 5 muestra las curvas R obtenidas al ensayar probetas de poliéster reforzado con mat y con tejido de vidrio. Las curvas R del poliéster reforzado son independientes del tamaño de la entalla inicial a_0 [11,13,14,15]. La linealidad de las curvas R obtenidas resulta llamativa en comparación con las curvas exponenciales que habitualmente se obtienen con las aleaciones metálicas, aunque este comportamiento podría estar justificado en virtud del comportamiento elástico lineal típico de los materiales ensayados y de la ausencia de zonas plásticas. Las curvas R del poliéster reforzado con mat y con tejido de vidrio pueden expresarse por las rectas de regresión siguientes:

Poliéster/Mat: $K_R = 3500 \Delta a + 12.5 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}, \text{m)}$
 Poliéster/Tejido: $K_R = 7500 \Delta a + 13 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}}, \text{m)}$

Finalmente hemos utilizado estas expresiones de las curvas R para aplicar el criterio energético representado en la figura 6 y expresado analíticamente por las condiciones siguientes:

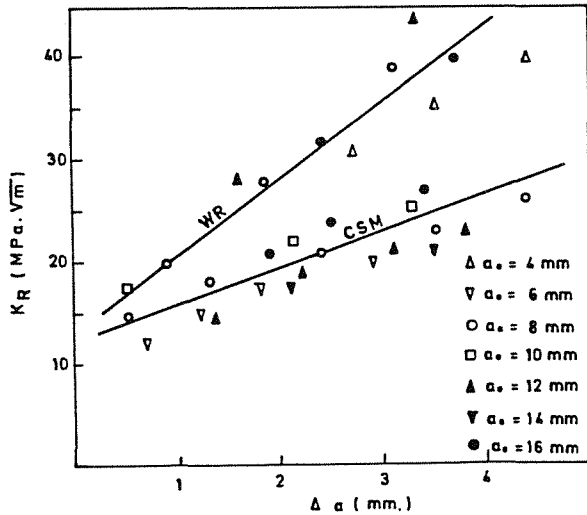


Fig. 5. Curvas R del poliester reforzado con mat y con tejido de vidrio (W=40mm).

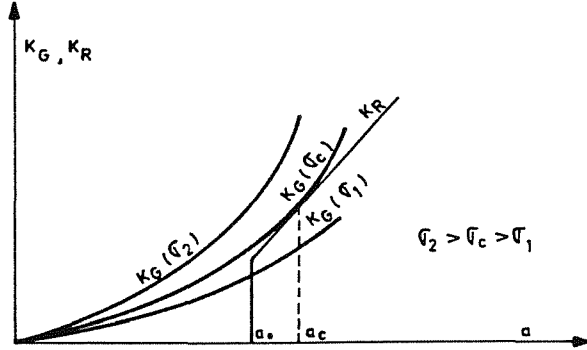


Fig. 6. Representación gráfica del criterio energético de fractura basado en las curvas R.

$$K_G = K_R$$

$$\partial K_G / \partial a = \partial K_R / \partial a$$

donde \$K_G\$ es la fuerza disponible para la extensión de la grieta G expresada en términos del factor de intensidad de tensiones. La aplicación de este criterio de fractura a las probetas utilizadas en nuestra experimentación se expresa del modo siguiente:

$$\sigma Y \sqrt{a} = A + B (a - a_0)$$

$$(1/2) \sigma Y a^{-1/2} + \sigma \sqrt{a} (dY/da) = B$$

A y B son las constantes que definen la ecuación de la recta R.

Estas ecuaciones nos permiten determinar, conocido el tamaño de la entalla inicial \$a_0\$, la tensión de fractura \$\sigma_c\$ y el tamaño de la grieta crítica en el momento de la fractura \$a_c\$ (Fig. 6).

Finalmente se ha aplicado este criterio de fractura al poliester reforzado con mat de vidrio (Fig. 5) para predecir la tensión máxima soportada por las probetas entalladas de 30 mm. de ancho. Los resultados obtenidos, representados en la Fig. 7, muestran una buena correspondencia con los datos experimentales, máxime teniendo en cuenta la variabilidad de las propiedades de los materiales utilizados justifi-

ficada por su escasa uniformidad.

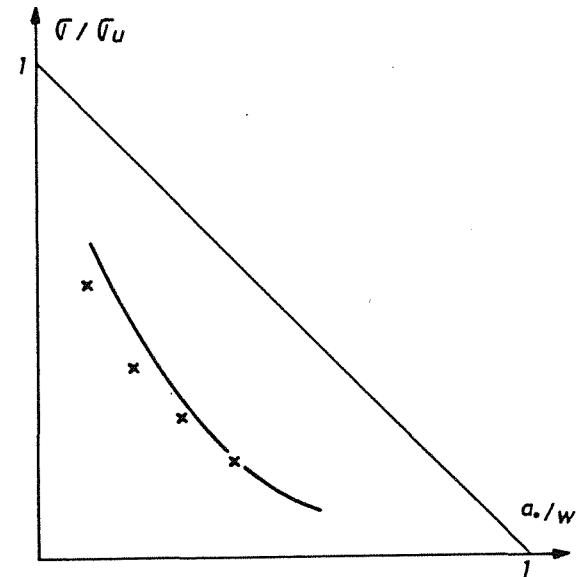


Fig. 7. Tensión de fractura de probetas de poliester reforzado con mat de vidrio (W=30mm). Resultados teóricos y experimentales.

6. CONCLUSIONES

En este apartado se señalan las siguientes conclusiones:

Las condiciones de fractura de los polimeros reforzados con mat y con tejido de vidrio pueden caracterizarse a partir del factor de intensidad de tensiones, parámetro característico de la mecánica de la fractura elástica-lineal. En oposición al comportamiento típico de las aleaciones metálicas, el factor de intensidad de tensiones crítico de estos materiales es directamente proporcional a su resistencia mecánica.

En este trabajo se expone un método simple de cálculo de las curvas R de los polimeros reforzados con fibras. Estas curvas son lineales e independientes del tamaño de la entalla inicial \$a_0\$. Finalmente, la aplicación del criterio energético de fractura, basado en las curvas R, permite predecir, con una buena precisión, la tensión de fractura de estos materiales en presencia de entallas.

7. REFERENCIAS

[1] Agarwal D.C. et al. "Fracture of glass-cloth composites. Polymer Composites. Vol.6. Nº 1 (Enero 1985), pp. 29-33.

[2] Agarwal B.D. et al. "Determination of the fracture toughness of fabric reinforced composites by the J-integral approach. Composites Science and Technology. 25 (1986), pp. 311-323.

[3] Solar M.A. y Belzunce F.J. "Fracture toughness and R-curves of glass fibre reinforced polyester. Composites (se publicará en Marzo de 1989).

[4] Nuismer R.J. y Whitney J.M. "Uniaxial failure of composite laminates containing

- stress concentrations. ASTM STP 593 (1975), pp. 117-142.
- [5] Wells J.K. y Beaumont P.W.R. "Correlations for the fracture of composite materials Scripta Metallurgica. Vol. 16(1982), pp. 99-103.
- [6] Harris B. et al. "Strength and toughness of fibre composites. Composites Science and Technology. 31 (1988), pp. 121-141.
- [7] Konish H.J. "Mode I stress intensity factors for symmetrically cracked orthotropic strips. ASTM STP 593 (1975), pp. 99-116.
- [8] Owen M.J. y Rose R.G. Journal Physics D: Applied Physics, 6 (1973), pp. 12-53.
- [9] Harris B y Cawthorne D. Plastics and Polymers (Octubre 1974), pp. 209-216.
- [10] Caprino G., Hapin J.C. y Nicolais L. Composites 10 (1979), pp. 223-227.
- [11] Gaggar S.K. y Broutman L.J. Strength and fracture properties of random fibre polyester composites. Fibre Science and Technology 9 (1976), pp. 205-224.
- [12] Agarwal B.D. y Giare G.S. Crack growth resistance of short fibre composites. Influence of fibre concentration, specimen thickness and width. Fibre Science and Technology 15 (1981), pp. 283-298.
- [13] Garg A.C. y Trotman C.K. Influence of water on fracture behaviour of random fibre glass composites. Engineering Fracture Mechanics. Vol.13 (1980), pp 357-370.
- [14] Kumar A.N., Pandey R.K. y Nanda A. Crack growth characterization in a short fibre glass-epoxy composite. Composites Science and Technology 29 (1987), pp. 17-32.
- [15] Garg A.C. Thickness and laminating effects on fracture behaviour of glass fibre composites. Fibre Science and Technology 14 (1981), pp. 27-39.