

CARACTERIZACION DEL PROCESO DE FRACTURA DE SMCs

Rodríguez C. y Belzunce F.J.

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica
E.T.S. Ingenieros Industriales (Universidad de Oviedo)
Ctra. de Castiello, s/n. 33204 GIJON (ASTURIAS)

Resumen. - Se ha llevado a cabo un programa experimental con objeto de valorar la aplicabilidad de la mecánica de la fractura elástica lineal en la caracterización del proceso de fractura de SMCs (sheet moulding compounds). En el curso de todos los ensayos se detectó un sustancial crecimiento estable de las grietas antes de alcanzar el punto de inestabilidad. Se han utilizado técnicas microscópicas con el fin de plasmar las trayectorias de las grietas a través de la estructura del material, y finalmente, se ha desarrollado la metodología a utilizar para la determinación de las curvas de resistencia (curvas R.).

Abstract. - An experimental program has been carried out with the aim to evaluate the use of linear elastic fracture mechanics to characterize the fracture process of sheet moulding compounds (SMC's). In all the cases, a stable growth of the cracks, before the attainment of the instability point, has been detected. Optical microscopic examination has been used in order to see the trajectories of the cracks through the structure of the material. Finally, the methodology to obtain the resistance curvas (R-curves) has been developed.

1. INTRODUCCION

Los SMCs (sheet moulding compounds) son materiales compuestos complejos, basados en resinas termoestables (poliésteres) reforzados con cargas minerales (CaCO_3 , alúmina hidratada, arcillas) y fibras cortas de vidrio aleatoriamente distribuidas, que se obtienen mediante técnicas automatizadas de moldeo por compresión. Forman igualmente parte de su composición otros componentes minoritarios como los catalizadores, espesadores, productos para facilitar el desmoldeo, agentes retardadores de llama, pigmentos, etc.

La principal aplicación de esta moderna tecnología se encuentra en el sector de la automoción (paneles exteriores de automóviles, cabinas de camiones, etc.), aunque su uso se está extendiendo rápidamente a otros mercados.

Los productos terminados fabricados con estos materiales, en virtud de su propia constitución y del proceso de fabricación, presentan inevitablemente discontinuidades internas (grietas), que, por otra parte, crecen durante su servicio, debido tanto a acciones mecánicas como ambientales.

El objetivo de este trabajo es establecer un procedimiento experimental fiable con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico de estos materiales en presencia de discontinuidades y valorar la evolución del daño generado bajo una aplicación estática de la carga.

2. MATERIALES Y PROPIEDADES MECANICAS

El material utilizado en este estudio ha sido una placa de 400x300 mm. y 4 mm. de espesor de SMC 3640 comercial (sheet moulding compound) suministrado por Vetrotex España, S.A., cuyos componentes mayoritarios se reflejan en la tabla 1.

TABLA 1. Composición del SMC 4640 (% en peso)

Resina Bayer W20	35,3
Carga CaCO_3 (Millicarb)	35,3
Fibra de vidrio de 50 mm. (aleatoriamente distribuida)	29,4

Con objeto de realizar una primera caracterización mecánica, hemos realizado ensayos de tracción sobre probetas de 40 mm. de ancho, previa colocación de galgas extensométricas longitudinales y transversales, con el fin de determinar el modulo elástico y el coeficiente de Poisson del material. La tabla 2 muestra los resultados medios obtenidos en estos ensayos.

TABLA 2. Propiedades mecánicas a tracción.

Módulo elástico, E (GPa)	12,9
Coefficiente de Poisson, ν	0,29
Resistencia a la tracción, R (MPa)	111
Alargamiento a tracción, ε (%)	1,5

3. TENACIDAD A LA FRACTURA

Actualmente, no existe ningún ensayo normalizado para la determinación de la tenacidad a la fractura de este tipo de materiales compuestos (heterogeneos pero isotropos). Sin embargo, hemos tratado de seguir, dentro de lo posible, el protocolo de norma para la determinación de K_c y G_c en plásticos, elaborado por el European Group of Fracture [1], ya que uno de los objetivos de este trabajo es comprobar la posibilidad de extender la aplicabilidad de este procedimiento a la caracterización de esta familia de materiales.

El ensayo utilizado ha sido el de flexión en tres puntos sobre probetas con una simple entalla lateral. Se emplearon probetas de 75 mm. de longitud y 17 mm. de ancho, siendo la distancia entre apoyos de cuatro veces el ancho y el espesor nominal de la placa B=4 mm. Las probetas fueron provistas de una entalla de longitud relativa al ancho, a/w, igual a 0,3. Todas ellas se realizaron con la ayuda de un pequeño disco de diamante de 0,1 mm. de espesor, que nos permitió asegurar un extremo de entalla de radio constante e igual a 0,06 mm.

Asimismo, con el fin de detectar la posible influencia del tamaño de la entalla en la determinación de la tenacidad, se han realizado ensayos sobre probetas con relaciones longitud de entalla-ancho, a/w, variables entre 0,1 y 0,5.

De acuerdo con el citado protocolo de norma [1], se corrigieron los registros gráficos de la fuerza aplicada en función del desplazamiento, para tener en cuenta la flexibilidad inherente al sistema de ensayo y la deformación producida por la penetración de los cilindros de carga en los cantos de la probeta. Aquéllas graficas eran en todos los casos inicialmente lineales, mostrando posteriormente una clara desviación de la linealidad antes de alcanzar la carga máxima.

La definición de la carga para la que tenía lugar el inicio del crecimiento de la grieta, P_Q, se obtuvo sobre el registro gráfico del ensayo, previo cálculo del cambio de flexibilidad (c) que implica un crecimiento relativo de la grieta, Δa/a, del 2,5%, haciendo uso de la expresión:

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Phi}{(a/w)} \cdot \frac{\Delta C}{c} \tag{1}$$

donde Φ es un factor de calibración, que adopta la siguiente expresión:

$$\Phi = \frac{\alpha + 18,64}{W \cdot (da/da)} \tag{2}$$

$$\alpha = \frac{16(a/W)^2}{(1-a/W)} \left[8,9 - 33,717(a/W) + 79,616(a/W)^2 - 112,952(a/W)^3 + 84,815(a/W)^4 - 25,672(a/W)^5 \right]$$

El factor de intensidad de tensiones en el inicio del crecimiento de la grieta, K_Q, se obtuvo a partir del factor de forma isotropo Y, correspondiente a la geometria ensayada [1,2].

$$K_Q = \frac{P_Q Y}{B \cdot W^{1/2}} \tag{3}$$

El anteriormente mencionado protocolo de norma [1] permite igualmente determinar la energía necesaria para el inicio del crecimiento de la grieta G_Q, a partir del área (U_Q) encerrada debajo de la curva corregida de la carga frente al desplazamiento, hasta el punto P_Q.

$$G_Q = \frac{U_Q}{B \cdot W^2} \tag{4}$$

Los valores obtenidos de K_Q y G_Q se han comparado mediante la conocida relación de la mecánica de la fractura elástica lineal, en tensión plana:

$$K = (E \cdot G)^{1/2} \tag{5}$$

Finalmente, siguiendo un procedimiento similar, se han determinado los parámetros K_{máx} y G_{máx}, correspondientes al punto de inestabilidad, definido por la carga máxima, P_{máx}, del registro gráfico.

La figura 1 es la representación gráfica de la variación de los factores de intensidad de tensiones correspondientes a la iniciación, K_Q, y a la inestabilidad, K_{máx}, en función del tamaño relativo de la entalla. Los datos obtenidos, aunque con una cierta dispersión (habitual por otra parte en otras propiedades mecánicas de estos materiales), fluctúan alrededor de valores constantes, lo que verifica la aplicabilidad de los conceptos de mecánica de la fractura elástica lineal a esta familia de materiales, hecho éste, asimismo, ratificado por otros investigadores [3,4].

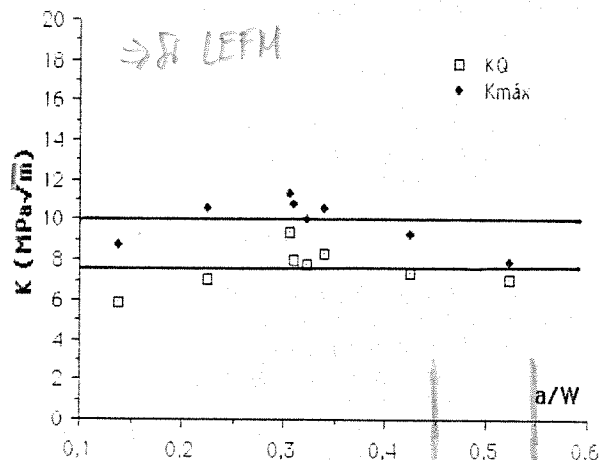


Fig.1. Variación de K_Q y K_{máx} con el tamaño relativo de la entalla, a/w

La tabla 3 muestra los resultados medios obtenidos en todos estos ensayos. Esta tabla refleja igualmente los valores medios de los factores de intensidad de tensiones calculados a partir de las energías de la fractura, K_G , mediante la expresión (5). Los resultados hallados con ambos métodos son muy similares, siendo su diferencia siempre inferior al 15%.

TABLA 3. Tenacidades a fractura.

	Iniciación	Inestabilidad
K (MPa m ^{1/2})	7,6	9,9
G (KJ/m ²)	4,2	10,1
K_G (MPa m ^{1/2})	7,3	11,4

$P_{max} > 1,1 P_Q$!! *¡¡ ¡válidos.*

4. PROPAGACION DE GRIETAS: CURVAS R

Todos los ensayos de fractura descritos en el epígrafe anterior deberían ser considerados inválidos según el protocolo de norma del EGF, dado que la relación entre la carga máxima y la de iniciación ($P_{m\acute{a}x}/P_Q$) era siempre mayor que 1,10, en virtud del sustancial crecimiento de grieta que siempre tenía lugar antes de alcanzarse la carga máxima de los ensayos. De este modo, la fractura de estos materiales se caracteriza mejor a partir de procedimientos que definan el crecimiento estable de las grietas, como por ejemplo las curva de resistencia (curvas R). El uso práctico de estas curvas para la predicción del crecimiento de grietas y de las cargas máximas que serían capaces de soportar componentes estructurales agrietados fabricados con estos materiales, parte de la hipótesis de la unicidad de las curvas R, es decir de su independencia respecto a la longitud de grieta y a la geometría y dimensiones de las probetas.

4.1. Trayectorias de avance de las grietas

Varias probetas, de geometría similar a las anteriores, se ensayaron con objeto de determinar las trayectorias de propagación del daño generado en el extremo de las entallas, durante la puesta en carga de aquéllas. Para ello, se desbastaron y pulieron con pasta de diamante las caras laterales de un conjunto de probetas, que seguidamente se ensayaron hasta alcanzar una carga comprendida entre P_Q y $P_{m\acute{a}x}$, y finalmente fueron observadas y fotografiadas en un microscopio óptico. Este proceso se repitió varias veces, aplicándose de modo sucesivo cargas crecientes, hasta la fractura completa de las probetas. La figura 2, es representativa de la generalidad de nuestras observaciones. La microfografía 2(a) muestra el inicio del crecimiento de la grieta desde el extremo de la entalla. La grieta avanza siguiendo una trayectoria paralela a la alineación de las fibras en esta zona concreta. Por su parte, la microfografía 2(b) da cuenta del avance posterior de la misma grieta al incrementar la carga aplicada a la probeta. En conjunto, las trayectorias de propagación de las grietas son muy irregulares, e implican la fractura de la fase matriz, fracturas individualizadas de las fibras y desqueses de la intercara fibra-matriz. Al mismo tiempo, la grieta principal normalmente se ramifica, siendo difícil pronosticar, antes del posterior proceso de carga, el extremo de aquélla que continuará avanzando.

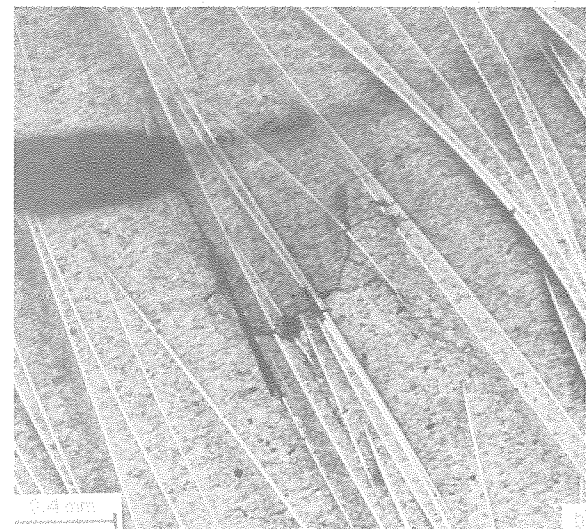
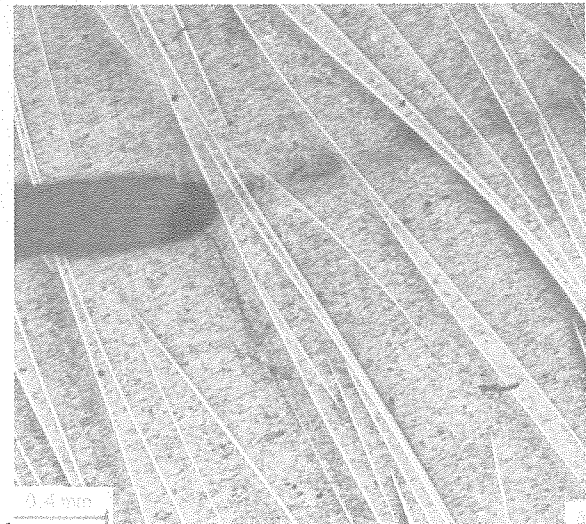


Fig.2. a) Iniciación del daño en el frente de la entalla. b) Progresión del daño.

4.2. Determinación de curvas R

La determinación de las curvas de resistencias (curvas R) exige la medida, lo más exacta posible, del tamaño de las grietas durante su crecimiento a lo largo del proceso de carga. En el apartado anterior se ha demostrado que la propagación de las grietas en esta clase de materiales no es una simple extensión paralela a la entalla inicial, como ocurre en los materiales homogéneos, sino que sus trayectorias son muy irregulares, de modo que la medida de su tamaño no puede realizarse a partir de métodos visuales. En este caso, lo más adecuado es recurrir al concepto del tamaño de grieta equivalente. Un método simple y al mismo tiempo fiable consiste en identificar la flexibilidad de la probeta dañada y la de una probeta, de la misma geometría, con la longitud de grieta equivalente [5,6]. El uso más adecuado de este método se basa en descargar la probeta ensayada, determinando el daño generado en cada caso a partir de la flexibilidad de la probeta en la carga inmediatamente posterior. El valor de esta flexibilidad se convierte a continuación en el tamaño de la grieta equivalente por medio de la expresión (1). Realizando varias cargas y descargas sucesivas a intervalos regulares se construye finalmente la curva R del material [7].

La figura 3 muestra uno de los gráficos fuerza-desplazamiento y la figura 4, la curva R obtenida. En esta última figura se han diferenciado los puntos obtenidos con las probetas consideradas standard en este trabajo ($a/W=0,3$), de aquellos otros calculados con probetas de longitudes de grieta diferentes. Subrayamos en primer lugar que todos los puntos aparecen agrupados en una banda claramente definida, que refleja una dispersión normal en esta clase de materiales, y además el tamaño de la entalla inicial no influye en los resultados finales. El mejor ajuste, como en otros casos semejantes [6,8], es de tipo lineal:

$$K = 7.04 + 3.26 \Delta a$$

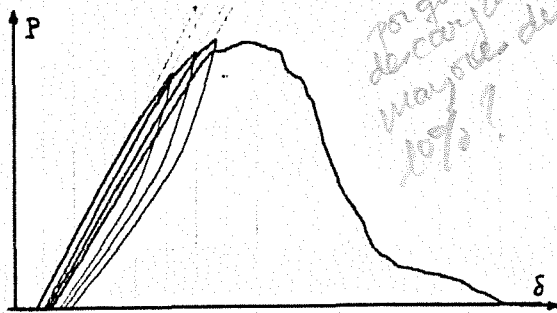


Fig. 3. Gráfico fuerza-desplazamiento de un ensayo de flexión con varias descargas.

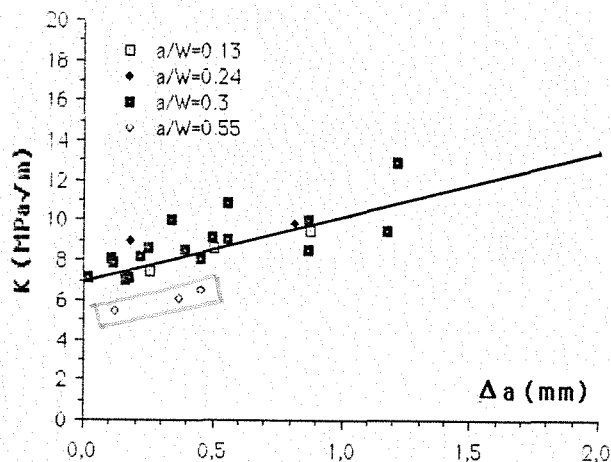


Fig. 4. Curva R del SMC.

5. CONCLUSIONES

El procedimiento desarrollado por el EGF para la determinación de la tenacidad a la fractura de plásticos puede extenderse al caso de los materiales compuestos reforzados con fibras cortas aleatoriamente distribuidas. Los parámetros de fractura obtenidos con estos materiales no dependen del tamaño de las entallas o grietas.

Sin embargo, esta familia de materiales experimenta un sustancial crecimiento de grieta antes de alcanzar el punto de inestabilidad, lo que aconseja su caracterización mediante las curvas R. En virtud de las trayectorias irregulares que siguen aquellas grietas, se ha desarrollado una metodología para su determinación basada en técnicas de flexibilidad. Las curvas R son independientes del tamaño de las grietas.

6. REFERENCIAS

- [1] European Group of Fracture. A linear elastic fracture mechanics standard for determining K_{Ic} and G_c for plastics. EGF, Task Group on Polymers and Composites. Marzo (1990).
- [2] ASTM. Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. ASTM E399, Volumen 03.3. Filadelfia, U.S.A. (1990), pp. 488.
- [3] Redjel B. y Charentenay F.X. Application of fracture mechanics to short fibre reinforced composite materials. 5èmes Journées Nationales sur les Composites. Paris, Francia (1986).
- [4] Friedrich K. Application of fracture mechanics to composite materials. Elsevier Science Publishers (1989).
- [5] Gaggar S.K. y Broutman L.J. Strength and fracture properties of random fibre polyester composites. Fibre Science and Technology, 9 (1976), pp. 205.
- [6] Kumar AN., Pandey R.K. y Nanda A. Crack growth characterization in a short fibre glass-epoxy composite. Composites Science and Technology, 29 (1987), pp.17.
- [7] Vipulanandan C. y Dharmarajan N. Critical crack tip opening displacement for polymer composites. Engineering Fracture Mechanics, 3 (1989) pp. 409.
- [8] Solar M.A. y Belzunce F.J. Fracture toughness and R-curves of glass fibre reinforced polyester. Composites, 20. Marzo (1989), pp. 120.