

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE POLIAMIDA 6 REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO CORTA EN CONDICIONES ENTALLADAS

F.T. Ibáñez-Gutiérrez^{1*}, S. Cicero¹, I.A. Carrascal¹

¹LADICIM (Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander, España.

*Persona de contacto: ibanezft@unican.es

RESUMEN

Este artículo presenta el análisis de la influencia del contenido de humedad en el efecto entalla observado en poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta (SGFR-PA6). El estudio se basa en los resultados experimentales obtenidos en un programa experimental compuesto por 75 probetas de fractura considerando tres contenidos de humedad (0% (seco), 2% y 5%) con un contenido de fibra del 10 wt.% y cinco radios de entalla diferentes variando entre 0 mm (fisuras) y 2.0 mm. A través del análisis de la evolución de la tenacidad aparente se observa cómo se reduce el efecto entalla al aumentar el contenido de humedad. Además, se valida el uso de la Teoría de las Distancias Críticas (TDC) en la predicción de la tenacidad. El estudio se ha completado con el análisis de la evolución de los micromecanismos de fractura al variar el contenido de humedad y el radio de entalla. Para ello se ha utilizado la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Los resultados obtenidos permiten relacionar la evolución de los micromecanismos de fractura presentes con la evolución de la tenacidad aparente.

PALABRAS CLAVE: SGFR-PA6, efecto entalla, contenido de humedad, Teoría de las Distancias Críticas.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of the moisture content influence on the notch effect on short glass fibre reinforced PA6 (SGFR-PA6). The research is based on the results obtained from an experimental programme composed of 75 fracture specimens considering three different moisture contents (0% (dry), 2% and 5%) with a 10 wt.% fibre content and varying the notch radius from 0 mm (crack-like defect) up to 2.0 mm. The analysis is based on the evolution of the apparent fracture toughness, showing a reduction on the notch effect when the moisture content increases. In addition, the predictions of the apparent fracture toughness obtained with the Theory of Critical Distances (TCD) are validated. The research is completed with an analysis of the evolution of fracture micromechanisms by using Scanning Electron Microscopy (SEM) fractographies when both moisture content and notch radius increase. It has been revealed a relation between this evolution and the apparent fracture toughness observations.

KEYWORDS: SGFR-PA6, notch effect, moisture content, Theory of Critical Distances.

1. INTRODUCCIÓN

Los componentes entallados presentan una tenacidad aparente mayor que la que tienen los componentes fisurados (ej., [1-7]). Así, al considerar las entallas como fisuras en las evaluaciones de integridad estructural, los resultados obtenidos podrían resultar excesivamente conservadores. Por ello, es necesario desarrollar metodologías que consideren la verdadera capacidad resistente de un componente entallado.

En la teoría de entallas existen dos criterios de fallo fundamentales: el criterio de fractura global y los criterios de fractura locales [1,2]. Los criterios locales basados en el campo de tensiones en el fondo de entalla,

tienen mayor aplicación que los globales [7]. Destacan el Método del Punto (PM, *Point Method*) y el Método de la Línea (LM, *Line Method*). Ambos métodos son metodologías de la Teoría de las Distancias Críticas (TDC), explicada en el siguiente punto.

Por otro lado, desde mediados del siglo XX, el uso de polímeros reforzados con fibras en aplicaciones de industria y construcción no ha dejado de crecer. La poliamida 6 reforzada con fibra de corta (SGFR-PA6, *short glass fibre reinforced polyamide 6*) es uno de los termoplásticos reforzados más utilizados. Durante el proceso de fabricación, por requerimientos del diseño o por las situaciones de sollicitación en uso, pueden aparecer concentraciones de tensiones que den lugar a

defectos, los cuales pueden ser entallados. La absorción de agua en poliamida 6 (PA6) depende de las condiciones ambientales, incrementándose con el aumento de la temperatura y de la humedad relativa [8]. Dado que en ciertas aplicaciones, el material puede estar sometido a condiciones de humedad ambiental alta, se ha de estudiar su influencia en el comportamiento a fractura.

1.1. Teoría de las Distancias Críticas

La Teoría de las Distancias Críticas (TDC) es un término utilizado para referirse de forma general a todos aquellos métodos de análisis que utilizan la mecánica de los medios continuos junto con una longitud característica del material, L , para predecir el efecto de las entallas y de otros defectos concentradores de tensiones en la fractura y fatiga de los materiales [7].

La TDC puede verse como una extensión de la Mecánica de la Fractura Elástica-Lineal (MFEL): así, mientras la MFEL necesita un parámetro resistente característico (la resistencia a fractura, K_{mat}), la TDC necesita dos: K_{mat} y L . La gran aportación de la TDC es que ha incrementado enormemente las aplicaciones de la MFEL, permitiendo hacer predicciones de cargas de rotura o de defectos máximos admisibles (por ejemplo) en componentes con entallas u otros concentradores de tensiones de geometría arbitraria para los que se pueda desarrollar un análisis elástico del campo de tensiones en los alrededores de los mismos (por ejemplo, mediante el uso de Elementos Finitos, EF).

El parámetro de longitud característico del material, L (distancia crítica), utilizado por la TDC se define como:

$$L = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{mat}}{\sigma_0} \right)^2 \quad (1)$$

donde σ_0 es un parámetro resistente del material, mayor que la tensión de rotura del material (σ_u), que se calcula experimentalmente y se denominada resistencia inherente. Así, L y σ_0 están relacionados a través de (la resistencia a fractura, K_{mat}). En el caso de materiales con un comportamiento totalmente lineal (incluso a nivel local), σ_0 es igual a σ_u .

Como ha sido comentado, en la TDC existen dos aproximaciones basadas en las tensiones existentes en el fondo de entalla [7]: el Método del Punto (PM) y el Método de la Línea (LM). Ambas son de sencilla aplicación y proporcionan resultados similares. En este trabajo se utiliza el LM ya que tiene en cuenta las tensiones a lo largo de una distancia y no sólo en un punto. Así, el LM supone que el fallo se produce cuando la tensión media a lo largo de una longitud ($2L$) desde el fondo del defecto, alcanza el valor de la resistencia inherente (σ_0) [7]:

$$\frac{1}{2L} \int_0^{2L} \sigma(r) dr = \sigma_0 \quad (2)$$

Uno de los aspectos más interesantes de la TDC es que permite analizar componentes entallados de una manera relativamente sencilla ya que reduce el análisis a fractura de un componente entallado a su equivalente fisurado con la única particularidad de considerar la tenacidad aparente a fractura del material entallado (K_{mat}^N) en vez de K_{mat} . Así, mediante el LM, K_{mat}^N se obtiene a partir de K_{mat} , L y el radio de entalla (ρ) [7]:

$$K_{mat}^N = K_{mat} \sqrt{1 + \frac{\rho}{4L}} \quad (3)$$

Este artículo presenta un análisis de la influencia de la humedad en la evolución de la tenacidad aparente a fractura en SGFR-PA6 en condiciones entalladas, así como su predicción a través del LM de la TDC. Además, se incluye un análisis de la influencia del contenido de humedad en la evolución de los micromecanismos de fractura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Material empleado

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó poliamida 6 reforzada (SGFR-PA6) con un 10 wt.% de fibra de vidrio corta. El monómero de la PA6 es uno de los grados comerciales más comunes para piezas moldeadas; se caracterizan por una dureza, resistencia y tenacidad elevadas, así como por una vida a fatiga y resistencia a la abrasión buenas [9]. Al reforzar la poliamida con fibras de vidrio cortas se consigue un aumento considerable en términos de resistencia, dureza, temperatura de servicio y resistencia a la abrasión, lo cual convierte a la SGFR-PA6 en un material con muy diversas aplicaciones. Asimismo, la PA6 se ha de utilizar con precaución en aquellas aplicaciones donde se espera la presencia de agua debido a su alta capacidad de absorción [9]. El agua dentro del material cambia sus propiedades mecánicas y sus dimensiones geométricas. Diversas publicaciones han estudiado los efectos de la humedad en las propiedades mecánicas de la SGFR-PA6 [8, 10-11].

2.2. Programa experimental

En este trabajo se estudian 3 contenidos de humedad: 0, 2 y 5%. En primer lugar, se fabricaron un total de 81 probetas de tracción mediante la técnica de moldeo por inyección, se secaron a 100°C y se obtuvo su peso inicial (W_0). A continuación, para aquellas probetas que requerían un contenido de humedad determinado se introdujeron en un baño de agua a 40°C. El agua absorbida se controló pensando las probetas de manera periódica hasta que alcanzaran el peso deseado (W_t). El contenido de humedad (H_c) sigue:

$$H_c(\%) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \cdot 100 \quad (4)$$

Se ensayaron 2 probetas a tracción por cada contenido de humedad estudiado (Figura 1a, según ASTM D638 [12]).

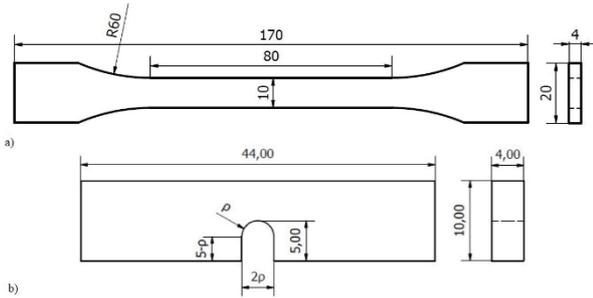


Figura 1. Geometría de las probetas (cotas en mm): a) tracción; b) SENB (ρ varía entre 0 y 2 mm).

La Tabla 1 recoge los resultados obtenidos y la Figura 2 muestra las curvas tensión deformación. Se observa un aumento de la ductilidad del material (e_{max}) y una reducción de su resistencia mecánica (σ_y y σ_u) y de su rigidez (E).

Tabla 1. Parámetros de tracción medios. E : Módulo de Young; $\sigma_{0.2}$: Límite elástico; σ_u : Tensión de rotura; e_{max} : deformación máxima en rotura.

Cont. Humedad (%)	E (GPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	e_{max} (%)
0	3.55	70.15	78.15	2.84
2	2.00	29.40	63.15	18.60
5	0.95	23.50	47.50	22.70

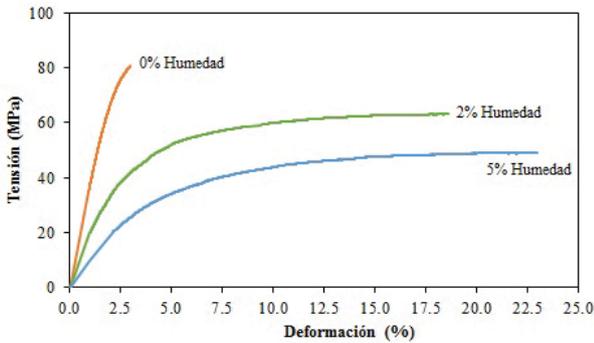


Figura 2. Influencia de la humedad en las propiedades mecánicas de SGFR-PA6 (10 wt.%).

Posteriormente se realizaron 75 ensayos en probetas entalladas tipo SENB (Figura 1b) según ASTM D5045 [13]. Las probetas se obtuvieron de la parte de central de las probetas de tracción descritas en la Figura 1a. Las entallas se realizaron perpendicularmente a la dirección longitudinal de las probetas y se obtuvieron por mecanizado, excepto aquellas de radio aproximadamente cero (fisuras) que fueron generadas con una cuchilla. Se llevaron a cabo cinco ensayos por cada combinación de radio de entalla y contenido de humedad. Hubo dos ensayos no válidos para un 5% de agua absorbida (radio

0 mm y 1 mm). La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos experimentalmente.

La Figura 3 muestra la influencia del contenido de humedad y del radio de entalla en el comportamiento a fractura del material ensayado.

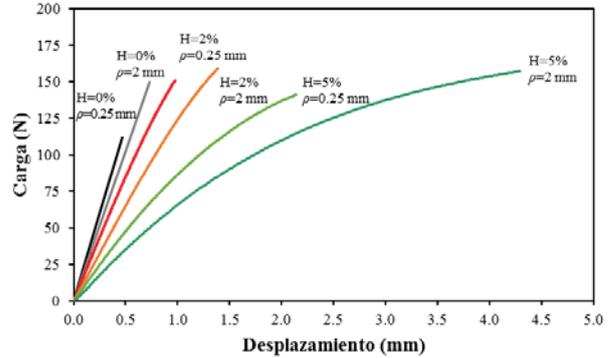


Figura 3. Curvas carga-desplazamiento. H: Contenido de humedad; ρ: radio de entalla.

Se observa cómo al aumentar tanto la humedad como el radio de entalla, el comportamiento a fractura comienza a ser no lineal. Por este motivo, la determinación de la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) en probetas entalladas se obtendrá a partir de la formulación para K_{Jc} [14,15]:

$$K_{mat}^N = \sqrt{\frac{E \cdot J^N}{(1 - \nu^2)}} \quad (5)$$

donde E es el módulo de Young, ν el coeficiente de poisson (0.38 para este material) y J^N se obtiene como la suma de sus componentes elástica y plástica [14,15]:

$$J^N = J_e^N + J_p^N = \frac{(K_e^N)^2 \cdot (1 - \nu^2)}{E} + \frac{2 \cdot A_{pl}}{B(W - a)} \quad (6)$$

K_e^N se obtiene a partir de la ecuación (7) para cada ensayo, siendo A_{pl} el área plástica bajo la curva carga-desplazamiento (Tabla 2), B es el espesor de la probeta, W es el canto y a la longitud del defecto (a igual a 5 mm excepto en probetas fisuradas cuyo valor se recoge en la Tabla 2).

$$K_e^N = \left(\frac{P_{max}}{BW^{1/2}}\right) 6 \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left(\frac{1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2.15 - 3.93 \left(\frac{a}{W}\right) + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right)}{\left(1 + 2 \left(\frac{a}{W}\right)\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \right) \quad (7)$$

El programa experimental se completa con un análisis de las superficies de fractura, para ello se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido (SEM, *Scanning Electro Microscopy*).

Tabla 2. Resultados experimentales en SGFR-PA6 (10 wt.%). a: longitud del defecto en probetas fisuradas; Pmax: carga máxima; ρ: radio de entalla; A_{pl}: área plástica.

Cont. Humedad (%)	ρ = 0 mm			ρ = 0.25 mm		ρ = 0.50 mm		ρ = 1.00 mm		ρ = 2.00 mm	
	a (mm)	P _{max} (N)	A _{pl} (Nmm)								
0 [4]	4.20	117.50	-	93.10	-	116.20	-	124.10	-	173.80	-
	4.25	107.20	-	105.20	-	102.10	-	116.50	-	166.70	-
	4.60	70.20	-	104.50	-	93.40	-	141.00	-	167.30	-
	4.60	76.70	-	87.80	-	111.10	-	125.00	-	146.40	-
	4.90	95.90	-	78.60	-	97.70	-	119.70	-	153.40	-
2	4.55	157.90	0.006	150.90	0.012	145.30	0.012	136.30	0.012	145.40	0.017
	4.40	160.70	0.006	143.00	0.006	161.40	0.015	150.20	0.013	146.00	0.020
	4.37	173.80	0.008	146.90	0.013	140.01	0.017	154.70	0.018	133.10	0.010
	4.38	161.10	0.005	139.50	0.009	136.10	0.009	159.00	0.022	159.30	0.018
	4.25	188.10	0.009	145.70	0.007	132.30	0.009	143.90	0.013	160.40	0.034
5	4.54	147.10	0.064	138.10	0.069	137.00	0.083	152.90	0.208	168.00	0.378
	4.35	161.70	0.070	134.60	0.045	152.90	0.130	154.90	0.200	139.60	0.107
	4.59	153.80	0.054	141.80	0.071	131.20	0.073	152.30	0.179	152.70	0.160
	4.61	164.00	0.104	140.40	0.086	124.10	0.044	148.50	0.140	156.70	0.255
	-	-	-	137.00	0.075	127.00	0.071	-	-	165.00	0.282

3. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN EL EFECTO ENTALLA Y PREDICCIÓN DE LA TENACIDAD CON LA TDC

La Figura 4 muestra los valores de la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) que se han obtenido para cada combinación de radio de entalla y contenido de humedad. Se observa que un aumento de la humedad supone materiales más resistentes a fractura.

Como se reportó en [4], en condiciones sin humedad (Figura 4a), el efecto entalla es notable, es decir, el aumento del radio de entalla supone un aumento del 100% de la capacidad resistente del material, es decir, el valor medio de K_{mat}^N en probetas con radio 2.00 mm es el doble que el obtenido en probetas fisuradas. Sin embargo, al aumentar el contenido de humedad, la evolución del efecto entalla no sigue una tendencia clara. Así, en el caso de un contenido de humedad del 2% (Figura 4b) el efecto entalla es mínimo para los radios de entalla analizados: hay un aumento del 15% de la capacidad resistente comparando los resultados experimentales medios obtenidos en probetas fisuradas frente aquellas con radio de entalla igual a 2 mm. Por el contrario, para el contenido de humedad más elevado estudiado (5%, Figura 4c), el aumento (comparando valores medios de probetas fisuradas frente a las del mayor radio de entalla) es del 45%. En este caso, se aprecia una clara dispersión de los resultados obtenidos. Esto se tratará de explicar en el siguiente apartado mediante el estudio de los micromecanismos de fractura presentes.

A continuación, se ha aplicado la Teoría de las Distancias Críticas para predecir la evolución de la tenacidad aparente a fractura en el material objeto de estudio. Se

utilizó el Método de la Línea [7]. En primer lugar, se obtuvo la distancia crítica, L , para cada contenido de humedad analizado mediante la ecuación (1), considerando que la resistencia inherente (σ_0) es igual a la tensión de rotura del material (σ_u , Tabla 1) y la resistencia a fractura (K_{mat}) como la resistencia a fractura media obtenida en probetas fisuradas (Tabla 3). Los valores de L se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del material.

Cont. Humedad (%)	K _{mat} (MPa·m ^{1/2})	L (mm)	L _{MA} (mm)	σ _{0,MA} (%)
0	2.13	0.238	0.168	93.01
2	3.91	1.218	1.288	61.41
5	4.51	2.867	0.450	119.86

Una vez se ha estimado L , se obtienen las predicciones de la tenacidad aparente a fractura (K_{mat}^N) mediante la ecuación (3) para cada combinación de contenido de humedad y radio de entalla. La Figura 4 muestra esta predicción. Se observa como para la situación seca y con un contenido de humedad del 2% (Figura 4a y b), esta predicción capta perfectamente la evolución de la capacidad resistente del material al aumentar el radio de entalla. Sin embargo, en el caso de un contenido de humedad del 5% (Figura 4c) no se ha obtenido una estimación precisa. Esto puede ser debido a que se ha aplicado el LM de la TDC a partir de una consideración elástico-lineal mientras que, para este contenido de humedad el comportamiento es claramente elasto-plástico tanto a tracción como a fractura (figuras 2 y 3, respectivamente). Por lo tanto, se obtendrán los parámetros calibrados de la TDC en este material para cada contenido de humedad estudiado.

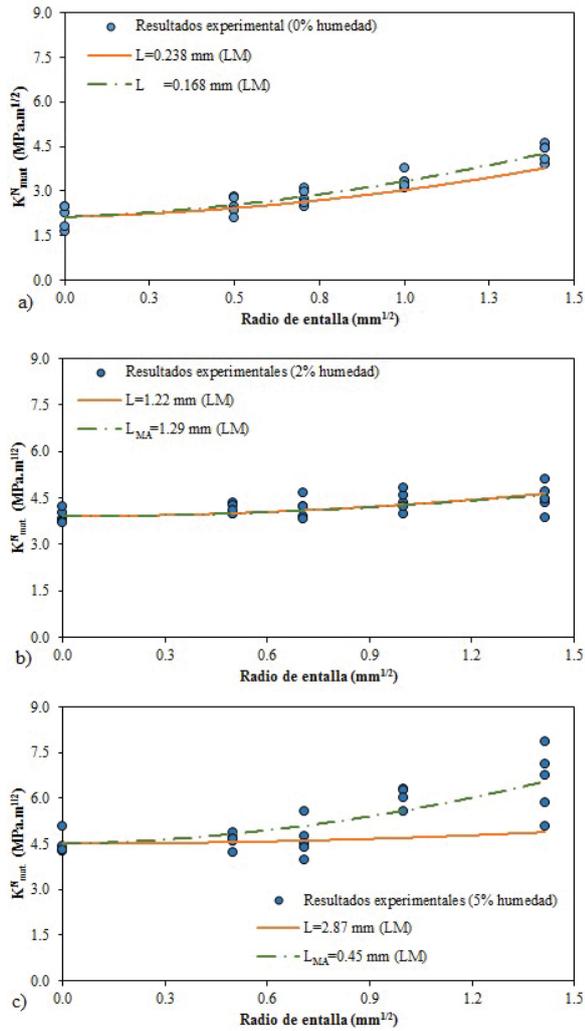


Figura 4. Efecto entalla y predicciones de la tenacidad aparente a fractura con el LM para cada contenido de humedad analizado: a) 0%; b) 2%; c) 5%. L : Distancia crítica con Ec. (1) y $\sigma_0=\sigma_u$; L_{MA} : Distancia crítica del mejor ajuste.

La Figura 4 muestra las curvas del mejor ajuste para realizar la citada calibración. Se han obtenido por el método de mínimos cuadrados obligando a la curva a tomar el valor medio de tenacidad a fractura (K_{mat}) obtenido en las probetas fisuradas ($\rho=0$) y se utilizó L como parámetro de ajuste. Así, se obtuvo la distancia crítica del mejor ajuste (L_{MA}) y, despejando en la ecuación (1), la resistencia inherente del mejor ajuste ($\sigma_{0,MA}$). Ambos valores se recogen en la Tabla 3.

En las figuras 4a y 4b, se observa cómo las estimaciones de K_{mat}^N obtenidas considerando o no el mejor ajuste son precisas, esto se debe a que para ambos contenidos de humedad L y L_{MA} , por un lado; y por otro lado, σ_0 y σ_u , tienen valores similares. Sin embargo, en el caso de un contenido de humedad del 5%, la estimación de K_{mat}^N sólo es precisa si se utilizan los parámetros calibrados de la TDC (L_{MA} y $\sigma_{0,MA}$) debido al comportamiento no lineal reportado.

4. INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LOS MICROMECHANISMOS DE FRACTURA

El análisis de los micromecanismos presentes en las superficies de fractura de las probetas ensayadas se ha llevado a cabo mediante el uso del Microscopio de Electrónico de Barrido (SEM).

La Figura 5 muestra la evolución de los micromecanismos de fractura al aumentar el contenido de humedad. Se observa cómo al aumentar el contenido de humedad los micromecanismos dejan de ser frágiles para dar lugar a procesos no lineales. Así, en la Figura 5c, con un contenido de humedad del 5%, se observa un claro desarrollo de procesos de fractura más dúctiles.

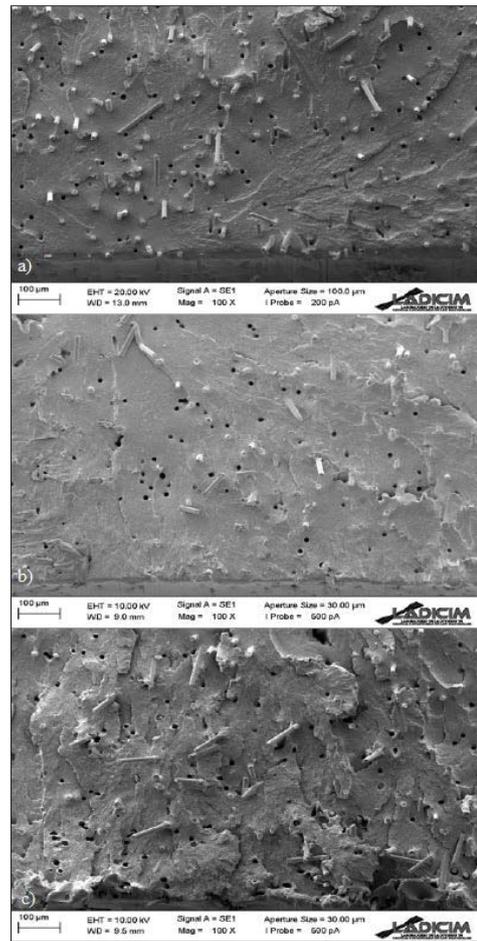


Figura 5. Comparación de las superficies de fractura al aumentar el contenido de humedad en SGFR-PA6 con 10 wt.% y $\rho=0.50$ mm. Humedad: a) 0%; b) 2%; c) 5%.

Por último, la Figura 6 muestra la superficie de fractura para la combinación del mayor contenido de humedad (5%) y radio de entalla más grande analizado (2.00 mm). La absorción de la humedad es irregular, observándose mayor plasticidad en el contorno superior de la superficie de fractura. Por lo tanto, la dispersión en el análisis a fractura podría estar relacionada con el hecho de que la absorción del agua no es homogénea.

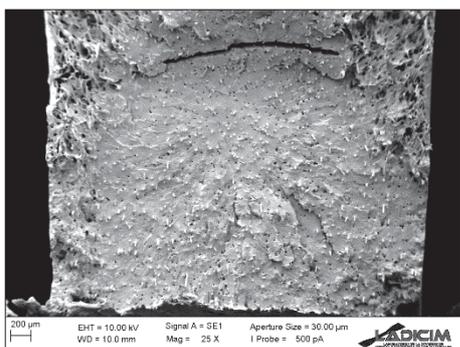


Figura 6. Superficie de fractura en SGFR-PA6 con 10 wt.%, $\rho=2.00$ mm y humedad del 5%.

5. CONCLUSIONES

Este artículo presenta el análisis de la influencia de la humedad en el comportamiento a fractura de SGFR-PA6 (10 wt.% de fibras) en 75 probetas SENB variando el radio de entalla (de 0 mm a 2.0 mm) y el contenido de humedad (0%, 2 % y 5%). Se ha observado cómo al aumentar el contenido de humedad se obtienen materiales más resistentes a fractura. Asimismo, la evolución del efecto entalla no sigue una tendencia clara, reduciéndose para un 2% de humedad, mientras que para un contenido de agua absorbida del 5% si hay efecto entalla así como una mayor dispersión en los resultados. Además, en condiciones secas y con un 2% de humedad se ha obtenido una estimación de manera sencilla y precisa de la tenacidad aparente a fractura con el Método de la Línea de la Teoría de las Distancias Críticas. En el caso de un 5% de humedad, debido al comportamiento elasto-plástico, se hace necesaria la calibración previa de los parámetros de la TDC para obtener estimaciones suficientemente precisas del efecto entalla.

Por otro lado, en el análisis fractográfico realizado con el SEM se ha observado la evolución de los micromecanismos de fractura al aumentar el contenido de humedad, siendo más dúctiles a medida que aumenta el contenido de humedad, y se ha observado una absorción de agua irregular para contenidos de humedad elevados, lo que explicaría la dispersión de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al MINECO del Gobierno de España por la financiación del proyecto MAT2014-58443-P, de cuyos resultados deriva este artículo.

REFERENCIAS

[1] AA Griffith, The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. R Soc. London. A* **221**, 163-198, 1920.

- [2] LS Niu, C. Chehimi, G. Pluvillage, Stress field near a large blunted V notch and application of the concept of notch stress intensity factor to the fracture of very brittle materials, *Eng Fract Mech*, **49**, 325-35, 1949.
- [3] M. Creager, C. Paris, Elastic field equations for blunt cracks with reference to stress corrosion cracking, *Int J Fract* **3**, 247-52, 1967.
- [4] F.T. Ibáñez-Gutiérrez, S. Cicero, I.A. Carrascal, Análisis del efecto entalla en poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio corta, *Anales de Mecánica de la Fractura* **33**, 201-206, 2016.
- [5] T. García, S. Cicero, V. Madrazo, Aplicación de la curva maestra a un acero S275JR en condiciones entalladas, *Anales de Mecánica de la Fractura* **32**, 587-592, 2015.
- [6] F.T. Ibáñez-Gutiérrez, S. Cicero, Fracture assessment of notched SGFR-PA6: An approach from failure assessment diagrams and the TDC, *Comp. Part B: Eng*, **111**, 124-133, 2017.
- [7] D. Taylor, The theory of critical distances: a new perspective in fracture mechanics, Elsevier, 2007.
- [8] R. Charles, R. Bauer. Moisture-related failure. *Eng. Plastics, Vol 2. Eng. Materials Handbook*, ASM International, Ohio, 1998.
- [9] JA. Brydson, *Plastics Materials*, 5th Edition, Guildford, Butterworth Heinemann, 1989.
- [10] D. Ferreño, I.A. Carrascal, E. Ruiz, J.A. Casado, Caracterización por medio de un modelo numérico de elementos finitos de la influencia de la humedad en las propiedades mecánicas y en fractura de la SGFR-PA6, *Anales de Mecánica de la Fractura*, **28**, 445-450, 2011.
- [11] I.A. Carrascal, J.A. Casado, J.A. Polanco, F. Gutiérrez-Solana, Efecto del contenido de humedad en la fluencia bajo cargas elevadas de la SGFR-PA6, *Anales de Mecánica de la Fractura*, **16**, 221-227, 1999.
- [12] ASTM D638-10, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *American Society of Testing and Materials*, Philadelphia, 2010.
- [13] ASTM D5045-99, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials, *American Society of Testing and Materials*, Philadelphia, 1999.
- [14] ASTM E 1820-11, Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 2011.
- [15] ASTM D6068-10, Standard Test Method for Determining J-R curves of Plastic Materials, *ASTM*, Philadelphia, 1999.