

# COMPORTAMIENTO A FRACTURA DE COMPOSITOS REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES

L. Távara<sup>\*a</sup>, A. Vega<sup>b</sup>, M.T. Aranda<sup>a</sup>, G. Moreno<sup>a</sup>, A. Castillo<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España

Persona de contacto: ltavara@us.es

<sup>b</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo

Avenida Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú

## RESUMEN

En la actualidad existe un interés creciente por el uso de fibras naturales (especialmente vegetales) como posible refuerzo de resinas termoplásticas y termoestables. Entre las ventajas del uso de este tipo de refuerzos podemos mencionar su naturaleza renovable como recurso, no tóxica y una resistencia mecánica media alta. Diversos estudios se han centrado en analizar las propiedades mecánicas de composites reforzados con diferentes tipos de fibras naturales. Sin embargo, el comportamiento de estos composites en presencia de grietas (comportamiento a fractura) no se ha analizado con tanta profundidad. El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento a fractura de este tipo de composites. Específicamente, se estudia el comportamiento de paneles de resina de poliéster reforzados con fibras de cabuya (agave americana) fabricados mediante moldeo por compresión. Las fibras usadas no tienen ningún tratamiento superficial y se extrajeron mediante un proceso manual. Se analiza el comportamiento de dos configuraciones de este tipo de composites: (a) reforzados con fibras largas (continuas) y (b) reforzados con fibras cortas. En cada tipo de configuración también se analiza la variación del porcentaje de fibra en el composite. La campaña experimental incluye probetas de flexión con entalla única (SENB) para analizar la tenacidad a la fractura. Los resultados obtenidos se comparan en términos de tenacidad a la fractura e identificación de los mecanismos de fallo durante el proceso de fractura. Este estudio pretende comprender en profundidad los fenómenos que tienen lugar a escala mesoscópica y que pueden justificar las diferencias en el comportamiento de fractura de las diferentes configuraciones analizadas.

**PALABRAS CLAVE:** Composites, fibras naturales, tenacidad a la fractura

## ABSTRACT

Nowadays, there is a growing interest in the use of natural fibres (especially vegetable fibres) as possible reinforcement for thermoplastic and thermoset resins. Among the advantages of using this type of reinforcement it can be mentioned its renewable nature as a resource, its non-toxic nature and its high average mechanical resistance. Several studies have focused on analysing the mechanical properties of composites reinforced with different types of natural fibres. However, the behaviour of these composites in the presence of cracks (fracture behaviour) has not been deeply analysed. The aim of this work is to analyse the fracture behaviour of this type of composites. Specifically, the behaviour of polyester resin panels reinforced with agave americana fibres manufactured by compression moulding is analysed. The fibres used have no surface treatment and were extracted by a manual process. The behaviour of two configurations of this type of composites is analysed: (a) reinforced with long fibres (continuous) and (b) reinforced with short fibres. For each type of configuration, the variation of the fibre percentage in the composite is also analysed. The experimental campaign includes single edge notched bending (SENB) specimens to analyse fracture toughness. The results obtained are compared in terms of fracture toughness and identification of the failure mechanisms during the fracture process. This study aims to understand the phenomena that take place at the mesoscopic scale and that can justify the differences in the fracture behaviour of the different configurations analysed.

**KEYWORDS:** Composites, natural fibres, fracture toughness

## 1. INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas, un número cada vez mayor de modelos de automóviles, primero en Europa, impulsados por la legislación gubernamental, y después en Norteamérica, vienen usando polímeros reforzados con fibras naturales en paneles de puertas, bandejas portaobjetos, soportes para sombreros, paneles de instrumentos,

cubiertas interiores de motores, parasoles, revestimientos de maleteros, filtros de aceite/aire, hasta llegar a componentes más exigentes desde el punto de vista estructural, como respaldos de asientos y paneles exteriores bajo el suelo. En la actualidad, todos los principales fabricantes internacionales de automóviles utilizan estos materiales y se espera que su uso aumente en este ámbito. Por todo ello, existe un rápido crecimiento de la investigación y la innovación en el área de los compuestos reforzados con

fibras naturales (NFC). El interés se debe a las ventajas de estos materiales en comparación con otros, como los compuestos de fibras sintéticas, entre las que destacan su bajo impacto ambiental y su bajo coste, y respaldan su potencial en una amplia gama de aplicaciones [1, 2].

Muchos trabajos se han centrado en el estudio de las propiedades mecánicas obtenidas con este tipo de composites. En [3], se analiza las propiedades mecánicas de composites reforzados con fibras de agave con y sin tratamiento bajo cargas de tracción y compresión. El efecto de la morfología de diferentes tipos de fibras naturales se correlaciona con las propiedades mecánicas a tracción en [4]. De manera similar en [5], se presentan diferentes propiedades mecánicas obtenidas en composites reforzados con diferentes tipos de fibras naturales. El análisis de diferentes superficies de rotura obtenidas en composites reforzados con fibras de agave en ensayos de tracción y flexión se presentan en [6].

Estudios recientes han arrojado resultados prometedores en la mejora de las propiedades mecánicas con la hibridación de fibras naturales como refuerzo. La hibridación puede incluir la mezcla de diferentes fibras naturales para mejorar su comportamiento a flexión y tracción [7]. Así como también la mezcla de fibras naturales con fibras sintéticas. En [8], se analizó diferentes secuencias de apilado que incluyeron fibras de sisal y fibras de vidrio sometidos a cargas de tracción y flexión. Otros estudios incluyen también la hibridación de fibras naturales (agave) con láminas metálicas como (aluminio y cobre) [9]. El comportamiento a impacto y fractura interlaminar se analiza para diferentes tipos de hibridación y los resultados se resumen en [10].

Sin embargo, el comportamiento de composites reforzados con fibras naturales en presencia de grietas (comportamiento a fractura) no se ha analizado con tanto detalle como sus propiedades mecánicas. Por ello, el objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento a fractura de este tipo de composites. En la sección 2, se detalla el proceso de obtención de las fibras de cabuya (agave americana), así como algunos detalles de la fabricación de los paneles de composite y las diferentes configuraciones analizadas. La definición de la probeta, así como detalles del ensayo de tenacidad a la fractura usado se presentan en la sección 3. Los resultados obtenidos se describen en la sección 4 y las conclusiones obtenidas son expuestas en la sección 5.

## **2. FABRICACIÓN DE COMPOSITES REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES**

En esta sección se describen los detalles para la obtención de los paneles de composite reforzados con fibras naturales.

### *2.1. Obtención y preparación de las fibras*

Las fibras vegetales utilizadas en la presente investigación se obtuvieron de las hojas de la especie denominada Cabuya (Agave americana), es una planta endémica del Perú, típica de las Yungas y vertientes occidentales andinas; en la sierra, crece desde los 1450 hasta los 3000 msnm, esta planta se desarrolla en las regiones costa, yunga y quechua. El proceso de extracción se inicia con la selección de las hojas, todas ellas extraídas de la misma zona geográfica (Distrito de Moche – La Libertad - Perú) y con similares edades. Posteriormente, las hojas fueron limpiadas y se cortaron ambos bordes de las mismas en aproximadamente 5 cm por lado. Después, las hojas se sumergieron en agua corriente durante 20 días, el ratio de agua usado fue de 3L/kg, pasado este tiempo el proceso de extracción de fibras fue por presión manual. Una vez obtenidas las fibras se procedió con el proceso de limpieza de las mismas, iniciando con la inmersión en una mezcla de agua/alcohol (1v:1v); se utilizó una relación solido/líquido de 100 g/500 mL, durante un tiempo de 45 minutos a 70°C. Pasado este tiempo las fibras se dejaron secar al aire libre por un periodo de 24 horas, para luego terminar el proceso de secado en estufa por un tiempo de 24 horas y 70°C. Las fibras secas se guardaron hasta su posterior uso en bolsas con cierre hermético. A fin de validar el proceso de extracción y limpieza de las fibras, se tomaron algunas muestras al azar con la finalidad de observar su aspecto superficial, y medidas del tamaño de la sección, para ello se usó el estereoscopio (Zeiss, modelo Stemi 508).

### *2.2. Proceso de fabricación: Moldeo por compresión*

Para la obtención de los paneles de composites se utilizó como matriz una de resina poliéster con nombre comercial en Perú Anypol – 100 (resina no saturada de uso general, de viscosidad media y reactividad media, especialmente diseñada para ser aplicada en el campo de plásticos reforzados). La proporción de mezcla para el curado de la misma fue el propuesto por la ficha técnica del fabricante y se detallan en la Tabla 1. El molde utilizado para la confección de los paneles de compuestos fue elaborado en acero ASTM A 36, con una cavidad interna de (200x150) mm; el proceso de conformado se realizó en una prensa manual, donde la presión de conformado fue constante (25 MPa durante 24 horas). Pasado este tiempo se procedió a desmoldar y dejar culminar el proceso de curado de la resina hasta por 72 horas a condiciones de presión y temperatura ambiente. Una vez terminado el tiempo de curado, los paneles fueron inspeccionadas visualmente a fin de determinar su uso en los procesos de caracterización propuestos, se tomó como criterio de selección la porosidad externa, descartando los paneles que presenten tamaños de poros igual o mayor a 3 mm.

Tabla 1: Datos de la resina usada en el proceso de curado

Proporción de mezcla de resina	
Resina	1.0 kg
Monómero de estireno	0.4 kg
Acelerador	0.01 kg
Catalizador	0.032 kg
Datos adicionales de la resina	
Densidad	1.16 - 1.19 g/cm <sup>3</sup>
Viscosidad	124 - 131 KU a 25°C (envasado)
Solubilidad	Estireno (40 % máx.)

### 2.3. Configuraciones analizadas

En el presente trabajo, se utilizaron como refuerzo de los paneles de composite las fibras vegetales (Cabuya) obtenidas. Las fibras se incluyeron tanto de forma continua, como de forma corta (con una longitud de 2 cm). La disposición de las fibras en los paneles con fibras continuas se realiza de manera unidireccional (todas las fibras orientadas en la misma dirección), mientras que en los paneles con fibras cortas, éstas se colocan de manera aleatoria. Adicionalmente, se fabricaron paneles con diferente porcentaje en peso de fibra. Todas las configuraciones analizadas se resumen en la Tabla 2. Se destaca que debido al proceso de fabricación usado, los paneles tienen espesores diferentes.

Tabla 2: Configuración de los paneles analizados

Panel	Tipo de fibra	% en peso	B (mm)
FCC-20	Corta	20	2.25
FCC-25	Corta	25	3.07
FCC-30	Corta	30	3.26
FLC-20	Continua	20	4.41
FLC-25	Continua	25	4.59
FLC-30	Continua	30	4.52

## 3. ENSAYO DE TENACIDAD A LA FRACTURA

La campaña experimental esta basada en probetas de flexión con entalla única (SENB) con el objetivo de obtener la tenacidad a la fractura.

### 3.1. Definición de la geometría y mecanizado de las probetas

Esta sección describe las consideraciones de diseño relativas a la definición y fabricación de probetas para estudiar la influencia sobre las propiedades de fractura asociadas a las diferentes configuraciones propuestas. Las probetas analizadas son del tipo SENB y se han definido acorde con la norma ASTM D5045-214 [11]. La probeta consiste en una viga rectangular con una entalla en uno

de los lados. La probeta tiene una longitud de  $L = 75$  mm y una altura igual a  $W = 10$  mm. El espesor  $B$  depende de cada panel y se detalla en la Tabla 2. La longitud de la grieta inicial se denota como  $a \approx 5$  mm. La grieta se genera usando una cuchilla, la longitud se define para que sea nominalmente igual a  $W/2$ . El montaje del ensayo incluye una distancia entre los ejes de los rodillos inferiores de  $S = 40$  mm. El diámetro de los rodillos es  $d = 4$  mm. Para el mecanizado de las probetas se uso un disco de corte y se obtuvieron 6 probetas para cada configuración analizada.

### 3.2. Ensayos. Curvas F-d

Los ensayos se realizan en una máquina de ensayos universal Instron 4482 y un utillaje para ensayos de flexión en 3 puntos. El desplazamiento se mide a lo largo de la dirección vertical mostrada en la Fig. 1 y la fuerza de reacción se mide utilizando una célula de carga de  $\pm 5$  kN. La velocidad de la cruceta (10 mm/min) se establece de acuerdo con [11]. La temperatura ambiente era óptima para dicha prueba, siendo alrededor de 20°C.

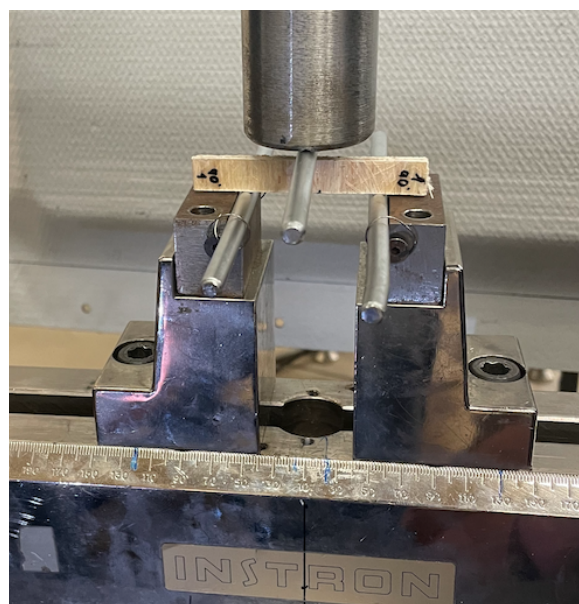


Figura 1: Montaje del ensayo a flexión con entalla única (SENB).

La norma ASTM D5045 [11] utiliza las curvas de carga frente a desplazamiento (ambos valores medidos en la cruceta) para analizar la tenacidad a la fractura. La norma utiliza  $P_Q$  o  $P_{max}$  para el cálculo de  $K_{Ic}$ . Donde  $P_Q$  es la carga correspondiente a la intersección de la curva carga-desplazamiento con una línea recta con una pendiente igual al 95 % de la parte inicial de la curva carga-desplazamiento, véase la Fig. 2. Según la norma, la curva carga-desplazamiento deben presentar una gran parte lineal seguida por un corto comportamiento no lineal previo a la propagación de la grieta. Por tanto,  $P_Q$  y  $P_{max}$  deben ser similares. No obstante, en el presente estudio,

las gráficas de carga vs desplazamiento, obtenidos para cada configuración analizada, muestran una gran parte no lineal, dando lugar a diferencias significativas entre  $P_Q$  y  $P_{max}$ .

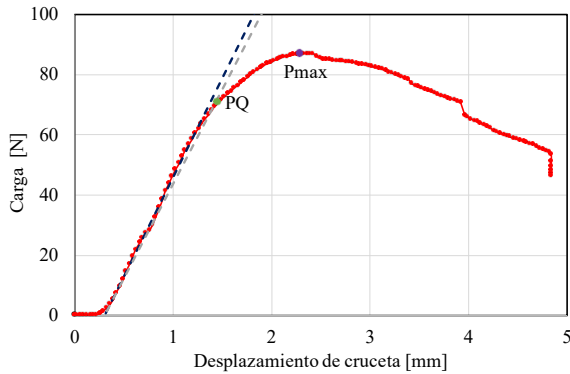


Figura 2: Curva carga vs. desplazamiento de una probeta obtenida del panel FLC-20 (refuerzo del 20 % con fibras largas).

En la Fig. 3, se muestra el detalle de una probeta con fibra continua rota, una vez finalizado el ensayo. Se destaca que en todas las configuraciones ensayadas, la grieta va creciendo de manera estable y no llega hasta el final de la probeta. Las probetas siempre quedan en una sola pieza, a diferencia de lo que ocurre en otros materiales donde un crecimiento de la grieta inestable hace que la probeta quede en dos piezas una vez finalizado el ensayo. Este comportamiento esta asociado a que las fibras naturales no se comportan de manera frágil.

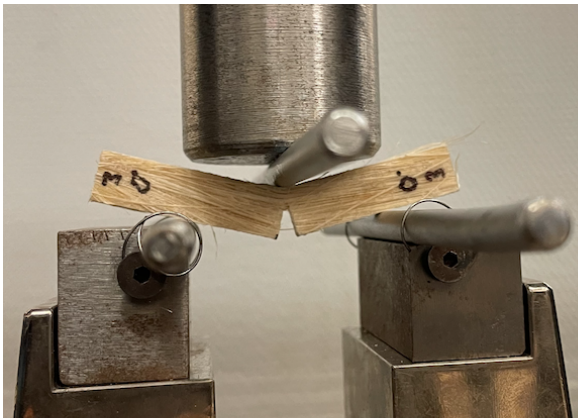


Figura 3: Detalle del fallo de una probeta con fibra continua

#### 4. ESTIMACIÓN DE LA TENACIDAD A LA FRAC-TURA

En el presente estudio,  $K_c^Q$  y  $K_c^{max}$  se definen como la tenacidad a la fractura obtenida utilizando  $P_Q$  y  $P_{max}$ , respectivamente, utilizando la ecuación (A1.1) en [11].

Hay que precisar que el objetivo es comparar el comportamiento en fractura en Modo I de las diferentes configuraciones analizadas más que obtener los valores de  $K_{Ic}$  mediante la norma.

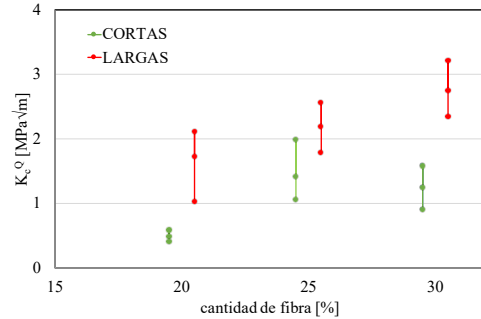


Figura 4: Tenacidad a la fractura obtenida usando los valores de  $P_Q$ .

En la Fig. 4, se muestra el resumen de los valores de  $K_c^Q$ . Los resultados muestran que las configuraciones que incluyen fibras continuas presentan una mayor tenacidad a la fractura que las configuraciones con fibras cortas. Este hecho puede deberse a que las fibras continuas están mayoritariamente alineadas en dirección perpendicular a la grieta. Mientras que las fibras cortas están orientadas de manera aleatoria. Por otra parte, los valores  $K_c^Q$  van aumentando cuando se aumenta el porcentaje de fibras en las probetas con fibras continuas. Sin embargo, es interesante observar que en la probetas con fibras cortas el valor mas alto de tenacidad se obtuvo con las probetas que incluyen un 25 % de fibras.

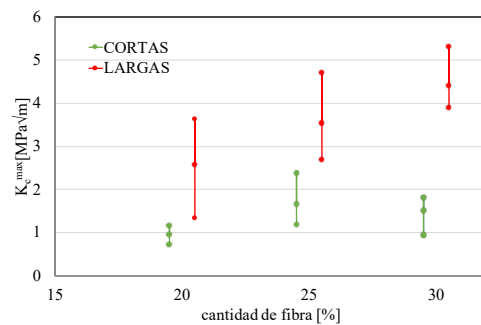


Figura 5: Tenacidad a la fractura obtenida usando los valores de  $P_{max}$ .

En la Fig. 5, se muestra el resumen de los valores de  $K_c^{max}$ . Las conclusiones en terminos de tenacidad a la fractura son similares a las obtenidas con  $K_c^Q$ . Se destaca que la dispersión obtenida para los valores de  $K_c^{max}$  son mayores que las dispersiones obtenidas con  $K_c^Q$ .

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se estudia la influencia de dos parámetros asociados al refuerzo de paneles de composite con fibras naturales. Específicamente se analiza el uso de fibras continuas y cortas de cabuya en el comportamiento a fractura de las probetas SENB fabricadas por moldeo por compresión, el estudio también incluye el efecto del porcentaje de fibras usado en cada una de estas configuraciones. Se adoptan tres porcentajes en peso de fibras 20 %, 25 % y 30 %. Todas las configuraciones se ensayan de la misma manera y se compara su respuesta a fractura. Se observa que las probetas que incluyen fibras continuas tienen siempre una tenacidad a la fractura superior a la de su homólogo con fibras cortas, lo que indica una mejora en la carga máxima admisible por una estructura en presencia de grietas. En el caso de las probetas con fibras continuas un mayor porcentaje de fibra se corresponde con un mayor valor de la tenacidad a la fractura. Sin embargo en el caso de las probetas con fibras cortas el valor máximo de tenacidad a la fractura se obtuvo con un porcentaje en peso de fibra del 25 %. Este hecho puede estar asociado a que las fibras continuas estaban alineadas perpendiculares a la grieta, mientras que las fibras cortas están orientadas de manera aleatoria.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha contado con el apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (Proyecto PID2021-123325OB-I00) y la Universidad Nacional de Trujillo, Perú, (Proyecto de Fondo Concursable CANON-2022: “Refuerzo ecológico a base de fibras de sansevieria trifasciata para matrices de poliéster y morteros de cemento alcalinos: Una alternativa amigable al medio ambiente y de impulso social”).

## REFERENCIAS

- [1] K.L. Pickering, M.G. Aruan Efendy, T.M. Le. (2016) A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Part A* 83, 98–112.
- [2] K.T. Lau, P.Y. Hung, M.H. Zhu, D. Hui. (2018) Properties of natural fibre composites for structural engineering applications. *Composites Part B* 136, 222–233.
- [3] K. Mylsamy, I. Rajendran. (2011) The mechanical properties, deformation and thermomechanical properties of alkali treated and untreated Agave continuous fibre reinforced epoxy composites. *Materials and Design* 32, 3076–3084.
- [4] M.E. Alves-Fidelis, T.V. Castro-Pereira, O.F. Martins-Gomes, F. de Andrade-Silva, R. D. Toledo-Filho. (2013) The effect of fiber morphology on the

tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology* 2(2), 149-157.

- [5] E. Sarikaya, H. Çallioğlu, H. Demirel. (2019) Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties. *Composites Part B* 167, 461–466.
- [6] J.S. Binoja, J.S. Bibin. (2019) Failure analysis of discarded Agave tequilana fiber polymer composites. *Engineering Failure Analysis* 95, 379–391.
- [7] G.A. Sivasankar, P. Arun Karthick, C. Boopathi, S. Brindha, R.J.T. Nirmalraj, A. Benham. (2023) Evaluation and comparison on mechanical properties of abaca and hemp fiber reinforced hybrid epoxy resin composites. *Materials Today: Proceedings*, 2214-7853.
- [8] S.C. Amico, C.C. Angrizani, M.L. Drummond. (2010) Influence of the Stacking Sequence on the Mechanical Properties of Glass/Sisal Hybrid Composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29:2, 179-189.
- [9] V. Navya Geethikaa, V. Durga Prasada Rao. (2017) Study of Tensile Strength of Agave Americana Fibre Reinforced Hybrid Composites. *Materials Today: Proceedings* 4, 7760–7769.
- [10] M. Muneer Ahmed, H.N. Dhakal, Z.Y. Zhang, A. Barouni, R. Zahari. (2021) Enhancement of impact toughness and damage behaviour of natural fibre reinforced composites and their hybrids through novel improvement techniques: A critical review. *Composite Structures* 259, 113496.
- [11] ASTM, (2014) ASTM-D5045-14, Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials.