

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES****EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS
TEXTILES****EFFECT OF THE FIBER DENSITY IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF
STITCHED FABRIC REINFORCED COMPOSITES MATERIALS**Ríos-Soberanis, Carlos Rolando¹Pacheco-Cardín, Mayra²Canto-Pinto, Jorge Carlos³Pérez-Pacheco, Emilio⁴**RESUMEN**

La relación entre la geometría del entramado y la densidad lineal de las fibras con los mecanismos de fractura bajo cargas de tensión ha sido investigada para materiales compuestos reforzados con textiles de fibra de vidrio (NCF) de configuración de $[-45^\circ, +45^\circ]$ y diferente densidad lineal basados en una matriz de resina epóxica curada con agente de curado a altas temperaturas. Dos textiles de diferente densidad lineal fueron empleados como refuerzo ($440 \pm 5\%$ and $227 \pm 5\%$ g/m²). El sistema polimérico empleado como matriz en este trabajo consistió en una resina epóxica bifuncional, diglycidyl ether de bisphenol A (DGEBA), curado con una amina tetrafuncional, diaminodiphenyl sulfona (DDS). Este sistema asegura la obtención de un material rígido con excelentes propiedades mecánicas a fin de lograr la observación y analizar e identificar el proceso y la progresión del daño generado así como los mecanismos de fractura que llevan al material a la falla total. El efecto de la arquitectura/geometría del textil y la diferencia de densidades fueron correlacionadas con el comportamiento mecánico identificándose sitios de concentración de esfuerzos y de inicio de los procesos de fractura al analizar los materiales en modo de tensión, flexión y ensayos de esfuerzos cortantes (losipescu).

PALABRAS CLAVES: Materiales Compuestos, Textiles, Caracterización Mecánica

Fecha de recepción: 06 de octubre, 2022.

Fecha de aceptación: 20 de octubre, 2022.

¹ Profesor Investigador Titular C, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C, Unidad de Materiales, rolando@cicy.mx .

² Profesora de Tiempo Completo, Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní, Ingeniería Industrial. mpacheco@itescam.edu.mx

³ Profesor de Tiempo Completo, Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní, Cuerpo Académico Bioprocesos. jccanto@itescam.edu.mx

⁴ Profesor de Tiempo Completo, Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní, Cuerpo Académico Bioprocesos. eperez@itescam.edu.mx * (autor de correspondencia)

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

ABSTRACT

The relationship between textile architecture and fiber density with the sequence damage under tensile loading has been investigated for a composite material reinforced with a glass non crimp fiber (NCF) textile of configuration $[-45^\circ, +45^\circ]$ based on epoxy resin matrix cured with high temperature hardener. Two textiles of different density were used ($440 \pm 5\%$ and $227 \pm 5\% \text{ g/m}^2$). The system chosen for this work consists of a bifunctional epoxy, diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA), cured with a tetrafunctional amine, diaminodiphenyl sulfone (DDS). This system ensures the obtaining of a rigid material with excellent mechanical properties in order to observe, analyze and identify the process and progress of the generated damage and the failure mechanism that leads to the materials fracture. The effect of the textile architecture/geometry and density were correlated to the composite mechanical behavior identifying sites of stress concentration and fracture processes by analyzing the material in tension, flexure and losipescu tests.

KEYWORDS: Composite materials, Textile, mechanical characterization.

INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos se han utilizado con éxito para aplicaciones estructurales, debido a sus ventajas estructurales de alta resistencia específica y rigidez para la realización de componentes estructurales de alto rendimiento y ligeros en aplicaciones aeronáuticas y de automoción (Ratna, Chongdar, & Chakraborty, 2004). Los primeros materiales compuestos son los compuestos unidireccionales, basados principalmente en materiales preimpregnados. Los materiales compuestos preimpregnados se caracterizan por su buena calidad y sus elevadas propiedades de rigidez y resistencia, pero adolecen de una corta vida de almacenamiento y de un elevado coste del material sin curar (Hallal, Younes, Fardoun, & Nehme, 2012). Los materiales compuestos textiles describen la amplia gama de materiales compuestos poliméricos con refuerzos textiles, de tejidos y no tejidos, que han demostrado excelentes propiedades mecánicas para la producción de productos de alta resistencia específica. De manera general, los materiales compuestos textiles se basan en prestaciones textiles fabricadas mediante moldeo líquido de materiales compuestos (LCM) de polímeros reforzados con fibras de alto rendimiento (Arredondo Bernal, 2017; Colorado, CHAVES ROLDÁN, & VÉLEZ, 2006). El cosido es el método más común de unión de preimpregnados compuestos y puede utilizarse para resolver una serie de importantes problemas de fabricación de compuestos, como la conexión de capas de tejido de refuerzo en la dirección del grosor, la creación de estructuras de refuerzo tridimensionales a partir de formas bidimensionales, y para proporcionar un medio de conexión a medida entre elementos compuestos y no compuestos en componentes multimateriales (Böhm, Gude, & Hufenbach, 2011; De Carvalho, Pinho, & Robinson, 2011; Kuo, Ko, & Chen, 2007). La flexibilidad del proceso de ejecución aplicado define la posible complejidad de la pieza, el éxito económico y, finalmente, la calidad del plástico reforzado con fibra (FRP) [8,9]. Recientemente, los tejidos multiaxiales de varias capas han atraído mucho la atención de la industria de los materiales compuestos (Colorado et al., 2006; Hallal et al., 2012; Scardino, 1989). La combinación de la colocación unidireccional de las fibras en las capas con la consolidación de la preforma mediante el cosido da lugar a una combinación muy ventajosa de las propiedades del material y el procesamiento. Esto da como resultado el uso completo del módulo y la resistencia de las fibras en una pieza lista y permite el uso del moldeo por transferencia de resina (RTM) para la producción. Las ventajas de este tipo de cosido a través del espesor incluyen no sólo la unión rentable de telas con una mayor facilidad de manejo del rendimiento en seco y la unión de estructuras compuestas con la posible sustitución de los sujetadores mecánicos, sino también una resistencia a la fractura interlaminar y a los daños por impacto potencialmente mejorada y la tolerancia de la pieza



**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES
 MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES**

compuesta final cuando se utilizan los hilos adecuados (Batch, Cumiskey, & Macosko, 2002; Gu, 2007).

JUSTIFICACIÓN

Los materiales compuestos de textiles describen la amplia gama de materiales compuestos poliméricos con refuerzos de este tipo de tejidos y no tejidos, que han demostrado excelentes propiedades mecánicas para la producción de productos de alta resistencia específica. Sin embargo, el efecto de la arquitectura/geometría del textil y la diferencia de densidades son importantes es por ello que en este trabajo se realizó la correlacionadas del comportamiento mecánico identificando los sitios de concentración de esfuerzos y de inicio de los procesos de fractura.

METODOLOGÍA

Materiales

Los materiales compuestos estudiados en esta investigación se fabricaron utilizando resina epoxi como matriz reforzada con textiles formados por fibra de vidrio tipo E. El sistema epoxi elegido estaba constituido por la resina D.E.R 331 de la empresa Dow que es una resina líquida de baja viscosidad y alto contenido en grupos epoxi. El endurecedor utilizado fue la 4,4'-diaminodifenilsulfona (DDS) de Aldrich que es una amina aromática con funcionalidad 4, peso molecular 248,3 gr/mol y punto de fusión de 175-177 °C. La DDS se utiliza habitualmente para procesos de reticulación a alta temperatura con el fin de obtener una alta fragilidad en el composite.

Tejidos de refuerzo: Los NCF utilizados en este estudio fueron fabricados por la industria italiana Nastrificio Gavazzi, con una masa por unidad de superficie de $440 \pm 5\%$ y $227 \pm 5\%$ g/m² respectivamente y una secuencia de apilado de $[-45^\circ, +45^\circ]$. Las tablas 1(a) y 1(b) resumen las características de estos tejidos. Las capas están cosidas entre sí con un hilo de unión de poliéster multifilm. Los haces de fibras unidireccionales en los dos planos se mantienen unidos por un fino hilo de poliéster en ambos lados. La figura 1 ilustra los dos tejidos multiaxiales de tipo 1 y 2.

<i>(a)</i>		
Layer orientation	Unit Mass g/m ²	Composition
+45°	217	E- Glass
-45°	217	E- Glass
Knit yarn	6	Polyester (PES)
Total	$440 \pm 5\%$	E- Glass

<i>(b)</i>		
Layer orientation	Unit Mass g/m ²	Composition
+45°	109	E- Glass
-45°	109	E- Glass
Threads of stabilization	4	E- Glass
Knit yarn	5	Polyester (PES)
Total	$227 \pm 5\%$	

Tabla 1. Textiles a) Alta densidad, b) Baja densidad.



EFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

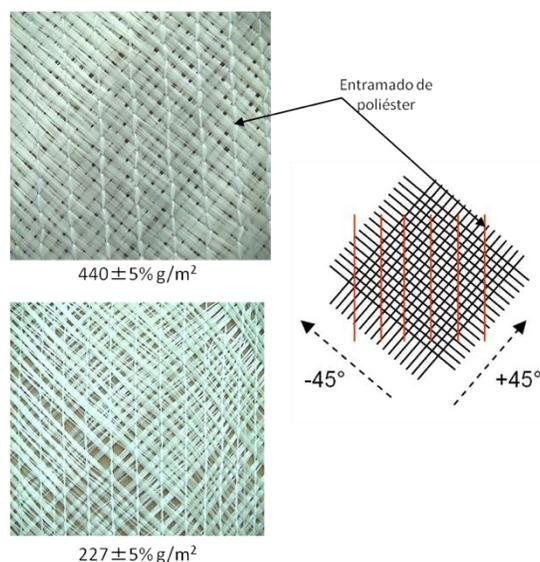


Figura 1. [-45°, +45°] tejido sin rizo (NCF).

Experimental

Preparación de materiales compuestos

Utilizando una capa de lámina de tejido sin arrugas y resina epoxi, se fabricaron composites con una fracción de volumen de fibra del 6,78% y del 3,63% respectivamente (calculada según el procedimiento ASTM D3171) mediante un proceso de colocación en húmedo. El sistema de resina se colocó en un molde y, a continuación, se colocó el tejido asegurando una completa difusión de la resina en los filamentos del tejido. El molde se introdujo en el horno para su curado a 140°C durante 8 horas. Transcurrido este tiempo, la lámina se enfrió hasta la temperatura ambiente y finalmente se retiró del horno para obtener las muestras para el ensayo mecánico.

Prueba de tracción

Las probetas para los ensayos de tracción se cortaron a un tamaño de 230 mm x 20 mm x 3 mm utilizando una fresa de banco de diamante de alta velocidad según la norma ASTM D3039-76. Se utilizó una máquina Shimadzu modelo AG-1 equipada con célula de carga de 5 KN. La velocidad de la cruceta fue de 0.5 mm/min.

Prueba de flexión

Las propiedades de flexión del composite se determinaron mediante una carga en tres puntos con un tamaño de muestra de 80 mm x 25 mm x 3 mm a una distancia libre de 60 mm. El ensayo se realizó en una máquina de ensayos Shimadzu modelo AG-1 a una velocidad de cruceta de 0,1

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

mm/min. Se registraron las curvas carga-deflexión. La resistencia a la flexión y el módulo de flexión del material compuesto se calcularon según la Ec. 1 y la Ec. 2, respectivamente.

$$\sigma = \frac{3FL}{2ba^2} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$E = \frac{mL^3}{4ba^3} \quad \text{Ec. (2)}$$

F denota la carga aplicada, L es la longitud de la galga o vano en los ensayos de flexión, a denota el espesor de la probeta, b denota la anchura de la probeta y m es la pendiente en la curva tensión-deformación.

Prueba de cizallamiento

El ensayo de cizallamiento de losipescu (figura 2) se investigó experimentalmente como medio para determinar el módulo de cizallamiento en el plano y la resistencia del material compuesto reforzado con textiles multiaxiales. El ensayo de cizallamiento de losipescu utiliza una probeta plana que es más fácil de fabricar y que consigue un estado de tensión de cizallamiento puro y uniforme en la región de ensayo. La norma ASTM D5379 prescribe muescas en V con un ángulo de apertura de 90° , mientras que el campo de tensión resultante en la región de prueba depende en gran medida de la anisotropía del material, una característica presente en muchos materiales compuestos. Por lo tanto, el rendimiento de la prueba depende tanto de las propiedades reales del material como de la orientación del material con respecto a la región de prueba.

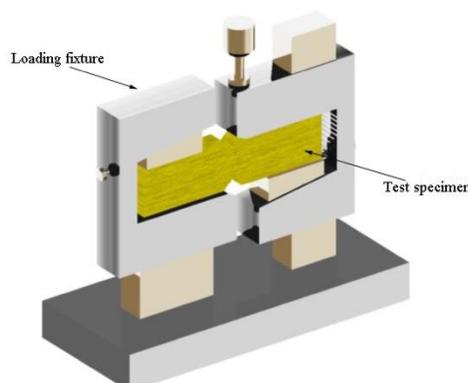


Figura 2. Prueba de esfuerzo cortante (losipescu).

Debido a una diferencia inusualmente pequeña en los índices de refracción óptica del sistema de la matriz y de las fibras de vidrio, las muestras obtenidas mostraron una extraordinaria transparencia, por lo que las grietas de la matriz, los huecos y las inclusiones pudieron detectarse fácilmente

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

mediante fotografía de luz transmitida. Las fibras de vidrio no pueden verse mientras que los hilos de unión permanecen visibles.

RESULTADOS

Todos los compuestos fabricados parecían tener una buena calidad y un acabado superficial homogéneos; las costuras del procedimiento no provocaron ningún efecto perjudicial ni en la procesabilidad ni en el aspecto general del producto. Se cortaron muestras de varias láminas con cada una de las dos direcciones de los planos (-45°, +45°) alineadas con la dirección de la carga para probar el efecto del hilo de punto de poliéster en el inicio y la propagación de los daños. La figura 3 muestra las orientaciones probadas para cada uno de los dos tipos de tejidos.

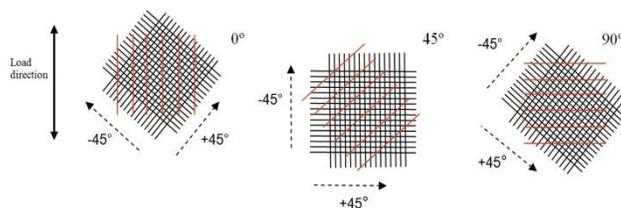


Figura 3. Orientaciones de los textiles.

En las figuras 4 y 5 se muestran las curvas típicas de tensión-deformación para laminados seleccionados en las direcciones 0°, 45° y 90° para los tipos 1 y 2. En la figura 4 se puede visualizar que, debido a la orientación de las fibras a la tensión aplicada, la dirección de 0° muestra una curva suave mientras que para 45° y 90° aparecen algunas discontinuidades o dentados debido a la mayor cantidad de fibras orientadas perpendicularmente a la tensión aplicada. Estas discontinuidades están íntimamente relacionadas con la aparición de grietas importantes antes de la fractura total de la muestra. Por otra parte, a 0° y 45° se presentaron valores más altos para el módulo elástico debido al efecto del refuerzo de las fibras paralelo a la tensión aplicada. Estos resultados son similares a los comunicados por Wang (2002) [11] y Wan, Wang, Luo, Dong, and Cheng (2001).

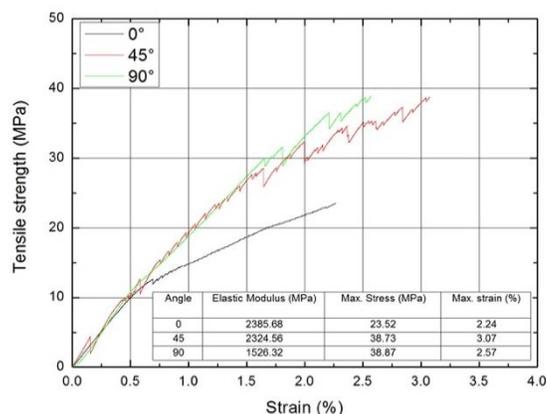


Figura 4. Tejido de mayor densidad (440±5% g/m²) en modo de tensión.



EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

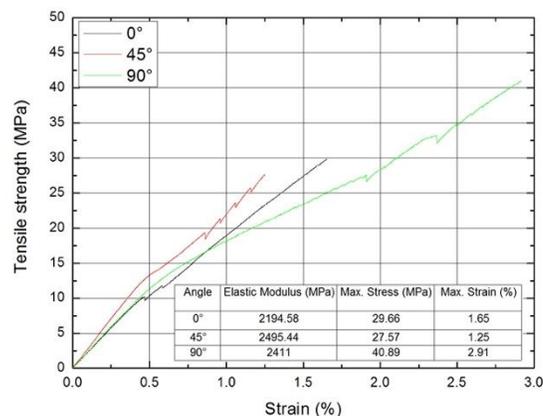


Figura 5. Tejido de menor densidad ($227\pm 5\%$ g/m^2) en modo de tensión.

La figura 5 muestra las curvas típicas de tensión-deformación del textil 2. En este caso, 0° , 45° y 90° no mostraron caídas distintivas relacionadas con el desarrollo del daño debido a la repentina fractura cuando apareció la primera grieta significativa. Sólo algunas muestras a 45° mostraron cierto desarrollo de grietas a lo largo de las muestras. El sistema de resina parece dominar los parámetros mecánicos. Un comportamiento similar fue comunicado por Kim et al. Kim, Pourdeyhimi, Abhiraman, and Desai (2000). La figura 6 presenta el desarrollo del daño en las muestras para cada textil.

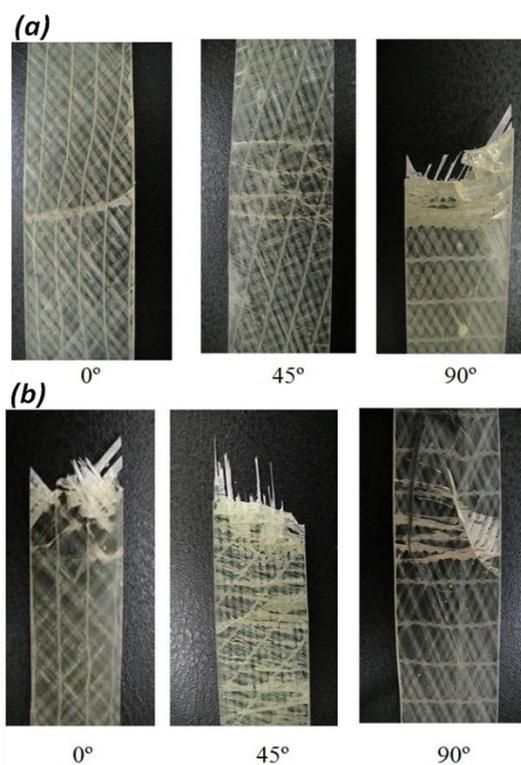


Figura 6. Secuencia de daños en tensión a) Alta densidad, b) Baja densidad.

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

La secuencia de daños y las propiedades mecánicas caracterizadas por el ensayo de losipescu no se vieron afectadas por la orientación de las fibras sino por la densidad de estas. Todas las muestras reforzadas con ambos textiles se fracturaron en el centro, entre las muescas, en las zonas de concentración de tensiones según la técnica ASTM D5379. La figura 7 muestra las muestras fracturadas por el ensayo losipescu en las que es posible visualizar la grieta principal sin daños adicionales en los laterales.

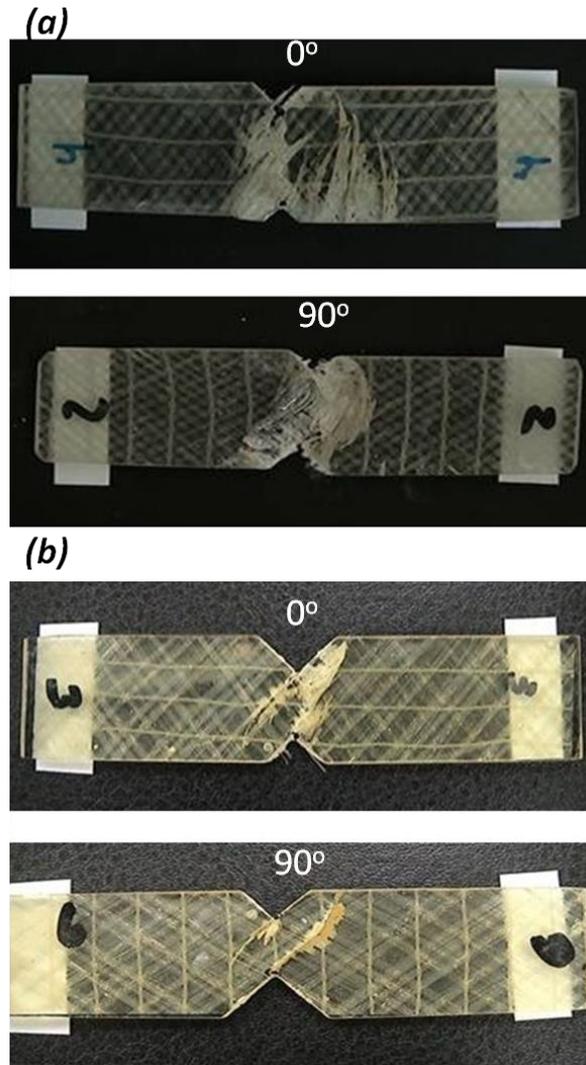


Figura 7. Daño por tensión de cizallamiento a) Alta densidad, b) Baja densidad.

La figura 8 muestra el efecto de la densidad de los textiles mostrando valores más altos de los parámetros mecánicos cuando se refuerza con el textil 1 ($440 \pm 5\%$), aunque la diferencia no es excesivamente significativa.

Los resultados de la tensión de cizallamiento muestran una tendencia similar a los resultados del ensayo de flexión. Las muestras fabricadas en el textil 1, muestran un mayor esfuerzo de cizallamiento en la

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

dirección de carga de 90° mientras que la muestra fabricada en el textil 2 muestra un mayor esfuerzo de cizallamiento en la dirección de carga de 0°.

Siguiendo la tendencia de los resultados de flexión, la baja magnitud del esfuerzo de cizallamiento puede explicarse en parte por la baja fracción de volumen de fibra (V_f) de las muestras ensayadas. Los trabajos publicados (Beier et al., 2007; Mahadik, Brown, & Hallett, 2010; Ravi, Iyengar, Kishore, & Shukla, 2000; Van Paepegem & Degrieck, 2001) han mostrado un esfuerzo de cizallamiento de alrededor de 60 MPa a una V_f del 65%.

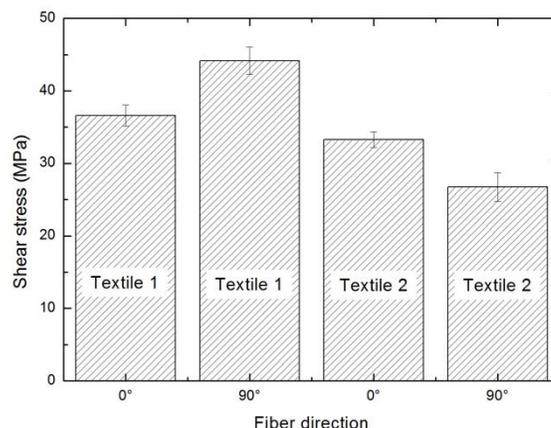


Figura 8. Daños por tensión de cizallamiento en los materiales compuestos reforzados con textiles de alta y baja densidad.

REFUERZO	ESFUERZO MÁXIMO (MPa)	DEFORMACIÓN MÁXIMA (%)	MÓDULO (MPa)
<i>Textil 1 0°</i>	36.60	9.64	272.66
<i>Textil 1 90°</i>	44.14	13.45	321.82
<i>Textil 2 0°</i>	33.28	9.47	352.66
<i>Textil 2 90°</i>	26.75	8.67	342.69

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales compuestos reforzados con textiles

Las resistencias a la flexión de todos los laminados ensayados son significativamente mayores que sus resistencias a la tracción, una tendencia similar a la comunicada para los laminados preimpregnados (Böhm, Gude, & Hufenbach, 2010; Böhm et al., 2011; Marsden, Boniface, Ogin, & Smith). Los resultados de la carga-deflexión a la flexión se muestran en las figuras 9 y 10. Todos los laminados ensayados a lo largo de la dirección de la fibra muestran un fallo frágil, generalmente por delaminación de la capa exterior en una superficie de tracción. La zona de delaminación comienza en el centro de la probeta, donde el momento de flexión es máximo, y luego se propaga hacia el exterior hasta que se produce una ruptura significativa de las fibras en la sección media de la superficie de tracción. Por el contrario, los laminados con todas las fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ respecto a la dirección de la longitud de la probeta



EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

muestran un fallo dúctil. La delaminación a lo largo de los filamentos de las fibras puede observarse también en la superficie de tracción. Se alcanza una gran deflexión antes de que se produzca el fallo final con rotura de las fibras. Wen and Yazdani (2008) han informado de que cerca de la superficie, en las probetas orientadas a $\pm 45^\circ$ de tracción, se produce una reducción tanto de la estiramiento como de la resistencia. También se observó este comportamiento.

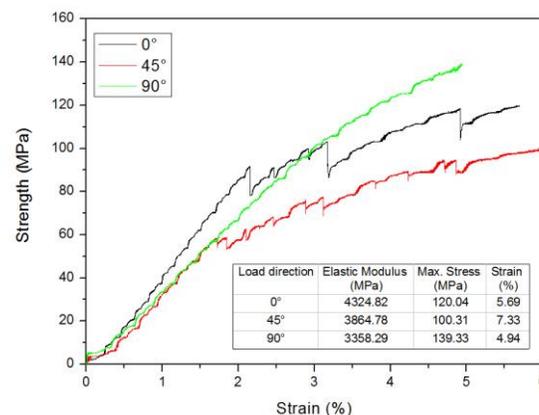


Figura 9. Tejido de mayor densidad ($440 \pm 5\% \text{ g/m}^2$) en modo de flexión.

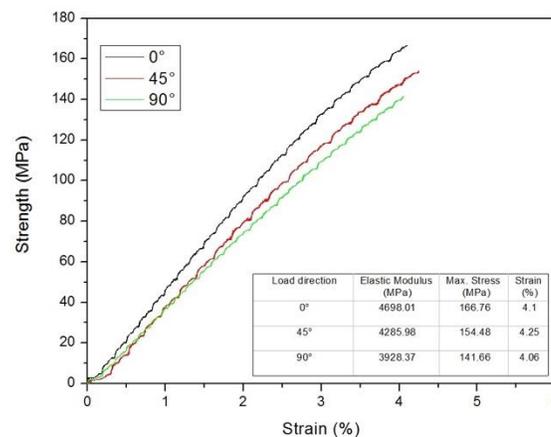


Figura 10. Tejido de menor densidad ($227 \pm 5\% \text{ g/m}^2$) en modo de flexión.

CONCLUSIONES

Se logró la fabricación y caracterización mecánica de composites reforzados con textiles formados por esteras y tejidos que emplean resina epoxi como matriz. El composite reforzado con esterilla presentó una fractura repentina y catastrófica cuando apareció la primera señal significativa de daño sin mostrar un fallo progresivo previo a lo largo de la muestra; este comportamiento se debió a la orientación aleatoria de las fibras continuas que no siguen un patrón de agrietamiento definido. Se comprobó que el fallo se inicia como una deslaminación de la fibra/matriz en aquellos filamentos que

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES

son perpendiculares a la dirección de carga. Las grietas principales se desarrollan rápidamente ya que no hay ninguna fibra orientada que lo impida. Finalmente, el material se fractura repentinamente en el mismo lugar donde se inició la grieta principal. No se encontraron pruebas de que la arquitectura textil de la estera afecte directamente al crecimiento de las grietas a lo largo de la muestra, ya que las curvas de tensión frente a la deformación no presentaban discontinuidades como una interpretación adicional del progreso del daño en el material compuesto. Por otro lado, la arquitectura textil tejida influye en la progresión del daño cuando las fibras están orientadas en paralelo a la dirección de carga (0° y 90°) pero no cuando están orientadas a 45° . El composite reforzado con tejido puede definirse como un material cuasi-isotrópico que presenta varios grados de anisotropía. Este comportamiento depende de la dirección del eje de carga en relación con la orientación de las fibras. En los materiales orientados en las direcciones de *urdimbre* y *trama* (0° y 90° respectivamente) las grietas se iniciaron en la interfaz fibra/matriz en los extremos de las muestras y se desarrollaron transversalmente. La progresión del patrón de daños se pudo observar debido a que los haces de fibras estaban orientados en la dirección de la carga. Se identificaron lugares de iniciación en las zonas extremas de los haces (región de ondulación) y también en el centro. Para este composite, la arquitectura textil tejida afecta a la forma en que se desarrollan las grietas, influida por la orientación de la geometría de las fibras en relación con el eje de la carga aplicada. Es imprescindible señalar que el empleo de un agente de curado a alta temperatura (DDS) favoreció la obtención de un sistema epoxi rígido que permite la observación del desarrollo del daño y de la secuencia de agrietamiento debido a la transparencia natural de la resina epoxi. Cada grieta desarrollada se relacionó con las fibras textiles de acuerdo con su arquitectura (entretelado).

Agradecimientos Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento mediante el proyecto 10294.21-PD y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la concesión de la beca 60204/ CM0042.

REFERENCIAS

- Arredondo Bernal, J. E. (2017). *Elaboración y caracterización de materiales compuestos basados en óxido de circonio estabilizados con cerio y calcio*. Universitat Politècnica de Catalunya,
- Batch, G. L., Cumiskey, S., & Macosko, C. W. (2002). Compaction of fiber reinforcements. *Polymer Composites*, 23(3), 307-318. doi:<https://doi.org/10.1002/pc.10433>
- Beier, U., Fischer, F., Sandler, J. K. W., Altstädt, V., Weimer, C., & Buchs, W. (2007). Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1655-1663. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.007>
- Böhm, R., Gude, M., & Hufenbach, W. (2010). A phenomenologically based damage model for textile composites with crimped reinforcement. *Composites Science and Technology*, 70(1), 81-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.008>
- Böhm, R., Gude, M., & Hufenbach, W. (2011). A phenomenologically based damage model for 2D and 3D-textile composites with non-crimp reinforcement. *Materials & Design*, 32(5), 2532-2544. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.01.049>

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE FIBRAS EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS TEXTILES**

- Colorado, H. A., CHAVES ROLDÁN, C., & VÉLEZ, J. (2006). Fricción interna y comportamiento anelástico en sólidos. *Dyna*, 73(148), 39-49.
- De Carvalho, N. V., Pinho, S. T., & Robinson, P. (2011). An experimental study of failure initiation and propagation in 2D woven composites under compression. *Composites Science and Technology*, 71(10), 1316-1325. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.04.019>
- Gu, H. (2007). Tensile behaviours of woven fabrics and laminates. *Materials & Design*, 28(2), 704-707. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2005.07.006>
- Hallal, A., Younes, R., Fardoun, F., & Nehme, S. (2012). Improved analytical model to predict the effective elastic properties of 2.5D interlock woven fabrics composite. *Composite Structures*, 94(10), 3009-3028. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.03.019>
- Kim, H. S., Pourdeyhimi, B., Abhiraman, A., & Desai, P. (2000). Characterization of structural changes in nonwoven fabrics during load-deformation experiments. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 1(1), 1-6.
- Kuo, W.-S., Ko, T.-H., & Chen, C.-P. (2007). Effect of weaving processes on compressive behavior of 3D woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 555-565. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.02.025>
- Mahadik, Y., Brown, K. A. R., & Hallett, S. R. (2010). Characterisation of 3D woven composite internal architecture and effect of compaction. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 872-880. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.02.019>
- Marsden, W., Boniface, L., Ogin, S., & Smith, P. Quantifying Damage in Woven Glass Fibre/Epoxy Laminates. *Proceedings FRC*, 94, 31.
- Ratna, D., Chongdar, T. K., & Chakraborty, B. C. (2004). Mechanical characterization of new glass fiber reinforced epoxy composites. *Polymer Composites*, 25(2), 165-171. doi:<https://doi.org/10.1002/pc.20013>
- Ravi, S., Iyengar, N. G. R., Kishore, N. N., & Shukla, A. (2000). Influence of fiber volume fraction on dynamic damage in woven glass fabric composites: An experimental study. *Advanced Composite Materials*, 9(4), 319-334. doi:10.1163/15685510052000138
- Scardino, F. (1989). An Introduction to Textile Structures and Their Behavior. Textile Structural Composites, Composite Materials series Vol. 3, eds. Chou TW and Ko FK. In: Elsevier.
- Van Paepegem, W., & Degrieck, J. (2001). Fatigue degradation modelling of plain woven glass/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(10), 1433-1441. doi:[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00042-2)
- Wan, Y. Z., Wang, Y. L., Luo, H. L., Dong, X. H., & Cheng, G. X. (2001). Comparison of mechanical performance and fracture behavior of gelatin composites reinforced with carbon fibers of different fiber architectures. *Polymer Composites*, 22(1), 111-117. doi:<https://doi.org/10.1002/pc.10523>
- Wang, Y. (2002). Mechanical Properties of Stitched Multiaxial Fabric Reinforced Composites From Manual Layup Process. *Applied Composite Materials*, 9(2), 81-97. doi:10.1023/A:1013881422106
- Wen, C., & Yazdani, S. (2008). Anisotropic damage model for woven fabric composites during tension-tension fatigue. *Composite Structures*, 82(1), 127-131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.01.003>