

DETECCIÓN DEL DAÑO Y MECANISMOS DE FRACTURA DE UN MATERIAL COMPUESTO REFORZADO CON TEXTILES DE ARQUITECTURA DEFINIDA

*G. Cruz-Santos, J. Rodriguez-Laviada y C.R. Rios-Soberanis**

**Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Materiales
Calle 43, No. 130, Colonia Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200
Mérida, Yucatán, México*

Abstract - Entre las conformaciones de textiles mas empleadas como refuerzo de materiales compuestos se encuentran los tejidos denominados petatillo (woven) y las colchonetas (mat). En muchas técnicas de procesos y aplicaciones, los refuerzos de fibra continua son preferidos a los de fibra corta debido a que los primeros ofrecen la posibilidad de predisponer las fibras en una orientación determinada. En este proyecto de investigación, la metodología se enfoca en la optimización del proceso de manufactura y la caracterización mecánica de un material compuesto consistente en la resina termofija (epóxica) empleando un agente de curado de alta temperatura (4,4, Diamino difenil sulfona) y el textil de refuerzo. Este sistema asegura la obtención de un material lo suficientemente rígido y transparente para observar, analizar e identificar los procesos y progreso del daño generado y los mecanismos de fractura que conllevan a la falla total del material. A través de la identificación de los sitios activos formadores de grietas y la subsiguiente coalescencia de las mismas es posible correlacionar el deterioro del material con la geometría del entramado y su efecto en el comportamiento mecánico. Se presentan resultados de composites reforzados con textil tipo petatillo y tipo colchoneta.

Introducción

Aunque el empleo de los textiles se ha incrementado incluso mas allá de su uso cotidiano en la industria del vestido a niveles de funcionar como refuerzos en materiales compuestos debido a sus propiedades únicas, el entendimiento de su comportamiento mecánico es aún muy limitado. Los textiles son medios típicamente porosos y pueden ser tratados como una mezcla de fibras y aire el cual no tiene limites definidos y diferentes de una continuidad clásica. Tampoco son homogéneos ni isotrópicos¹, i.e. sus propiedades son muy susceptibles de la dirección de la carga aplicada. Por lo tanto el análisis teórico del comportamiento mecánico de los textiles se convierte en un tema muy complejo y las verificaciones experimentales de predicciones teóricas son más críticas que para otros materiales. Así mismo, una investigación considerable ha sido dirigida al entendimiento del comportamiento de materiales compuestos elaborados con fibras textiles en un intento de éstos por adquirir una mayor aceptación industrial^{1,2,3}. A través de los años, la industria manufacturera de textiles ha desarrollado la habilidad de producir tejidos utilizando técnicas automatizadas tales como los de punto (knitting), entrelazados (woven), y braiding. En la manufactura de las preformas para materiales compuestos avanzados, la tecnología textil ha estado bajo intensos estudios^{4,5} debido al potencial de estos materiales para producir estructuras de alta calidad a bajo costo con un mejoramiento en las propiedades mecánicas en situaciones de esfuerzo multiaxial además de su particular importancia para la manufactura de materiales compuestos con formas complejas tridimensionales debido a que las estructuras con estas formas complicadas pueden ser muy difíciles y costosas de producir utilizando tecnologías estándares. Este trabajo pretende discutir varios aspectos del desarrollo del comportamiento mecánico en materiales compuesto reforzados con textiles de diferente arquitectura donde se observa una relación íntima entre la arquitectura y geometría del tejido con el desarrollo y propagación del daño causado bajo esfuerzos externos.

Sección experimental

Los materiales empleados en esta investigación fueron composites manufacturados con resina epóxica reforzados con textiles de fibra de vidrio tipo E. El sistema epóxico es constituido por resina epóxica D.E.R 331 de Dow Company, la cual es una resina líquida, de baja viscosidad y alto contenido de grupos epóxicos, el agente endurecedor fue la amina DDS (4,4, Diamino difenil sulfona) de la compañía Aldrich, la cual es una amina aromática de funcionalidad 4 con peso molecular 248.3 gr/mol y punto de fusión de 175-177° C. Se emplea para procesos a altas temperaturas con el objeto de obtener una alta rigidez en el material compuesto final. Dos tipos de tejidos con diferente arquitectura fueron empleados como refuerzos. El primero consistió en un tejido tipo colchoneta (mat) cuya geometría de entramado esta completamente al azar con fibras de aproximadamente 15 cm de longitud en promedio. El segundo tejido consistió en un textil tipo petatillo (woven) de arquitectura simple 1x1 (plain wave) el cual es identificado por sus dos direcciones principales: *warp* y *weft*. Es muy importante hacer notar que el sentido *warp* se refiere a lo largo del textil (0°) y el sentido *weft* al ancho (90°). La figura 1a presenta una fotografía del textil original donde es posible identificar las dos principales direcciones. Así mismo es importante remarcar que en 20 mm² del entramado se encuentran 6 mechas en dirección *warp* y 3 mechas en dirección *weft*. La figura 1b exhibe los parámetros que caracterizan la región de las ondulaciones en ambas direcciones, zona de gran importancia de estudio ya que estas mantienen un efecto directo sobre la diferencia de las propiedades mecánicas entre textiles con entramado ondulatorio y los que no poseen esta geometría. Los dibujos representan la sección transversal en un plano perpendicular a la dirección adscrita.

El proceso de manufactura de los laminados se realizó empleando el apilamiento en húmedo (wet lay up) el cual consiste en agregar la resina al textil de refuerzo procurando la humectación total del mismo para posteriormente colocar el molde dentro de una estufa de convección para llevar al cabo el proceso de curado a una temperatura de 140°C por 8 horas y dejarse enfriar a temperatura ambiente dentro del mismo horno lentamente para evitar posibles microfracturas debido al choque térmico que pudiesen sufrir debido a un cambio brusco de temperatura. Finalmente el molde se extrae de la estufa y se obtiene la lámina de donde se cortaron las probetas para el ensayo mecánico. La fracción volumétrica (V_f) fue obtenida utilizando la técnica de calcinación de la matriz polimérica dentro de una mufla a 600°C durante 2 horas. Las probetas fueron sometidas a pruebas de tensión en la máquina universal de pruebas Shimadzu usando una celda de carga de 5 KN y una velocidad del cabezal 0.5 mm/min.

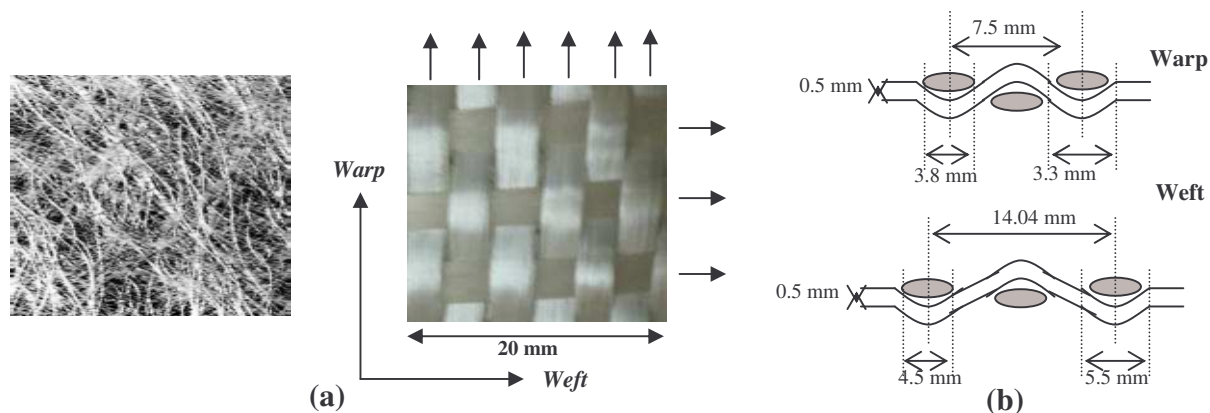


Figura 1.- Arquitectura de los textiles: (a) tipo colchoneta y petatillo, (b) dimensiones de las ondulaciones.

Resultados y discusión

La figura 2 presenta las curvas típicas de esfuerzo vs. deformación de la resina, mientras que la tabla 1 exhibe los valores numéricos de los parámetros mecánicos.

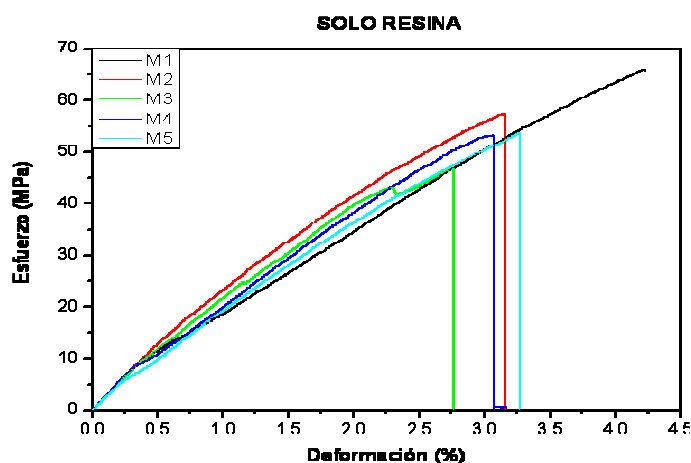


Figura 2.- Curvas de esfuerzo vs deformación.

Resina	Elastic	Max Stress	Max Strain
Unidades	MPa	MPa	%
M1	2754.15	66.9711	4.22769
M2	2632.13	57.4237	3.14692
M3	2557.22	46.7229	2.75615
M4	2674.14	53.2819	3.06154
M5	2501.78	53.7416	3.26731
PROMEDIOS	2623.664	55.62824	3.281922

Tabla 1.- valores de los parámetros mecánicos

Las pruebas de impacto arrojaron resultados sobre la rigidez de la resina los cuales pueden observarse en la tabla 2. La prueba se realizó para muestras con muesca y sin muesca, esto con el objeto de observar el comportamiento de la fractura quebradiza y dúctil.

Con muesca		
Muestra	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KJ/m ²)
1	0.16	3.3
2	0.12	1.8
3	0.07	1.2
4	0.06	1.0
5	0.05	1.0

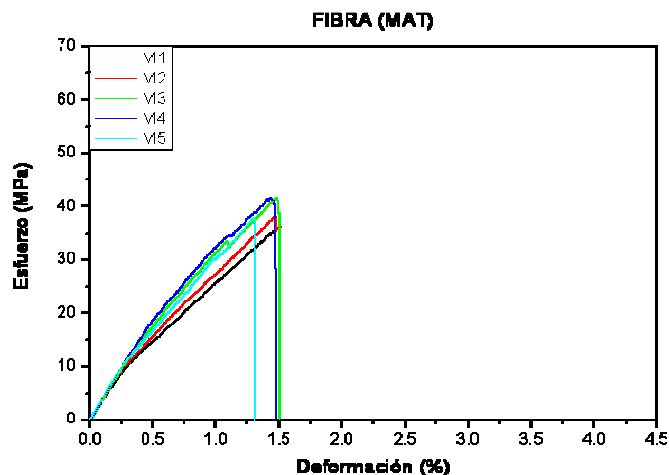
Sin muesca		
Muestra	Energía absorbida (J)	Resistencia al impacto (KJ/m ²)
1	0.81	15.5
2	0.83	16.3
3	0.77	10.2
4	0.89	20.7
5	1.32	22.4

Tabla 2.- valores de la prueba de impacto Izod

Los resultados del sistema epóxico/DDS indican una matriz termofija de rigidez media alta (>2.5) capaz de resistir esfuerzo de aproximadamente 55 MPa. Su transparencia es excelente para la observación directa del comportamiento del refuerzo textil.

Textil tipo colchoneta (mat): La caracterización mecánica para el material compuesto reforzado con textil tipo colchoneta es presentada en la figura 3 donde se observan las curvas de esfuerzo vs. deformación mientras en la tabla 3 se exhiben los valores numéricos obtenidos. El textil tipo colchoneta confiere a la matriz un ligero incremento en la resistencia (módulo elástico) sin embargo el porcentaje de deformación disminuye. Las muestras a tensión no exhibieron un desarrollo progresivo de las fallas ya que las probetas se fracturaron a la señal de la primera grieta significativa. Incluso en las curvas de esfuerzo-deformación no se observa una discontinuidad significativa que indique la aparición de alguna fisura. La figura 7a ilustra la zona de fractura de las muestras del composite reforzado con la colchoneta en la cual, debido a la transparencia del sistema, es posible observar la configuración aleatoria de las fibras que conforman el textil. De esta ilustración se pueden observar diferentes aspectos:

- 1) no se observó dominio de la estructura del textil colchoneta (fibras largas al azar) ya que todas las muestras sin importar la orientación de tensión, se fracturaron de manera transversal a la probeta de ensayo.
- 2) No se observó un patrón de desarrollo del daño a lo largo de la muestra ya que con la primera grieta el material se fracturaba por completo.
- 3) La fracción volumétrica (V_f) fue de 6.7%.



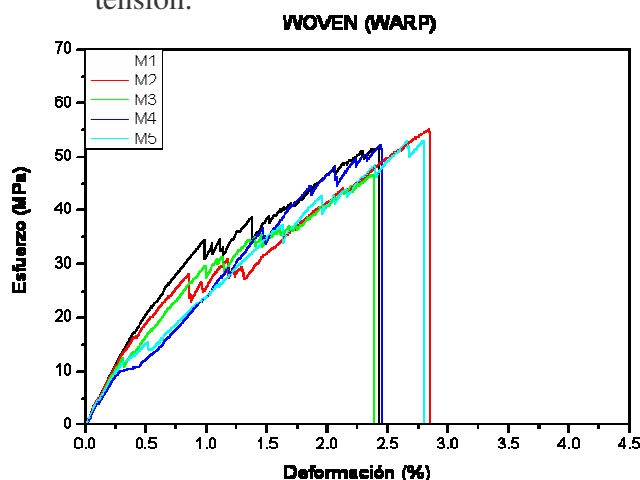
MAT	Elastic	Max Stress	Max Strain
Unidades	MPa	MPa	%
M1	3562.12	35.6882	1.17231
M2	3859.74	38.1898	1.46923
M3	3771.81	41.6347	1.48538
M4	3925.84	41.5483	1.43154
M5	3903.78	37.938	1.30154
PROMEDIOS	3804.668	38.9998	1.432

Tabla 3.- valores de los parámetros mecánicos

Figura 3.- Curvas de esfuerzo vs deformación.

Para el caso del material compuesto reforzado con textil tipo petatillo se obtuvieron resultados mecánicos en tres direcciones: 0°, 45° y 90° tomando en cuenta como ya se ha mencionado anteriormente, sus dos direcciones principales. La V_f promedio fue de 7.8%

Textil tipo petatillo orientado a 0° (warp): Las curvas de esfuerzo deformación exhibieron varias discontinuidades (Fig. 4), indicación de la formación sucesiva de grietas a lo largo de la probeta, las cuales aparecían cruzando de lado a lado la sección transversal de la misma en forma perpendicular a la dirección del esfuerzo de tensión. Es posible apreciar en las muestras (Fig. 7b) los espacios entre las fisuras las cuales corren a lo largo de las fibras transversales de la geometría del textil petatillo. En la tabla 4 se presentan los valores de los parámetros mecánicos los cuales exhiben un valor mayor a los obtenidos con el textil tipo colchoneta; esto es debido a la orientación de las fibras en dirección del esfuerzo de tensión.

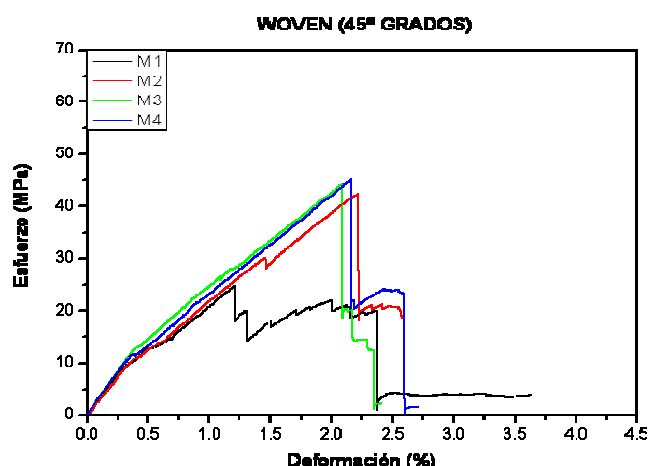


WARP	Elastic	Max Stress	Max Strain
Unidades	MPa	MPa	%
M1	4550.8	51.8448	2.42231
M2	4497.49	55.3139	2.84346
M3	4240.61	46.7513	2.37538
M4	4045.16	52.1952	2.445
M5	4167.79	52.9786	2.79154
PROMEDIOS	4300.37	51.81636	2.575538

Tabla 4.- valores de los parámetros mecánicos

Figura 4.- Curvas de esfuerzo vs deformación.

Textil tipo petatillo orientado a 45°: Las curvas de esfuerzo-deformación (Fig. 5), a diferencia de las obtenidas a 0° y 90°, presentan un mínimo de discontinuidades o ninguna. Esto debido a la posición de las fibras en la arquitectura del material de refuerzo donde no existe oposición de fibras paralelas a la tensión. Por lo tanto, el daño continúa entre los puntos donde las fibras se cruzan perpendicularmente a 45°. Las probetas (Fig. 7c) no presentaron un desarrollo sucesivo ya que algunas de ellas incluso se fracturaban a la señal de la primera grieta visible. La tabla 5 exhibe los valores donde es posible apreciar una disminución en el modulo elástico, nuevamente debido a la posición de las fibras.

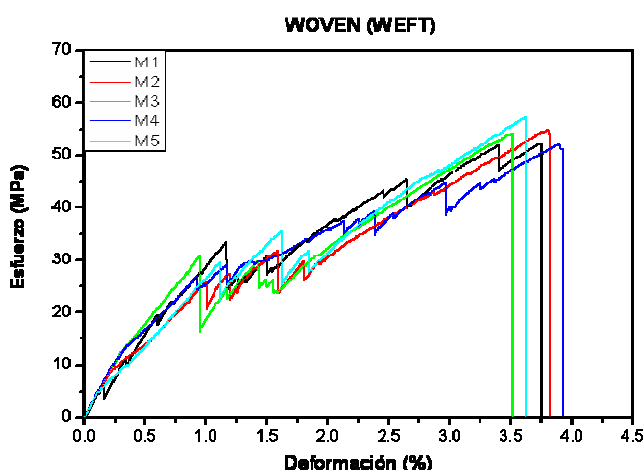


45°	Elastic	Max Stress	Max Strain
Unidades	MPa	MPa	%
M1	3276	24.814	2.36
M2	2908.66	42.4776	2.21154
M3	3378.56	44.3761	2.08462
M4	3355.9	45.2276	2.15808
PROMEDIOS	3229.78	39.223825	2.20356

Tabla 5.- valores de los parámetros mecánicos

Figura 5.- Curvas de esfuerzo vs deformación.

Textil tipo petatillo orientado a 90° (weft): De igual manera que a 0°, las curvas de esfuerzo-deformación (Fig. 6) presentan constantes discontinuidades relacionadas con la progresión de grietas transversales a lo largo de las muestras (Fig. 7d). Los valores de los parámetros mecánicos presentados en la tabla 6 exteriorizan la ligera disminución observada en la resistencia del material con respecto a la dirección a 0°. Esto es debido a la reducción en la cantidad de fibras en la dirección a 90°.



WEFT	Elastic	Max Stress	Max Strain
Unidades	MPa	MPa	%
M1	3831.73	52.2667	3.73538
M2	4104.48	54.9374	3.80038
M3	4298.48	54.185	3.50846
M4	4262.95	52.0889	3.89
M5	4170.33	57.1848	3.61615
PROMEDIOS	4133.69	54.13266	3.710074

Tabla 6.- valores de los parámetros mecánicos

Figura 6.- Curvas de esfuerzo vs deformación.

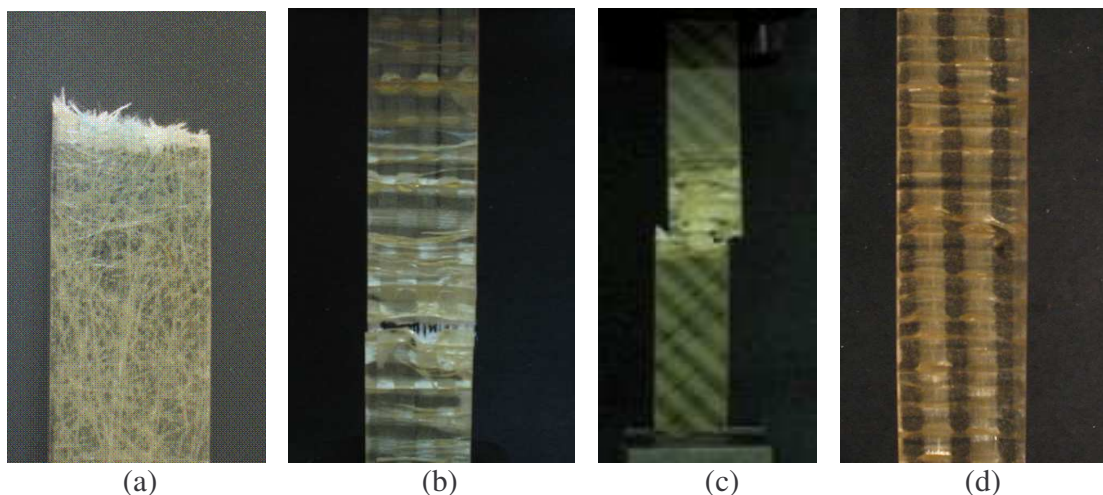
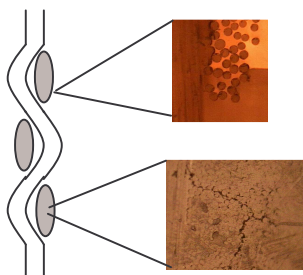


Figura 7.- Probetas fracturadas de los materiales compuestos ensayados a tensión: a) Colchoneta, b) Petatillo a 0°, c) Petatillo a 45° y d) Petatillo a 90°.



Las grietas aparentemente se desarrollaron a través de las delaminaciones de la interfase fibra/matriz. Microscopia realizada a las probetas dañadas demostró la aparición de fallas en las zonas de los extremos de las mechas transversales y en la zona media tal como se ilustra en la figura 8.

Figura 8.- Inicio de las grietas.

Conclusiones

Se realizó la manufactura y caracterización mecánica de materiales compuestos reforzados con textiles de refuerzo tipo colchoneta y petatillo. El primer refuerzo presentó fractura total al momento de surgir la primera grieta significativa sin exhibir un daño progresivo a lo largo de la muestra, este comportamiento es producto de la orientación al azar de las fibras continuas. Para este caso la geometría al azar no impone la aparición secuenciada de las fallas. Por otro lado, el refuerzo tipo petatillo si influye en el progreso del daño generado cuando las fibras se encuentran orientadas paralela y transversalmente (0° y 90°) mas no a 45°. Las grietas iniciaron por la falla interfacial fibra/matriz y se desarrollaron en los extremos de las mechas transversales y en la zona central. El empleo del DDS como agente de curado permitió observar el desarrollo de las fallas debido a su rigidez y transparencia ya que con el empleo anterior de un agente de curado a temperatura ambiente (ancamine 1784) los materiales obtenidos se fracturaban súbitamente a la primera señal de daño ocasionado por una grieta sin exhibir las fisuras a lo largo de las probetas.

Referencias

1. B. Gommers, I. Verpoest and P. Van Houtte. *Composites Part A* **29** (1998) 1579.
2. Z.M. Huang, S. Ramakrishna, H.P. Dinner and A.O. Tay. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. **18** (1999) 118.
3. R.A. Naik, P.G. Ifju and J.E. Masters. *Journal of Composite Materials*. **28** (1994) 656.
4. R.J. Bassett and R. Postle. *Polymer Composite*. **20** (1999) 305.
5. F.Gao, L. Boniface, S.L. Ogin, P.A. Smith and R.P. Greaves. *Composites Science and Technology*. **59** (1999) 123.