

Estudio del efecto de absorción de humedad en el estado de esfuerzos residuales en la interface fibra-matriz de un material compuesto

J. I. Cauich Cupul, A. Valadez González y P. J. Herrera Franco
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.
Calle 43 # 130, Col. Chuburná de Hidalgo, C.P. 97200, Mérida, Yucatán, México.
Email: jicc@cicy.mx

1. Resumen

El efecto de la absorción de humedad en un material compuesto de resina epóxica y fibras de carbón IM7 fue estudiado bajo ambientes controlados. El efecto de la absorción de humedad en las propiedades mecánicas de la matriz es atribuido a una disminución de su T_g . La calidad de la interface fibra-matriz fue estimada utilizando la prueba de fragmentación de una sola fibra y la longitud crítica de fibra obtenida utilizada como un indicador de la calidad interfacial. La longitud de los fragmentos fue medida utilizando métodos ópticos y de detección de emisiones acústicas y fue necesario determinar la velocidad de propagación de las ondas en función de la deformación. El efecto del hinchamiento de la matriz debido a humedades relativas de 25%, 55%, y 95% sobre el estado de esfuerzos residuales y la disminución de la resistencia interfacial fue analizado utilizando un modelo micromecánico de transferencia de cargas.

2. Introducción.

La absorción de agua por un polímero resulta en una expansión del material polimérico (hinchamiento) que altera el estado de esfuerzos residuales en el material compuesto y se puede atribuir a: 1) al carácter hidrofóbico de las fibras de ingeniería, 2) a la diferencia de las propiedades físico-químicas y mecánicas entre la fibra y la matriz, y 3) a una plastificación del material compuesto evidenciada por un reblandecimiento y por una disminución de su T_g [1]. Por otra parte los agentes acoplantes del tipo silano contienen grupos funcionales orgánicos capaces de reaccionar con un segundo grupo funcional de la matriz, formando una película inorgánica con un efecto de acoplamiento con la fibra y son capaces de mejorar la interacción entre la fibra y la matriz, aumentando la resistencia cortante interfacial y por consiguiente las propiedades mecánicas en materiales compuestos sometidos a condiciones húmedas o secas.

3. Condiciones Experimentales

3.1 Materiales

Se utilizó una resina epóxica de Diglicidil Eter de Bisfenol A (DGEBA), Epon 828 de shell Co., el agente de curado seleccionado fue Metafenilén diamina (mPDA), de Aldrich y fibras de carbón de módulo intermedio, tipo IM7 de Excel Corp. Como agente acoplante se utilizó el silano 3-glycidoxy propyltrimethoxysilane, Z6040 de Dow Corning. Se realizaron Tratamientos superficiales a las fibras como sigue: IM7 a la fibra se utilizó con su recubrimiento original de fabricación; IM7 tratada con Silano y IM7 tratada con ácido nítrico y posteriormente con el silano.

3.2 Preparación y acondicionamiento ambiental de muestras

Se moldearon muestras de tensión y dimensiones de 63 x 3.96 x 1.61 mm. Se utilizó una relación estequiométrica de 1:1 entre la resina epóxica y la metafeniléndiamina. El ciclo de curado se realizó en una estufa marca Squaroid, Modelo 3608-5, con 2 horas a 75° C y 2 horas a 125° C y se dejó enfriar por un período de 12 horas. Las muestras fueron acondicionadas en ambiente de humedad relativa de 25%, 55% y 95%, a una temperatura constante de 25° C, de acuerdo a las normas estándar ASTM E104-51, y E104-85; La determinación del contenido de humedad absorbida se midió por la diferencia en peso ganado en función del tiempo de exposición.

3.3 Fragmentación de una sola fibra.

La longitud mínima del fragmento (L_c), se midió hasta comprobar que el número de fragmentos permanece constante por medio de observación microscópica utilizando un vernier óptico acoplado una PC y por medio de las señales de emisión acústica (EA) utilizando un algoritmo diseñado para calcular longitudes en base a la velocidad de propagación de la señal acústica.

3.4 Determinación de la velocidad de propagación de una señal acústica

La velocidad de propagación de una señal acústica en muestras de resina epóxica acondicionadas a los diferentes porcentajes de absorción de humedad, se les midió creando un sitio de falla para generar una EA por medio de una muesca en un costado de la muestra, situada a una distancia conocida del sensor 2 al centro de la muesca: 9.88 mm y del sensor 1 al centro de la muesca: 4.88 mm (figura 1). La velocidad de propagación de una onda en un

medio es función de las propiedades del material, frecuencia dominante de la señal acústica y la deformación producida en el material, esto es:

$$\sigma_{xx} = \left(\frac{E}{c_o} \right) \frac{\partial u}{\partial t} = \rho c_o \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{ó} \quad E = \frac{\sigma^2}{V^2} \rho \quad (1)$$

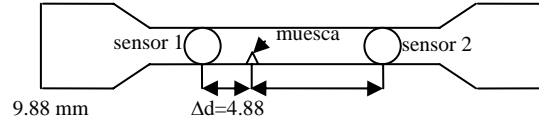


Figura 1. Muestra para determinar la velocidad de propagación.

4. Resultados y discusión

4.1 Longitud crítica de fragmentos en función de humedad.

En la figura 2, se nota una buena correlación en los resultados medidos tanto por la técnica de emisión acústica como por la óptica. En cada una de las curvas para los distintos niveles de adherencia entre fibra y matriz se distinguen tres zonas diferentes. Esto es, la variación en la longitud crítica en más rápida a mayores niveles de humedad absorbida.

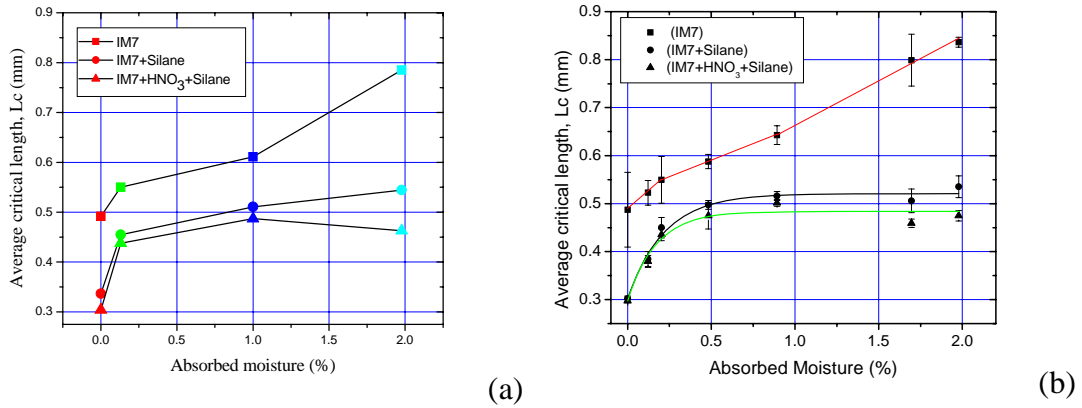


Figure 2. Longitud crítica promedio de los fragmentos de fibra en función de la humedad absorbida medidos por (a) método óptico; (b) método de emisión acústica.

4.2 Análisis de esfuerzos residuales

Usando un modelo propuesto por Whitney and Drzal para predecir los esfuerzos en un sistema de un fragmento de fibra embebida en una matriz, que incluye efectos de expansión higrótérmica y de la ortotropía de la fibra, fue utilizado para analizar la distribución de los

esfuerzos en la interface fibra y matriz. La relación para el esfuerzo normal axial σ_x en la

fibra es:
$$\sigma_x = \frac{[1 - (4.75\bar{x} + 1)e^{-4.75\bar{x}}]C_1\varepsilon_0}{\quad} \quad (2)$$

donde $\bar{x} = x/l_c$, ε_0 es la deformación aplicado en el campo lejano y C_1 es una constante dependiente de las propiedades del material, deformaciones térmicas y la deformación aplicada. El esfuerzo cortante interfacial es dado por la relación:

$$\tau_{xr}(\bar{x}, r) = -4.75\mu C_1 \varepsilon_0 \bar{x} e^{-4.75\bar{x}}, \text{ donde, } \mu = \sqrt{\frac{G_m}{E_{1f} - 4\nu_{12f}G_m}} \quad (3)$$

E_{1f} es el modulo elástico axial de la fibra, ν_{12f} es la relación de Poisson longitudinal de la fibra, G_m , denota el módulo de cortante de la matriz. El esfuerzo radial en la interface es dado por:

$$\sigma_r(\bar{x}, r) = [C_2 + \mu^2 C_1 (4.75\bar{x} - 1)e^{-4.75\bar{x}}]\varepsilon_0 \quad (4)$$

Las constantes C_2 y C_1 son dependientes en las propiedades de los materiales, deformaciones térmicas ó por absorción de humedad y la deformación aplicada. La diferencia entre la temperatura de post-curado y la ambiental se consideró igual a $\Delta T = 75^\circ \text{C}$. que representa el peor caso de fuente de esfuerzo residual, aun considerando cierta relajación de esfuerzos al enfriarse a temperatura ambiente la muestra. Como se aprecia, la componente radial de esfuerzos residual disminuye considerablemente con la humedad absorbida por la matriz. Si se considera que la resistencia interfacial tiene una componente química y una mecánica, de este análisis contribuye a una disminución de la resistencia interfacial.

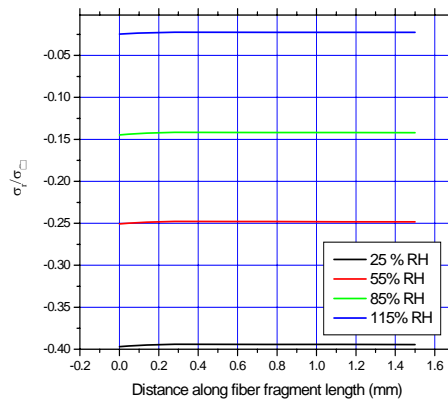


Figure 12. Distribución de esfuerzos radiales interfaciales en función de la humedad absorbida.

5. Conclusiones

La absorción de humedad en el material compuesto tiene un efecto considerable en el estado de esfuerzos residuales y su disminución por el aumento volumétrico de la matriz afecta la calidad de la resistencia interfacial.

6. Referencias

1. G. Z. Xiao, M.E.R. Shanahan, "Water Absorption and Desorption in an Epoxy Resin with Degradation", *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, Vol. 35, 2659-2670 (1997).