Regresa al Indice

Análisis de esfuerzo cortante interracial y definición de las direcciones de los esfuerzos principales en materiales compuestos de fibra termoplástica y matriz termofija por medio de la técnica de fotoelasticidad

J. M. Vázquez-Rodríguez; P. J. Herrera-Franco, P. I. González-Chi*
Unidad de Materiales
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
Calle 43, No. 130, col. Chuburná de Hidalgo 97200, Mérida, Yucatán, México.
*email: ivan@cicy.mx

Introducción

En un ensayo Micromecánico de *Pull Out*, es deseable analizar y conocer el proceso de carga así como los perfiles de carga *in situ* a lo largo de la fibra embebida. En el presente estudio, se emplea la técnica de fotoelasticidad y la respuesta de un haz de luz polarizado al atravesar una matriz birrefringente para monitorear en tiempo real el proceso de carga y fractura en un ensayo de *Pull Out* [1].

La técnica de fotoelasticidad agrupa en si misma la posibilidad de analizar mediante las imágenes los esfuerzos cortantes interraciales y el proceso de carga en una probeta de *Pull Out*. Mas aun, manipulando la configuración del polarizador empleado, es posible encontrar también las direcciones de los esfuerzos principales y las zonas de concentración de esfuerzos [2, 3, 4].

De un polarizador plano es posible obtener dos clases de franjas fotoelásticas, las isoclinas y las isocromáticas. Las isoclinas son franjas que aparecen en los puntos donde los esfuerzos principales tienen direcciones paralelas formando un mapa de la distribución de esfuerzos en una probeta cargada.

Por otro lado las franjas isocromáticas están directamente relacionadas con el esfuerzo cortante interracial [5, 6]. Esta franja aparece cuando la deformación inducida produce un retardo de una longitud de onda o un ciclo al pasar la luz a través de la probeta.

El número de franjas obtenidas N esta relacionado con el número de ciclos de retardo alcanzados y con el nivel de esfuerzo cortante que esta actuando en un momento dado. N es conocido como orden fotoelástico, orden de franja u orden isocromático. Debido a la relación entre el orden fotoelástico y el esfuerzo cortante, es posible conocer tres características de un ensayo de *Pull Out*: el esfuerzo cortante máximo interracial, la distribución de esfuerzos cortantes y las direcciones de los esfuerzos principales [7].

La medición directa del esfuerzo cortante máximo interracial a través del número de franjas obtenido es la base experimental, pero es necesario hacer una corrección de los valores de esfuerzo cortante leídos pues las imágenes están afectadas por el espesor de la probeta (relación axisimetrica) y por la superposición de las franjas como se puede observar en la figura 1, donde r es el radio de la fibra, r_1 es la distancia hasta el orden fotoelástico 2, y r_i es el radio de influencia.

Para la corrección se usó la ecuación analítica de Schuster y Scala [8] en la siguiente forma:

Regresa al Indice

$$\tau_{cMAX} = \frac{h(\tau_0 - \tau_n)(r_i - r_0)}{2\left\{ r_i a - \frac{1}{2}\left[a r_i + (r_0 + x)^2 \ln \frac{(a + r_i)}{(r_o + x)} \right] \right\}} + \tau_n \quad (1)$$

donde:

$$a = \left[r_i^2 - (x - r_0)^2 \right]^{1/2}$$

r_0 es el radio de la fibra, r_i es la distancia desde el centro de la fibra hasta el borde de la zona de influencia, x es la distancia desde la superficie de la fibra hasta la dirección de visualización, τ_n es el esfuerzo cortante nominal y τ_c es el esfuerzo cortante corregido en un punto.

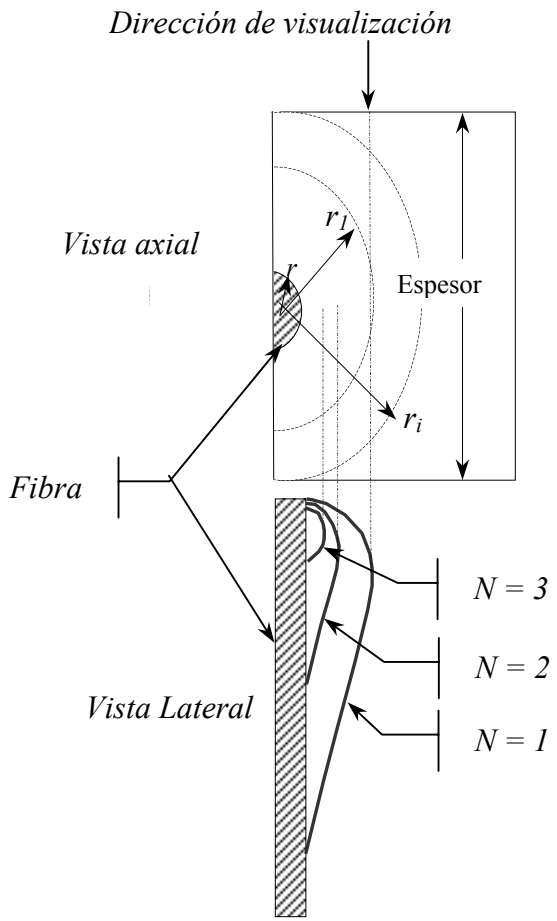


Figura 1 Esquema de empaquetamiento de esfuerzos cortantes

Materiales

En la manufactura del modelo de *Pull Out* se usó una resina epóxica basada en epiclorhidrina y bisfenol A (DER 331 de DOW Chemical) con entrecruzante de aminas alifáticas (ANCAMINE 1784 de Air Products). La fibra termoplástica usada fue de poliéster (Kirschbaum).

Tabla 1. Características mecánicas de la fibra poliéster acorde a ASTM D2343-67.

	Módulo (MPa)	**Resistencia** (MPa)
Average	6003.61	576.779
SD	1.7078	1.7078

Tabla 2. Características mecánicas de la resina epóxica acorde con ASTM D 638-82[a]

	Módulo (MPa)	**Razón de Poisson**
Average	1032.050	0.3840
SD	2.5819	1.8708

La constante fotoelástica f_σ de la matriz fue obtenida por el método de calibración a flexión en cuatro puntos (flexión pura) y tiene un valor de 7534.40 N/m.

Metodología

El equipo empleado fue un polarizador circular el cual consta de dos elementos de polarización con los ejes cruzados y dos elementos de ¼ de onda desplazados un ángulo de 45º en su eje de polarización respecto al eje del primer elemento de polarización.

Las bandas de isocromáticas e isoclinas que generadas por los campos de esfuerzos son monitoreados y medidos a través del número de franjas fotoelásticas obtenidas, haciendo posible la medición inicial del esfuerzo cortante entre la fibra y la matriz.

Regresa al Indice

Para la obtención de las isoclinas, se empleo una probeta de *Pull Out* con las mismas dimensiones que las empleadas para el ensayo de adhesión. La carga aplicada fue constante y se tomaron fotografías desplazando los ejes de polarización 5º a la vez.

Resultados

Los esfuerzos cortantes corregidos por medio de la ecuación 1 para cada orden fotoelástico se muestran en la tabla 3.

Tabla 3.Esfuerzo cortante corregido para cada orden fotoelástico.

Orden fotoelástico N	*Esfuerzo cortante máximo* τ_{cMax} (MPa)
0.50	1.09
1.00	1.42
1.50	1.75
2.00	2.09
2.50	2.42
3.00	2.75

En la figura 2 se muestra la designación de los ordenes fotoelásticos en el proceso de carga.

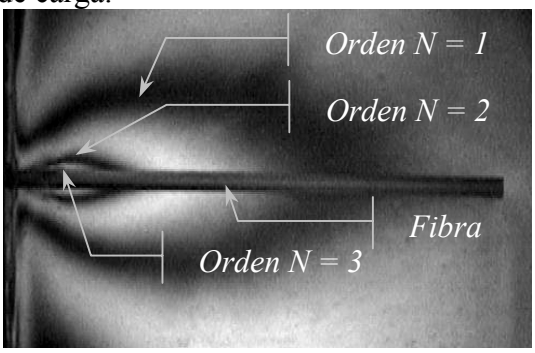
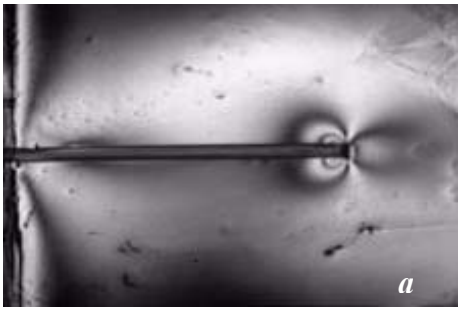


Figura 2 Designación de ordenes fotoelásticos.

El evento posterior al proceso de carga después de alcanzar el esfuerzo cortante máximo, es el desprendimiento de la fibra. Este evento se presenta con la formación de alos fotoelásticos debidos a la fricción entre la superficie de la fibra y la resina epóxica.



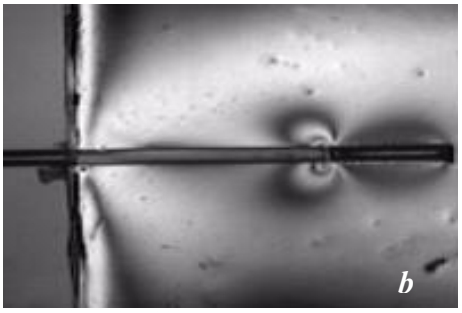


Figura 3 Proceso de deslizamiento de la fibra desprendida en un ensayo de *Pull Out*.

Al graficar los datos obtenidos de esfuerzo cortante interracial, observamos el siguiente comportamiento.

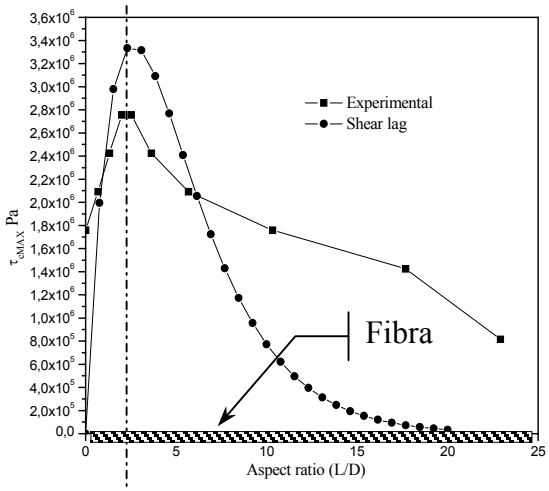


Figura 4 Comportamiento del esfuerzo cortante τ_{cMax} a lo largo de la fibra embebida.

Regresa al Indice

Las imágenes de las isoclinas se presentan en la figura 5.

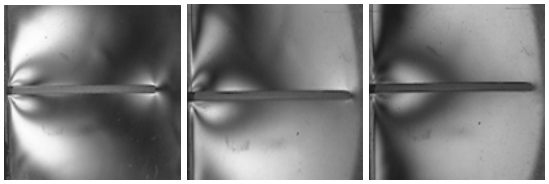


Figura 5 Bandas de isoclinas a 0, 25 y 45º.

Al superponer en un solo diagrama al conjunto de isoclinas, definimos las trayectorias sobre las que actúan los esfuerzos principales de forma paralela (figura 6).

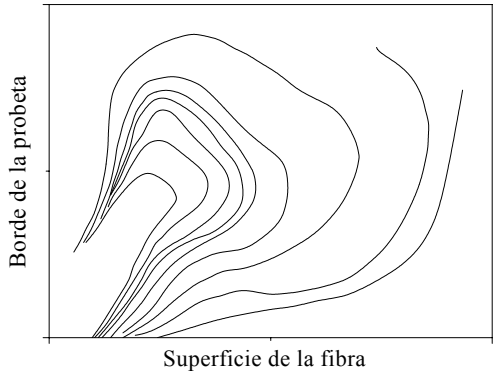


Figura 6 Grupo de isoclinas para la geometría de *Pull Out*

Posteriormente con base a las trayectorias anteriores, se trazan las direcciones de los esfuerzos principales.

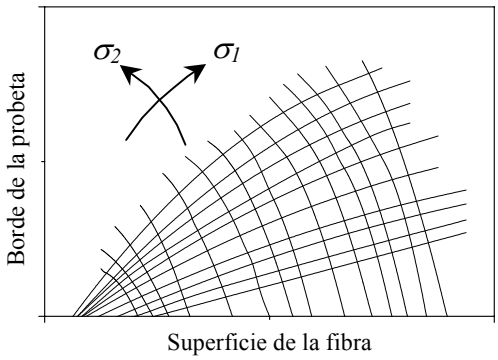


Figura 7 Direcciones de esfuerzos principales

Conclusiones

Se caracterizaron las propiedades mecánicas y fotoelásticas de la resina así como las mecánicas cordel empleados en la manufactura de una probeta de *Pull Out*. Fue monitoreado el proceso de carga de una probeta de *Pull Out*, obteniéndose la distribución de esfuerzo cortante a lo largo de la fibra embebida

El esfuerzo cortante máximo interfacial se ubica a una distancia de tres veces el radio de la fibra a partir de del borde de la probeta

Se obtuvo la distribución de las isoclinas en una probeta de *Pull Out*, definiéndose las direcciones de los esfuerzos principales.

Bibliografía

[1] J.A. Quiroga, A. Gonzalez Cano. IUTAM Symposium of Advanced Optical Methods and Applications in Solid Mechanics Solid Mechanics and Its Applications **2000**, 82, 17-24

[2] J.A. Quiroga, A. Gonzalez Cano. Applied Optics **2000**, 39, 2931-2940

[3] Y. Kinomoto, M. Torij. Journal of Dentistry **1998**, 26, 165-171

[4] P. J. Withers, E.M. Chorley and T. W. Clyde. Materials Science and Engineering A **1991**, 13 ,5173-178.

[5] Ritter, S; Busse. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Volume 17B USA **1998**, 1201-1208

[6] J Hobbs, R. Burguete. Journal of strain Analysis **2000**, 36, 93-99

[7] Ritter, S; Busse. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. Volume 17B USA **1998**, 1201-1208

[8] D. M. Schuster and E. Scala. Transactions of The Metallurgical Society of AIME **1964**, 230, 1635-1640