ESTUDIO EXPERIMENTAL MEDIANTE INTERFEROMETRÍA MOIRE DEL EFECTO DE LAS MORDAZAS EN EL ENSAYO OFF-AXIS

Cañas Delgado J.; Marín Vallejo J.C.[1]; París Carballo, F.; Blázquez Gámez, A.
Dpto. Mecánica de Medios Continuos. E.T.S. Ingenieros Industriales de Sevilla
Avda. Reina Mercedes s/n. 41012 Sevilla. Tfno: 95-4557001. Fax: 95-4239888

Resumen: Se presenta en este trabajo el estudio realizado en orden a establecer qué efecto tienen las mordazas tipo cuña en los resultados que del ensayo off-axis se obtendrían. Para ello, se ha empleado como técnica experimental la interferometría moiré procediéndose posteriormente a una simulación numérica del efecto observado mediante el MEF.

Abstract: An study about the influence of the clamping system experimental measurements of the off-axis tension test is show in this work. For this purpose, moiré interferometry technique was employed to observe the effects over the specimen. FEM analysis was carried out to simulate the observed behaviour.

1.- INTRODUCCIÓN.

En los últimos años numerosos procedimientos experimentales han sido desarrollados con objeto de evaluar el módulo de cortadura intralaminar de materiales compuestos (Bergner et al. 1.977, Lee et al. 1.990). De todos ellos el ensayo Off-Axis es uno de los que goza de mayor popularidad dada la simplicidad en lo que a preparación de la probeta se refiere, así como a la realización propia del ensayo y las características especificas de la probeta en cuestion (Chamis y Sinclair 1976, 1977). No obstante, el valor de G_{12} que se obtendría directamente del ensayo no es correcto salvo para relaciones de L/2h superiores a 15, donde L es la longitud de la probeta y h el semiancho de la misma. Por ello, es preciso establecer una corrección de dicho valor en orden a encontrar el valor correcto.

Diversos factores de corrección han sido propuestos en la bibliografía. Así, Pindera y Herakovich (1986) proponen un factor de corrección basado en la solución analítica a un problema (Pagano y Halpin, 1968) con unas condiciones de contorno que intentan representar las que supuestamente aparecen en el ensayo. Cañas et. al. establecen un factor de corrección basado en la solución numérica mediante el MEF de un problema con unas condiciones de contorno más ajustadas a las que presumiblemente aparecen en el ensayo (Cañas et. al 1991, Marín et. al 1993).

La bondad del factor de corrección empleada depende en gran medida de la fiabilidad

con la que todas las magnitudes involucradas en el ensayo son tomadas. Un estudio paramétrico realizado en este sentido (Marín et. al, 1995) ha puesto de manifiesto que las condiciones de contorno influyen de manera notoria en el resultado final. Así por ejemplo, ha podido constatarse experimentalmente una falta de repetibilidad en los ensayos cuando se emplean mordazas de tipo cuña o mordazas hidráulicas. En la Figura 1, se muestra la gráfica experimental del valor aparente de la tensión tangencial τ^*_{12} ($\tau^*_{12} = \sigma_{med}$ senθ cosθ, siendo θ el ángulo de orientación de las fibras y σ_{med} el valor de la tensión normal media) frente a γ_{12} para una misma probeta ensayada en mordazas hidráulicas y ensayada en mordazas de cuña observándose que los resultados obtenidos, para el caso de mordazas de cuña, no se corresponden con la condición de empotramiento esperada.

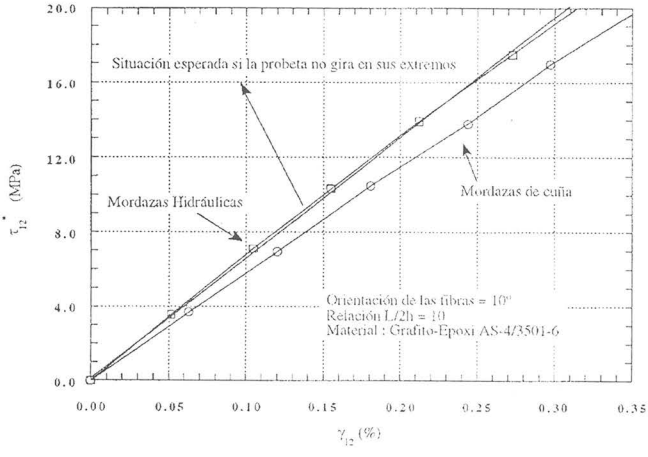

Figura 1.- Resultados obtenidos con probetas de L/2h=10

Para encontrar una explicación plausible a tal hecho, se propone en este artículo la realización de un estudio experimental en las cercanías de la mordaza con objeto de vislumbrar las causas que podrían motivar tales discrepancias. Dicho estudio experimental, no puede ser realizado mediante bandas extensométricas ya que ello no proporcionaría informacion suficiente. La interferometría moiré, al ser una técnica de campo total, es considerada la más apropiada para tal fin.

2.- ANÁLISIS EXPERIMENTAL.

La inteferometría moiré es una técnica experimental que permite obtener información sobre el campo de desplazamientos originado a partir de las imágenes de interferencia generadas como consecuencia del desfase existente entre los rayos que emergen de la rejilla de difracción situada en la probeta (Post, 1987, Czarnek, 1991). Dicha rejilla presenta una frecuencia de 1200 líneas/mm y es adherida a la probeta mediante un proceso de réplica. En la Figura 2 se muestran las dimensiones de la probeta ensayada.

El montaje experimental realizado no es un montaje convencional ya que los interferómetros clásicos, que han sido aplicados con éxito para medidas en zonas alejadas

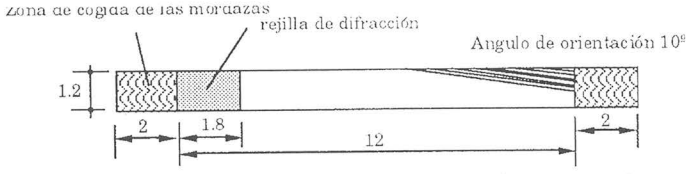

Figura 2.- Probeta objeto de ensayo. (dimensiones en cm.)

de las mordazas, no resultaban de aplicación dado que físicamente no podían ser situados en la zona de interés debido a que el espacio donde se debe colocar el interferómetro está ocupado por la mordaza. Para resolver dicho problema se usó la parte superior de la mordaza como parte del dispositivo experimental interferométrico consiguiendo así la obtención de las imágenes de interferencia. En la Figura 3 se esquematiza dicho montaje. La complejidad de este montaje puede explicar el que aún habiéndose usado la interferometría moiré para medir desplazamientos en el ensayo off-axis (Morton y Post, 1989, París et. al 1993), siempre se haya realizado la medida en el centro, donde es más fácil de realizar, pero no tiene el interés que la realizada próxima a la mordaza.

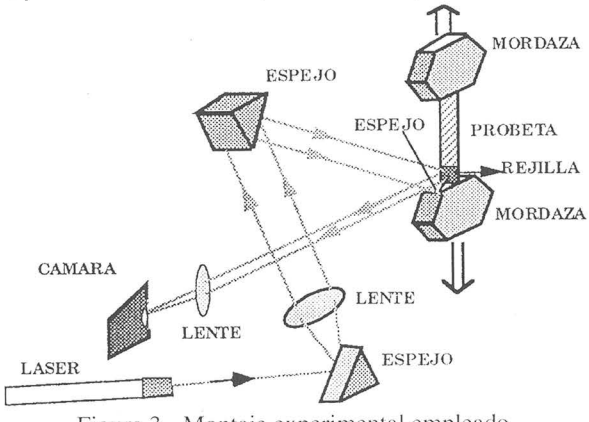

Figura 3.- Montaje experimental empleado.

La información obtenida son curvas que representan las líneas de isodesplazamientos. La imagen que se obtuvo para el desplazamiento longitudinal (u) para una carga aplicada de 888 N es la mostrada en la Figura 4.

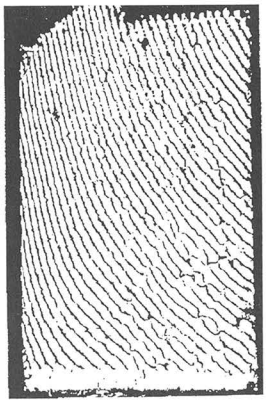

Figura 4.- Campo de iso-desplazamientos longitudinales u.

A partir del campo de desplazamientos se puede obtener el campo de deformaciones, el cual es representado en la Fig. 5 para tres líneas próximas al extremo.

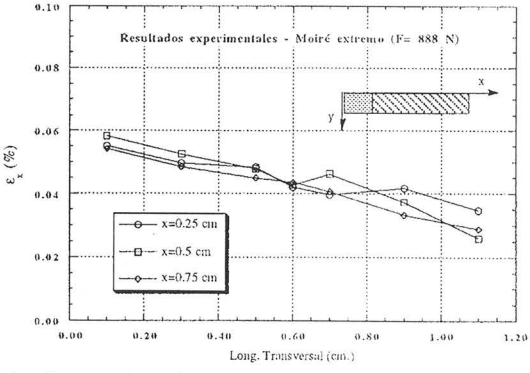

Figura 5.- Campo de deformaciones ε_x obtenido experimentalmente.

3.- ESTUDIO NUMÉRICO.

El campo de deformaciones numérico bajo las situaciones de empotramiento y de giro permitido, se ha obtenido mediante el MEF usando una malla con 910 elementos que tiene una discretización más fina en los extremos de la probeta. Los elementos empleados son isoparamétricos de 4 nodos. Los resultados para la deformación longitudinal se muestran en la Figura 6.

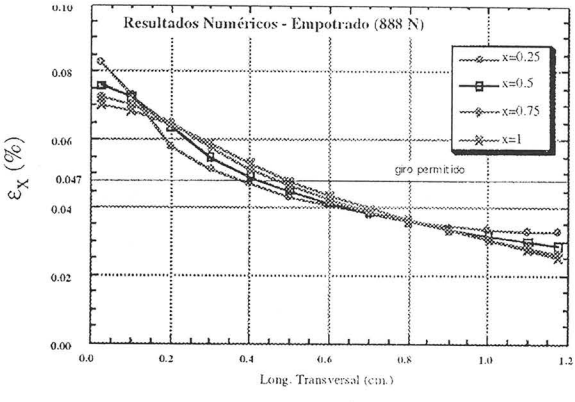

Figura 6.- Resultados numéricos obtenidos.

Una comparación de los resultados experimentales y numéricos para la zona próxima a la mordaza pone de manifiesto que las situaciones extremas consideradas como posibles no son las que se producen en la realidad. De hecho, parece que la probeta tiende a soltarse en un extremo de la misma (y=0) más que en el otro (y=1.2 cm.), y el

estudio numérico realizado considerando unas condiciones de empotramiento modificadas en el sentido antes aludido corrobora este hecho.

La condición de empotramiento parcial ha sido simulada liberando las condiciones de u=0 en algunos nudos del extremo de la probeta. En la Figura 7 se muestra una comparación de los resultados numéricos y experimentales encontrados para x=0.25.

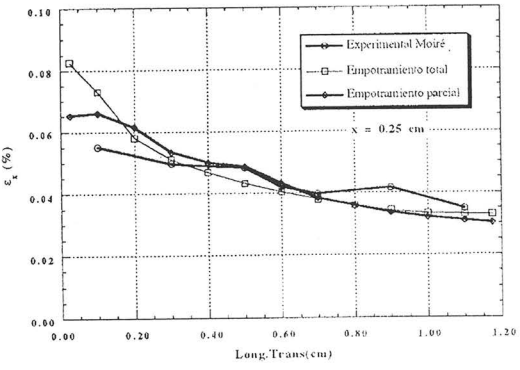

Figura 7.- Resultados numéricos y experimentales en x=0.25.

Como puede observarse, la simulación de un empotramiento parcial en la esquina superior del lado izquierdo e inferior del lado derecho de la probeta permite observar una tendencia del campo de deformaciones hacia los resultados experimentales encontrados.

Con objeto de dar una explicación plausible al hecho experimentalmente observado y numéricamente modelado, se pensó que, como consecuencia de las condiciones de empotramiento, aparece una singularidad en el estado tensional en las esquinas de la probeta, lo que podría provocar un deslizamiento, como consecuencia del elevado estado tensional originado. Esta suposición venía avalada por el hecho de que, en materiales isótropos, puede aparecer una singularidad para ángulos salientes cuando las condiciones de contorno en los lados del ángulo son empotrado-libre. Por ejemplo, en estas condiciones y para el acero (ν=0.3) aparece una singularidad de orden λ=-0.24 en un ángulo de 90° (Williams, 1.952). Además, el orden de la singularidad podría en ambos extremos ser diferente lo que explicaría que la probeta tienda a soltarse más por un borde que por otro.

Para comprobar la idea anterior se procedió a un estudio más refinado del estado tensional existente en el extremo de la probeta, haciendo uso del Método de los Elementos de Contorno, por entender que éste se ajustaba mejor a los objetivos perseguidos. El objetivo era obtener los órdenes de singularidad en el estado tensional en los dos bordes de la probeta, y para ello se desarrolló un programa de elementos de contorno para materiales ortótropos aproximándose las variables mediante elementos lineales. No se usaron elementos singulares por desconocer inicialmente cuál sería el orden de la singularidad que aparecería.

En la Figura 8 se muestran las tensiones normales en la línea de empotramiento, para tres orientaciones diferentes. Como puede ohservarse, la presencia de la singularidad es clara en ambos extremos, siendo ésta del mismo orden cuando la disposición es

simétrica (caso de fibras orientadas 0° y a 90°) y siendo diferente en todos los demás casos. Por otro lado, la distribución de tensiones hace pensar que el orden de la singularidad es diferente en función del ángulo.

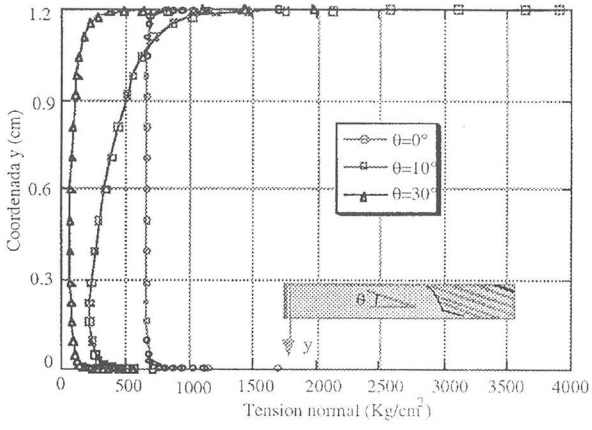

Figura 8.- Distribución de tensiones normales en el empotramiento.

La determinación de los órdenes de singularidad ha sido realizada mediante un procedimiento de extrapolación, asumiendo una singularidad del tipo r^{λ}. La representación logarítmica de la relación σ-r mostró con gran nitidez la existencia de una zona lineal lo que confirma la validez del tipo de singularidad supuesto a una pequeña distancia de la esquina. Resulta instructivo representar el orden como una función del ángulo de orientación de las fibras, tal como se muestra en la Figura 9 en la que se aprecia claramente la asimetría del comportamiento de la singularidad en ambas esquinas, en función de la orientación de las fibras, observándose además que los valores máximos ocurren cuando las fibras se orientan a 45°. Como validación del modelo numérico empleado, se comparó el orden de la singularidad obtenido para el caso isótropo con el valor analítico obtenido por Williams (-0.24) no apreciándose error significativo alguno.

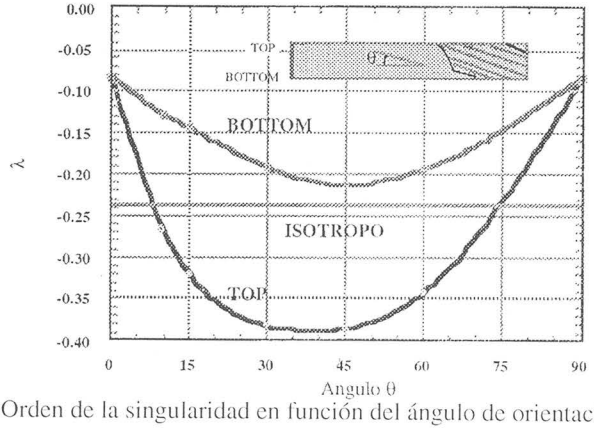

Figura 9.- Orden de la singularidad en función del ángulo de orientación de las fibras.

4.- CONCLUSIONES

Como conclusión a este estudio cabe decir que el empleo de mordazas tipo cuña puede presentar una serie de problemas derivados de la posibilidad de que no se reproduzcan adecuadamente las condiciones que habitualmente se supone que se originan en el ensayo, sobre todo si la presión lateral que ejercen dichas mordazas no es lo suficientemente elevada como para evitar que la probeta deslice. Será preciso, en su caso, desarrollar un procedimiento que permita corregir el valor aparente del módulo de cizalladura que se calcula con este procedimiento.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado con cargo al Proyecto de CICYT MAT94-0480.

5.- REFERENCIAS.

1.- Bergner H.W. Jr., Davis J.G. Jr. and Herakovich C.T., *Analysis of Shear Test Method for Composite Laminates*, Report VPI-E-77-14, Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, VA, April 1977.

2.- Cañas J., Paris F. and Marín J.C., *Numerical Analysis of Off-Axis Tensión Test for Unidirectional Graphite-Epoxy Composites*, Proceedings of ICCM VIII, Honolulu, Hawai, USA, pp. 36F1-36F12, July 1991.

4.- Chamis I.M. and Sinclair J.H., *10° Off-Axis Tensile Test for Intralaminar Shear Characterization of Fiber Composites*, NASA TN D-8215, April 1976.

5.- Chamis C.C. and Sinclair J.H., *Ten-deg Off-axis Test for Shear Properties in Fiber Composites*. Exp. Mech., 17 (9), 339, Sept. 1977.

6.- Czarnek R., *Moiré Interferometry, Structure Testing, Society of Experimental Mechanics*, Vol. 30 (2), pp. 195-200, 1991.

7.- Lee S., Munro M. and R.F. Scott, *Evaluation of Three In-Plane Shear Test Methods for Advanced Composite Materials*, Composites, Vol. 21 (6), pp. 495-502, Nov. 1990.

8.- Marín J.C., Cañas J. and Paris F., *On the Evaluation of G_{12} in the Off-Axis Tensión Test*, Proceedings of ICCM - 9, Madrid, Spain, July 1993.

9.- Marín J.C., Cañas J. y París F., *Influencia en la Determinación de G12 de las Imprecisiones de los Parámetros Involucrados en el Ensayo Off-Axis*. MATCOMP 95, Sevilla, 1995.

10.- Morton J., Post D., *Mechanics of Composites: Review of Experiments of Moire Interferometry*, American Society of Composites 4th Annual Meeting, 1989.

11.- Pagano N.J. and Halpin J.C., *Influence of End constraint in the Testing of Anisotropic Bodies*, J. Composite Materials, Vol. 2, N° 1, pp. 18-32, 1968.

12.- Paris F., Cañas J., Marín J.C. y Morton J., *Deformation Study in the Off-Axis Tension Test*, Proceedings of 2nd International Conference on Deformation and Fracture of Composites, Manchester, UK, pp. 18.1-18.9, March 1993.

13.- Pindera M.J. and Herakovich C.T., *Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test*, Experimental Mechanics, pp. 103-112, March 1986.

14.- Post D., *Moire Interferometry*, Handbook on Experimental Mechanics, Ed. A.S. Kobayashi, 1987.

15.- Williams M.L., *Stress Singularities Resulting From Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extension*, Journal of Applied Mechanics, Vo. 74, 1952.