

DETERMINACION DEL MODULO DE CORTADURA INTRALAMINAR EN COMPUESTOS DE GRAFITO EPOXY MEDIANTE EL ENSAYO "OFF-AXIS".

Marín, J.C.; París, F.; Cañas, J.
Departamento Mecánica de Medios Continuos
E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad de Sevilla
Avda. Reina Mercedes, s/n. Sevilla 41012.

Resumen.- Existe un número considerable de ensayos para evaluar G_{12} en materiales compuestos. Uno de los más extendidos, dada la facilidad en su realización, es el ensayo fuera de eje sobre laminados unidireccionales. No obstante, la obtención del valor correcto del G_{12} usando este tipo de ensayo no es directa dada la influencia notoria que sobre dicho valor tienen determinados parámetros. En este artículo se expone un método para evaluar G_{12} a partir de los resultados de un ensayo fuera de eje y se muestran los resultados experimentales obtenidos sobre probetas de grafito-epoxy.

Abstract.- There are many experimental test for the evaluation of G_{12} in composite materials. One of those more usually employed is the Off-Axis tension test. However, the difficulty of finding correct values for the shear modulus G_{12} is well known. In this paper is proposed a correction method for the evaluation of G_{12} from the results measured in a Off-Axis test, and the experimental values obtained for graphite-epoxy specimens are shown.

1.-INTRODUCCION.

Uno de los principales obstáculos que presenta la caracterización de materiales compuestos es la determinación del módulo de cortadura intralaminar G_{12} en laminados unidireccionales. Para la evaluación de dicho módulo se han propuesto diversos ensayos (Rail-Shear, Torsión de tubos, $\pm 45^\circ$ Off-Axis, Off-Axis, Iosipescu, etc.), sin que ninguno de ellos resulte totalmente satisfactorio.

Por la simplicidad de realización uno de los más utilizados es el ensayo Off-Axis. No obstante, los valores directamente obtenidos de este ensayo no son del todo correctos, debido a la influencia que sobre los resultados tienen las condiciones de contorno en los extremos de la probeta. Estas suelen normalmente consistir en un extremo empotrado y el otro con un desplazamiento prescrito. Evidentemente, no existe solución analítica para este problema, por lo que hay que acudir a aproximaciones en orden a comparar resultados numéricos y experimentales.

Pagano y Halpin [1] obtuvieron la solución analítica de un problema con condiciones de contorno aproximadas, la cuál ha sido usada por otros investigadores como solución aproximada de referencia del problema real.

Rizzo [2], a partir de un completo estudio mediante análisis numérico del problema bajo diversas condiciones de contorno, concluyó que el factor dominante en la influencia sobre la uniformidad del campo de tensiones era el impedimento de la rotación en los extremos de la probeta.

Pindera y Herakovich [3], basados en el estudio analítico de Pagano y Halpin, desarrollaron una expresión que permitía corregir el valor aparente del módulo cortante intralaminar (G_{12}^*), definido como:

$$G_{12}^* = \frac{\tau_{12}^*}{\gamma_{12}} ; \tau_{12}^* = \bar{\sigma}_x \sin\theta \cos\theta$$

Siendo $\bar{\sigma}_x$ el valor medio de la tensión longitudinal, θ el ángulo de orientación de las fibras, y γ_{12} la deformación tangencial medida experimentalmente.

No obstante, hay que hacer notar que la solución usada para corregir los valores experimentales no corresponde al problema real, por lo tanto se está induciendo un error al aplicar dicha corrección.

Por otra parte, Pindera y Herakovich realizaron una serie de ensayos usando unas mordazas que permitan el giro, obteniendo que aparecían grandes errores en los valores aparentes y corregidos de G_{12} para ángulos de orientación de las fibras pequeños (menores de 15°). Esta circunstancia entra en contradicción con los resultados de Rizzo, siendo los valores que aparecen del error incluso mayores que los que se prevén del análisis numérico para el caso de extremos empotrados.

Todos estos hechos condujeron a la necesidad de realizar un estudio comparado de los resultados del problema bajo distintos tipos de sustentación [4]. Por otro lado, también queda por resolver el problema de la obtención de un método de corrección congruente. Es decir, basado en la solución de un problema cuyas condiciones de contorno reproduzcan de manera más fiable la realidad. Esto, evidentemente, sólo se puede realizar mediante un análisis numérico.

Cañas, París y Marín [4] han abordado dicha labor, obteniendo un método de corrección basado en la solución numérica cuya aplicabilidad ha sido estudiada mediante análisis paramétrico. Dicho método será utilizado en el presente trabajo para corregir los resultados experimentales obtenidos de una serie de ensayos, los cuales han sido realizados en orden a poner de manifiesto la bondad del método propuesto.

2.- ANALISIS NUMERICO

En la referencia [4] se expone un estudio comparado de los resultados correspondientes a distintas condiciones de contorno realizado mediante análisis de elementos finitos. De él se deduce que las conclusiones de Rizzo se ven respaldadas en cuanto a que el factor dominante es el impedimento del giro de los extremos. Y por otra parte, se observa una contradicción total con los resultados experimentales de Pindera y Herakovich, los cuales resultan inexplicables si los ensayos se hicieron exactamente como son descritos en la referencia [3].

Por tanto, parece conveniente contrastar estos resultados con valores experimentales, y comprobar como de ajustados son los valores que produce la aplicación del método de corrección propuesto en la referencia [4].

3.- METODO DE CORRECCION

Este método se basa en corregir el valor aparente G_{12}^* con un factor deducido a partir de la solución numérica del problema, con un modelado correcto de las condiciones de contorno supuestas. Evidentemente esto no sería viable desde un punto de vista práctico si hubiese que resolver cada problema en concreto numéricamente. Pero sin embargo, se ha demostrado, a través de un estudio paramétrico, que para el rango normal de los valores de E_{11} , E_{22} y ν_{12} del compuesto grafito-epoxi, la curva que representa el factor de corrección G_{12}/G_{12}^* en función de γ_{12}/ϵ_0 es invariante (también pueden obtenerse unas curvas similares en las que γ_{12} esté adimensionalizado con ϵ_x en vez de ϵ_0 , que son la deformación longitudinal en el centro de la probeta y la media respectivamente, obteniéndose ϵ_x directamente de una de las bandas colocadas en la probeta). De manera que, fijada una relación de aspecto geométrico ($L/2h$), y un ángulo de orientación de las fibras (θ), tenemos una curva que nos da el factor de corrección a aplicar en función de las deformaciones medidas en un ensayo (ϵ_x o ϵ_0 y γ_{12}). En la figura 1 se muestran las curvas mencionadas para una relación $L/2h$ de 10.

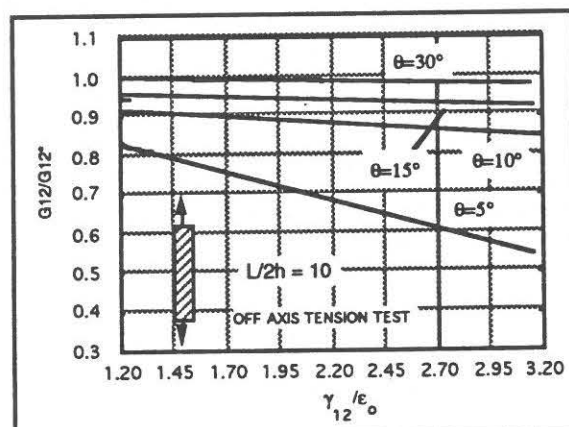


Fig.1.- Gráficos de corrección para distintos ángulos de orientación de las fibras.

4.- INVESTIGACION EXPERIMENTAL

Con el fin de chequear la aptitud del método corrector se procedió a realizar la caracterización de un laminado unidireccional de grafito-epoxy, compuesto por 12 láminas, con denominación AS-4/3501-6 fabricado por HTC.

En primer lugar se realizaron ensayos de tracción sobre probetas con orientación de las fibras a 0° y 90° para determinar los valores de E_{11} , E_{22} y ν_{12} con arreglo a la norma ASTM D 3039-76(89), disponiendo en el centro de las probetas bandas extensométricas MM CEA-06-125 UT-350. Obteniéndose los siguientes resultados:

$E_{11}=151.5$ GPa ; $E_{22}=13.67$ GPa ; $\nu_{12}=0.343$ que estaban dentro del rango de invariancia de los gráficos de corrección. (100 GPa $< E_{11} < 160$ GPa ; 6 GPa $< E_{22} < 20$ GPa ; $0.2 < \nu_{12} < 0.4$).

Posteriormente se efectuaron una serie de ensayos Off-Axis sobre probetas con ángulo de orientación de las fibras de 10° y con valor de la relación de aspecto geométrico $L/2h=6$. Para ello se emplearon rosetas MM WK-06-060WR-350 compuestas de tres bandas dispuestas a 0° , 45° y 90° , con objeto de poder determinar γ_{12} en el centro de las probetas así como el valor de ϵ_x . El valor aparente τ_{12}^* se obtuvo a partir de la medida de la fuerza aplicada, que nos aporta la máquina de tracción, y de las dimensiones geométricas de la probeta.

Para conocer el verdadero valor G_{12} se efectuaron ensayos con orientación de fibras a 30° , ya que para este ángulo el factor corrector es prácticamente igual a 1 para toda relación $L/2h$. Los resultados obtenidos para una relación $L/2h = 6$ se muestran en la figura 2 junto con la curva numérica correspondiente a $G_{12}=5.5$ GPa

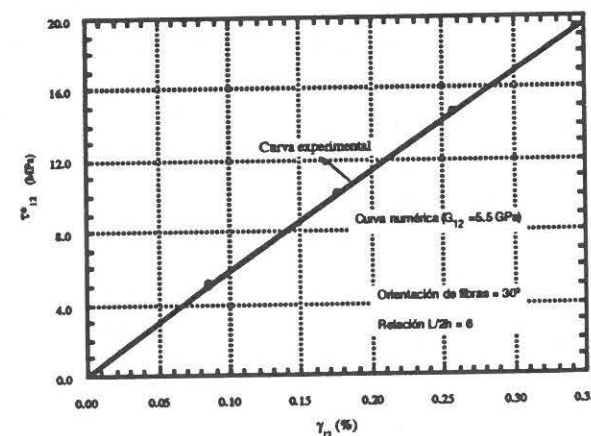


Fig. 2.- Resultados de los ensayos para ángulo de 30° y $L/2h = 6$.

Dado el perfecto acuerdo existente entre la curva numérica y la experimental se puede tomar como valor real $G_{12}=5.5$ GPa

Del mismo modo, podemos representar los resultados correspondientes a los ensayos para las probetas con ángulo de orientación de las fibras de 10° (Figura 3).

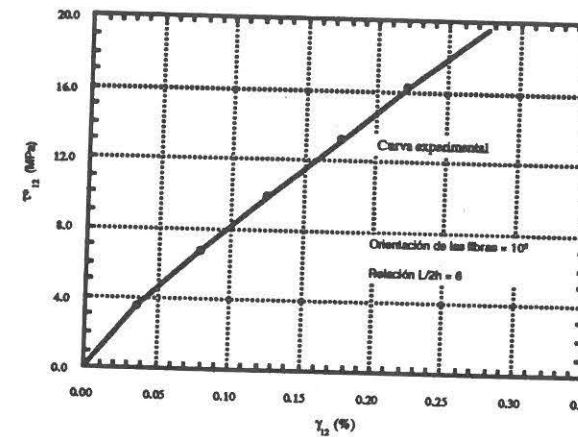


Fig. 3.- Resultados de los ensayos para ángulo de 10° y relación $L/2h = 6$.

Entrando con el valor de las deformaciones medidas en el gráfico corrector correspondiente (Figura 4) se obtiene el factor a aplicar al G_{12}^* .

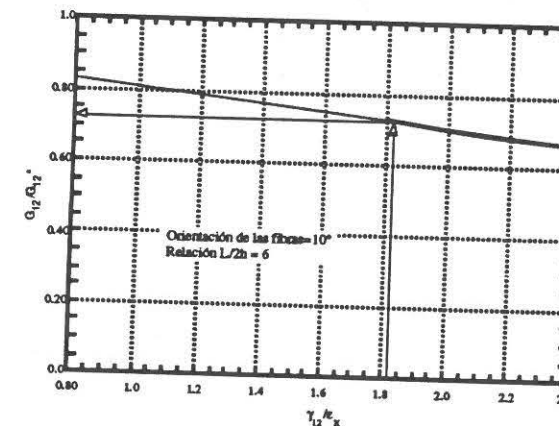


Fig. 4.- Gráfico corrector para 10° ($L/2h=6$).

En concreto, para los resultados de los ensayos realizados tenemos un $\gamma_{12}/\epsilon_x=1.82$, al que corresponde un factor de 0.73, que aplicado al valor aparente $G_{12}^*=7.88$ GPa produce un G_{12} corregido de 5.7 GPa. Es decir, existe una diferencia del 3.6% entre el valor admitido como bueno y el calculado sobre la probeta de 10° con el método que se propone.

5.- CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto el buen comportamiento del método de corrección propuesto si todas las variables de gobierno son acordes con la simulación numérica realizada pudiéndose emplear éste incluso para relaciones $L/2h$ pequeñas.

Conviene también resaltar que el método propuesto resulta efectivo siempre y cuando los experimentos reproduzcan las condiciones simuladas, es decir, impedimento de giro y acortamiento en los

extremos de la probeta (aunque esta última condición tiene relativa poca influencia).

En otros ensayos realizados sobre idénticas probetas, y con diversas relaciones $L/2h$, se puso de manifiesto que el sistema de cojida de mordazas (tipo cuña) no asegura siempre que la probeta no gire desconociéndose en general el valor de dicho giro. En orden a precisar y cuantificar dicho efecto, se está en proceso de aplicar la técnica de interferometría de moiré en las proximidades de las mordazas para obtener así el verdadero campo de desplazamientos que se origina en dicha zona.

Por otro lado, hay una gran cantidad de parámetros (orientación de las fibras diferente a la nominal, descentramiento de la probeta, tamaño finito de la roseta de medida, desviación de la roseta respecto a la posición central, etc..) que en cierta medida pueden falsear los resultados encontrados. A tal efecto, se está realizando un estudio paramétrico de tipo numérico acerca de la influencia de tales parámetros.

6.- REFERENCIAS.

- Pagano, N.J. and Halpin, J.C. "Influence of End Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies". J. Comp. Mat., vol. 2, pág. 18, N° 1, 1968.
- Rizzo, R.R. "More on the Influence of End Constraints on Off-Axis Tensile Test". J. Comp. Mat., vol. 3, pág. 202, April 1969.
- Pindera, M.-J. and Herakovich, C.T. "Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test". Exp. Mech., vol. 26, pág. 103, March 1986.
- Cañas, J., París, F. y Marín, J.C. "Numerical Analysis of Off-Axis Tension Test for Unidirectional Graphite-Epoxy Composites" VIII ICCM Comp. Design, Manufacture and Application, vol. IV (Section 30-39), pág. 36-F Julio 1991.

AGRADECIMIENTOS :

Este trabajo ha sido financiado con cargo a CICYT con el proyecto Número MAT-88-0747-C03-01.

Los autores del trabajo desean expresar su agradecimiento a D. Antonio Cañas por la colaboración en la realización de los ensayos. Así mismo, expresan su reconocimiento a HTC (High Technology Composites) que fabricó las probetas.