

INFLUENCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL G_{12} DE LAS IMPRECISIONES DE LOS PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL ENSAYO OFF-AXIS

Marín Vallejo J.C.¹; Cañas Delgado J.¹; París Carballo F.¹

¹ Dpto. Mecánica de Medios Continuos. E.T.S. Ingenieros Industriales de Sevilla
Avd. Reina Mercedes s/n. 41012 Sevilla. Tfno: 95-4557001. Fax: 95-4239888

Resumen: En el presente trabajo se muestra un estudio mediante análisis numérico de la influencia de las desviaciones, respecto a los valores nominales, de los parámetros del ensayo Off-Axis. Los factores que más afectan a la correcta evaluación de G_{12} se encontró que eran el ángulo de orientación de las fibras y las condiciones de contorno.

Abstract: A numerical study of the influence on the shear modulus value of a deviation, in relation to the nominal values, in the different parameters involved in the Off-Axis tension test is presented. The fiber orientation angle and boundary conditions has been found to be the most important parameters affecting the correct evaluation of G_{12} .

1.- INTRODUCCIÓN.

El ensayo de tracción Off-Axis es uno de los métodos empleados más extendidos para la evaluación del módulo de cizalladura intralaminar G_{12} , debido a que cumple dos condiciones esenciales para ser considerado un ensayo de aceptación generalizada: la facilidad en la preparación de la probeta y la sencillez de realización del ensayo.

No obstante, es bien conocido que los resultados de dicho ensayo comportan ciertos errores debidos a la influencia de las restricciones en los extremos.

La tendencia más desarrollada en el intento de solventar los mencionados problemas consiste en la aplicación de factores de corrección sobre los resultados aparentes que proporciona directamente el ensayo. En esta línea se enmarcan por una parte el factor de corrección analítico propuesto por Pindera y Herakovich (Pindera y Herakovich, 1986) basado en la solución de un problema aproximado, y por otra parte el método de corrección propuesto por Cañas, París y Marín (Cañas et al., 1991) basado en la solución numérica del problema con condiciones de contorno de empotramiento en los extremos de la probeta, que es la esperada en una máquina de ensayos.

No obstante, los métodos mencionados precisan que se satisfagan ciertas condiciones de contorno y/o configuraciones geométricas para asegurar una evaluación ajustada de G_{12} . Esta afirmación queda sustentada por la investigación experimental llevada a cabo por los autores (Marín et al., 1993)(París et al., 1993) en relación con la aplicación del factor de corrección propuesto, observándose a su vez la existencia de una serie de parámetros cuya variación afecta a los resultados del ensayo.

En este trabajo se analiza la influencia de la falta de precisión en dichos parámetros, para determinar cuáles de ellos requieren un control preciso.

2.- EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA.

Las medidas experimentales de un ensayo Off-Axis permiten directamente evaluar el módulo de cizalladura intralaminar aparente G_{12}^* , que se define como:

$$G_{12}^* = \frac{F}{A \gamma_{12}} \sin\theta \cos\theta \quad (1)$$

donde F es la carga aplicada, A es el área de la sección transversal, γ_{12} es la deformación angular evaluada a partir de las medidas de las bandas en el centro de la probeta, y θ es el ángulo de orientación de las fibras.

El valor de G_{12}^* coincide con el valor real G_{12} del material cuando el ensayo se realiza bajo condiciones de sustentación ideal (simplemente apoyada y carga uniforme en los extremos). Sin embargo, dicha configuración ideal no es fácil de reproducir en la práctica por lo que existe discrepancia entre los valores de G_{12}^* y G_{12} .

Dado que la condición de empotramiento de los extremos es a primera vista la más habitual, se eligió la misma para ser modelada en el análisis numérico del que se obtuvo la solución utilizada para corregir el valor aparente. Evidentemente, el valor de G_{12} final obtenido utilizando dicha corrección no tendrá error si la configuración real del ensayo está bien modelada en el mencionado análisis. Sin embargo, existe un número considerable de parámetros asociados al ensayo que pueden alterar dicha configuración, como son: la colocación de la roseta de medida y su tamaño, la relación de aspecto geométrico, el ángulo de orientación de las fibras, y las condiciones de contorno. Para evaluar la influencia de estos parámetros se desarrolló un estudio mediante análisis numérico del efecto causado por una desviación en sus valores sobre los resultados del ensayo.

3.- ESTUDIO DE LA DESVIACIÓN EN LOS PARÁMETROS CON RESPECTO A SUS VALORES NOMINALES.

Como se ha avanzado en el apartado anterior, existe un número considerable de parámetros asociados al ensayo en sí. Dichos parámetros pueden afectar por un lado a los valores experimentales obtenidos, como por ejemplo la colocación errónea de la roseta de medida, o bien tener influencia sobre el gráfico corrector a emplear, como por ejemplo el considerar un aspecto geométrico (L/2h) diferente al que realmente tiene la probeta. La influencia de algunos parámetros ha sido estudiada en trabajos precedentes (Cañas et al., 1991), donde se obtuvo que considerar unas propiedades erróneas (E_{11} , E_{22} y ν_{12}) no tenía prácticamente influencia.

	Propiedades mecánicas (GPa)	Tamaño de la roseta	Orient. de la roseta	Relación aspecto geom. L/2h	Angulo de orientación de las fibras	Condiciones de contorno	
Config. Ref. / Val. nom.	$E_{11}=151.5$ $G_{12}= 5.5$	γ_{12} en el centro de la probeta	Angulo desv. 0°	5 y 10	15°	Extremos empotrados	Simpl. apoyada
Rango de var.	$100 \leq E_{11} \leq 160$ $3.45 \leq G_{12} \leq 6.2$	± 6 mm direcc. transv.	Angulo desv. $\pm 5^\circ$	Variación longitud $\pm 2h$ (12.7 mm)	Angulo desviación $\pm 2^\circ$	Porcentajes de empotram. 20 + 100 %	Excent. $0=2.5$ mm

Tabla 1 - Resumen de los parámetros analizados.

Con el fin de evaluar el efecto producido por la desviación respecto de los valores nominales de tales parámetros, se ha realizado un estudio pormenorizado mediante M.E.F. empleando un modelo compuesto por 500 elementos (2D isoparam. solid, STIF 42, ANSYS 4.4A) con 1122 grados de libertad, dispuestos en una malla regular de 10x50. Así mismo, se probaron discretizaciones más finas no encontrándose variaciones significativas en los resultados.

Para este estudio numérico se tomaron unas propiedades mecánicas de referencia, correspondientes a un compuesto de grafito-epoxy de denominación AS4/3501-6, de valores: $E_{11}=151.5$ GPa; $E_{22}=13.67$ GPa; $\nu_{12}=0.343$; $G_{12}=5.6$ GPa.

A modo de resumen, en la tabla 1 se recogen los distintos parámetros considerados en el estudio, sus valores nominales y los rangos de variación analizados en cada caso.

3.1. - Influencia del tamaño y orientación de la roseta de medida.

Para la evaluación de la deformación tangencial en el punto central de la probeta se usa habitualmente una roseta con tres bandas extensométricas (MM WA-13-060WR-120 ó WK-06-060WR-350), la cuál tiene un tamaño relativamente pequeño (aproximadamente 3×3 mm²). No obstante, teniendo en cuenta también el pequeño ancho que el espécimen puede llegar a tener y la no uniformidad del campo de deformaciones, podría aparecer una cierta discrepancia entre el valor medio medido y el correspondiente al punto central, si la variación de γ_{12} en la zona ocupada por la roseta fuera considerable. En orden a determinar el error que cometemos al usar el valor experimental se evaluó numéricamente la variación, en la línea media transversal y longitudinal, de la relación entre γ_{12} en cada punto y γ_{12} en el punto central para la configuración de referencia del problema con condición de contorno de empotramiento, obteniéndose que la influencia de tal efecto es prácticamente despreciable en la zona ocupada por la roseta.

Por cuanto refiere a la orientación de la roseta, en el proceso de pegado de las bandas es posible que se produzca una inadvertida desviación angular, la cuál sin embargo tiene una escasa influencia en base al estudio realizado. Así, para una desviación de $\pm 1^\circ$ el valor alcanzado por el error es menor de un 1%. Por lo tanto, de lo visto se desprende que pequeños errores en el ángulo de la roseta no deben influir sensiblemente en los resultados.

3.2. - Influencia de la relación de aspecto geométrico.

La relación de aspecto geométrico del espécimen ($L/2h$) puede variar debido a una colocación incorrecta entre las mordazas que produjera una cierta desviación en la longitud de medida (L). Normalmente esta desviación es positiva, puesto que la configuración habitual de las mordazas suele introducir una mayor longitud libre del espécimen.

Si bien es verdad que los va-

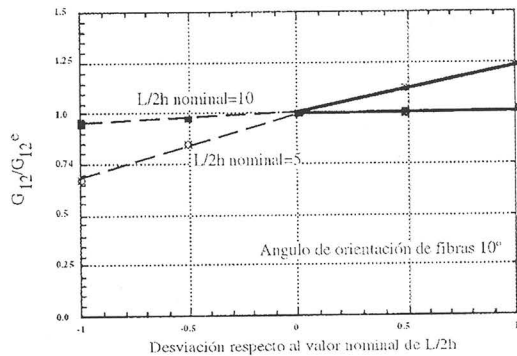


Figura 1.- Variación de G_{12}^e/G_{12}^c frente a la desviación en la relación de aspecto.

lores obtenidos del ensayo son los que se corresponden con la relación $L/2h$ existente, puede cometerse un error al usar el gráfico corrector correspondiente ya que éste es diferente para cada relación de aspecto geométrico y ésta puede que no sea la nominal supuesta.

En la Fig. 1 se ha representado la variación de G_{12}^*/G_{12}^c frente a la desviación en el valor de $L/2h$ respecto de sus valores nominales para los dos casos analizados ($L/2h=5$ y $L/2h=10$) donde G_{12}^c sería el valor obtenido al usar el gráfico incorrecto. En dicha figura podemos observar varios hechos: el importante incremento del error con la desviación en la relación de aspecto, y la mayor influencia de la desviación en el caso de probetas cortas ($L/2h=5$ en nuestro caso).

3.3. - Influencia de la desviación del ángulo de orientación de las fibras.

Un parámetro que habitualmente se supone como prefijado en la realización de un ensayo es el ángulo de orientación de las fibras. Sin embargo, es bastante difícil asegurar que no se haya producido ninguna desviación en la medida de dicho ángulo bien durante la fabricación del panel, bien en la elaboración del espécimen o bien en la colocación.

El objetivo de este estudio es la evaluación de la influencia en el valor de G_{12}^* de una desviación de $\pm 2^\circ$ en el ángulo de orientación de las fibras respecto de su valor nominal (10°).

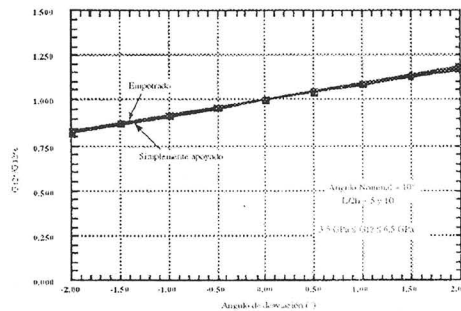


Figura 2.- Variación de G_{12}^*/G_{12}^c frente al ángulo de desviación de las fibras.

El valor del módulo de cizalladura aparente (G_{12}^*), fue calculado a partir del ángulo efectivo θ de cada problema y el correspondiente $\gamma_{12} = \gamma_{12}(\theta, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy})$ donde $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$ son las deformaciones en el punto central del espécimen. Este valor de G_{12}^* fue comparado con el valor incorrecto del módulo de cizalladura aparente G_{12}^c que resulta de suponer que el ángulo de orientación de las fibras fuera igual al nominal (10°).

En la Fig. 2 se muestra la variación de la relación G_{12}^*/G_{12}^c frente al ángulo de desviación de las fibras, observándose varios hechos:

- La igual tendencia de los gráficos para las dos condiciones de contorno analizadas y para las dos relaciones de aspecto geométrico de referencia. Por lo tanto, la magnitud del error es independiente del valor de la relación de aspecto utilizada y del tipo de condición de contorno considerada.

- Una pequeña desviación (positiva o negativa) en el ángulo de orientación de las fibras conduce a un considerable error en el valor de G_{12}^* .

- La magnitud del error también es independiente del valor de G_{12} del material para valores de éste comprendidos en el rango estudiado ($3.5 \text{ GPa} \leq G_{12} \leq 6.5 \text{ GPa}$).

3.4. - Influencia de la alteración de las condiciones de contorno.

La utilidad de los gráficos correctores propuestos en la ref. (Cañas et al., 1991), está

supeditada a que durante el ensayo se den las condiciones de empotramiento supuestas en el modelo numérico. Este hecho no necesariamente ocurre y, por tanto, ha sido considerado de interés estudiar aquí la influencia que pueden tener las modificaciones en las condiciones de contorno de referencia sobre los resultados.

3.4.1. - Simplemente apoyado con carga excéntrica.

Las modificaciones de la condición de simplemente apoyado, analizadas en este caso, consisten bien en una traslación lateral de los soportes a una cierta distancia d de la posición del eje longitudinal, o a un descentramiento no simétrico respecto al eje de la probeta. Estas situaciones podrían aparecer en el caso de emplear mordazas que permitan el giro debido a defectos de colocación de la probeta o defectos de la mordaza.

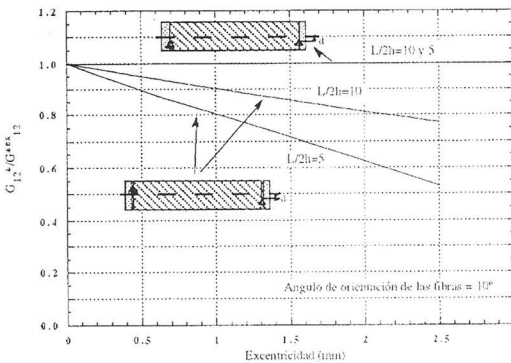


Figura 3.- Variación de G_{12}^{*}/G_{12}^{*ec} frente al valor de la excentricidad.

Para este estudio, se analizó la configuración del problema modificado para valores de la excentricidad d variando entre 0 y 2.5 mm, evaluándose el módulo de cizalladura aparente G_{12}^{*ec} correspondiente a cada problema. En la Fig. 3 se muestra la variación de G_{12}^{*}/G_{12}^{*ec} frente al valor de la excentricidad, siendo G_{12}^{*} el resultado sin excentricidad.

Se puede observar que para la primera modificación, el valor de G_{12}^{*} no se ve alterado por la excentricidad de los soportes, la razón de ello es que el estado tensional en el centro de la probeta es cero cuando actúa el momento flector resultado de trasladar la carga al centro de la cara.

Para el segundo caso, se observa una fuerte influencia de la excentricidad que se manifiesta más notoriamente a medida que la relación $L/2h$ disminuye. Ello es consecuencia de que el esfuerzo cortante generado aumenta a medida que disminuye la relación $L/2h$.

3.4.2.- Empotramiento parcial.

En este apartado se estudiarán dos tipos de condiciones de contorno modificadas, asimétrica y simétrica respecto del centro del espécimen.

La condición de empotramiento parcial simétrica fue considerada porque puede representar la condición real producida por una falta de uniformidad en el espesor del espécimen. La configuración de dicha modificación se modeló para valores del porcentaje de empotramiento (% de longitud empotrada respecto al ancho de la probeta) variando entre 20 y 100, calculándose el valor del módulo de cizalladura aparente (G_{12}^{*pc}) correspondiente a cada porcentaje. Se comparan en la Fig.4 los valores de G_{12}^{*pc} con el G_{12}^{*} del problema con empotramiento total (100%) para $L/2h=10$ y 5

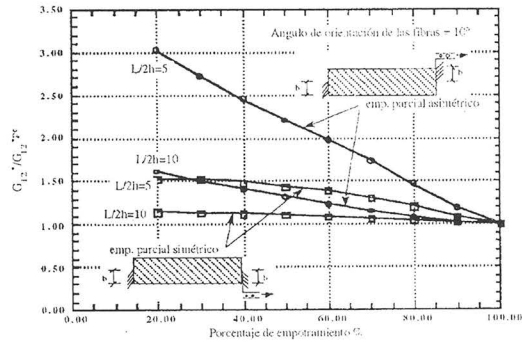


Figura 4.- Variación de G_{12}^*/G_{12}^{*pc} frente al porcentaje de empotramiento.

Se observa que el error cometido al suponer que existe una condición de empotramiento total, cuando la configuración actual del ensayo produce un empotramiento parcial aumenta cuando el porcentaje de empotramiento disminuye, siendo dicho error mayor a medida que disminuye la relación $L/2h$.

Para el segundo tipo de modificación se llevó a cabo un estudio similar (Fig. 4), observándose que la tendencia del error es la misma que en el primer caso, aunque la magnitud del mismo es bastante mayor en este último. En ambos casos se analizó también la dependencia del valor de G_{12} del material encontrándose una escasa influencia.

4.- CONCLUSIONES.

Como resumen de este estudio puede concluirse que hay dos parámetros que tienen gran influencia sobre el factor de corrección. Dichos parámetros son el ángulo de orientación de las fibras y las condiciones de contorno. Ambos parámetros deben ser cuidadosamente controlados para la obtención de una buena precisión en los resultados.

En cuanto a la relación $L/2h$, su influencia puede ser de cierta importancia cuando nos movemos alrededor de valores bajos de la misma, aunque su efecto no se traduce en un valor erróneo del módulo de cizalladura aparente sino en el empleo de un gráfico corrector inadecuado.

AGRADECIMIENTOS. Esta investigación ha sido financiada por el CICYT dentro del proyecto MAT-94-0480.

5.- REFERENCIAS.

- 1 - Cañas J., París F. and Marín J.C., *Numerical Analysis of Off-Axis Tension Test for Unidirectional Graphite-Epoxy Composites*, Proceedings of ICCM VIII, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 36F1-36F12, July 1991.
- 2 - Marín J.C., Cañas J. and París F., *On the Evaluation of G_{12} in the Off-Axis Tension Test*, Proceedings of ICCM 9, Madrid, Spain, Vol.VI, pp. 639-646, July 1993.
- 3 - París F., Cañas J., Marín J.C. and Morton J., *Deformation Studies in the Off-Axis Tension Test*, Proc. of 2nd International Conference on Deformation and Fracture of Composites, Manchester, UK, pp. 18.1-18.9, March 1993.
- 4 - Pindera M-J. and Herakovich C.T., *Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test*, Exp. Mech., pp. 103-112, March 1986.