

SOBRE EL USO DE DISPOSITIVOS DE MORDAZAS GIRATORIAS EN EL ENSAYO OFF-AXIS

Marín J.C.*; Cañas J.*; París F.*

* Dpto. Mecánica de Medios Continuos. E.S. Ingenieros
Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n. 41092 Sevilla, España
e-mail: paris@esi.us.es

Palabras Clave: "Off-axis", Mordazas giratorias, Elementos de Contorno, Contacto.

Resumen : *El ensayo de tracción "off-axis" es uno de los medios más simples para la evaluación del módulo de cortadura intralaminar en laminados unidireccionales, sin embargo es bien conocido que su realización práctica conlleva problemas asociados a la configuración de las mordazas de las máquinas de tracción. En este artículo se estudian los problemas que presenta la utilización de sistemas de mordazas giratorias, empleándose para ello un modelo numérico de elementos de contorno que incluye condiciones de contorno de contacto con fricción.*

1.- INTRODUCCION.

De entre los ensayos existentes para la evaluación del módulo de cizalladura intralaminar G_{12} en laminados unidireccionales de material compuesto, el denominado ensayo de tracción "off-axis" es uno de los métodos más extendidos por ser quizás el más simple. Sin embargo, es bien conocido que la realización práctica del ensayo bajo su configuración ideal (simplemente apoyado) presenta serias dificultades¹ asociadas a la configuración de las mordazas habituales en las máquinas de tracción (mordazas rígidas).

Han existido diversos intentos para paliar este problema, unos mediante el desarrollo de procedimientos de corrección de los resultados (analíticos² y numéricos³), y otros mediante la modificación de la configuración del ensayo para tratar de reproducir la configuración ideal experimentalmente. Entre estos últimos encontramos diversas tendencias, una consistente en la modificación de los refuerzos "tabs" que se pegan al especimen en los extremos⁴, y otra basada en el diseño de nuevos dispositivos de mordazas giratorias². Esta última solución parece "a priori" muy prometedora, no obstante los resultados experimentales obtenidos por Pindera y Herakovich² parecen indicar lo contrario.

El objeto de este trabajo es intentar dilucidar cuál puede ser la fuente de estas discrepancias, para lo que se ha realizado un análisis de la configuración empleada por Pindera y Herakovich usando un modelo de elementos de contorno del problema en cuestión.

2.- CONFIGURACION DE MORDAZAS DE PINDERA Y HERAKOVICH.

La configuración ideal del ensayo off-axis, que se muestra en la figura 1, supone la aplicación de una carga distribuida constante en los extremos de la probeta, la cuál da lugar a un estado uniforme de tensiones y deformaciones. La deformación angular constante que aparece supone que en la configuración deformada todas las secciones experimentan un giro. En particular, en las secciones extremas dichos giros junto con el acortamiento transversal deberían ser permitidos por el dispositivo de aplicación de carga, en orden a reproducir las condiciones de contorno del problema ideal (simplemente apoyado).

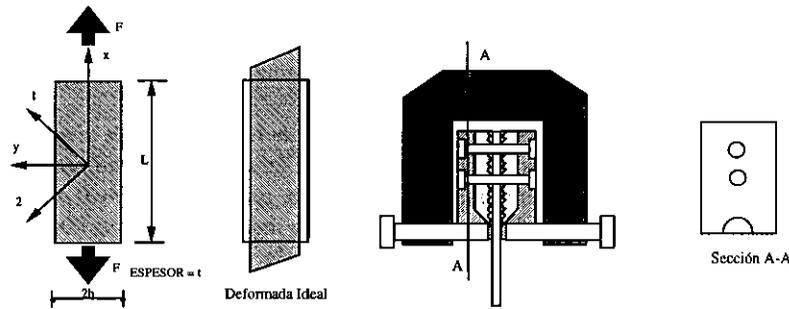


Figura 1.- Configuración ideal.

Figura 2.- Mordazas giratorias.

En este sentido, Pindera y Herakovich diseñaron unas mordazas especiales que trataban de permitir el giro de los extremos de la probeta, que es la condición dominante frente a la restricción del acortamiento transversal cuya influencia se puede despreciar⁵. En la figura 2 se muestra un esquema de estas mordazas. Dicho sistema de mordazas fue construido y empleado en una serie de ensayos con ángulos de orientación de las fibras de 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 75 y 90 grados, aplicándolo sobre probetas de un laminado de grafito/polyimida (Celion 6000/PMR-15). Los resultados que obtuvieron para los ensayos off-axis con ángulos de orientación $\leq 30^\circ$ resultan sorprendentes, ya que no sólo no se aproximaban al comportamiento del problema ideal, sino que los valores de G_{12} obtenidos presentaban errores (27.6% para 10°) muy superiores a los esperados incluso para una configuración empotrada (16% para 10°). A la vista de estos resultados los autores concluyeron que para ciertos materiales altamente anisótropos, como el empleado, la probeta a 10° no era una configuración práctica para la realización del ensayo off-axis, y que era necesario el empleo de altos valores de la relación de aspecto geométrico ($L/2h > 10$) para eliminar el efecto adverso de las restricciones en los extremos a la hora de evaluar el módulo de cizalladura intralaminar G_{12} .

3.- ANALISIS NUMERICO DE CONFIGURACIONES CON MORDAZAS DEL TIPO DE LAS EMPLEADAS POR PINDERA Y HERAKOVICH.

Con el fin de profundizar en las causas que pudieron motivar los valores del error en G_{12} encontrados por Pindera y Herakovich en sus ensayos con dispositivos de

mordazas giratorias, se ha llevado a cabo un estudio numérico del problema mediante un modelo de Elementos de Contorno (MEC), puesto que la naturaleza del problema implica la modelización de condiciones de contorno de contacto con fricción entre la mordaza y el eje de giro, para lo cuál se estima más adecuado el empleo del MEC. El programa empleado, que implementa el MEC y permite la consideración de materiales ortótropos y condiciones de contacto con fricción, ha sido verificado sobre problemas con solución analítica conocida⁶.

En la figura 3 se muestra un esquema del modelo confeccionado, el cuál consta de 7 cuerpos, de los cuales 6 son rígidos representando las dos mordazas (2, 3, 4 y 5) y los elementos de giro (1 y 6), y el cuerpo central representa la probeta de material ortótropo. Las dimensiones y propiedades mecánicas utilizadas para la probeta se tomaron del ensayo de 10° y ratio 10 realizado por Pindera y Herakovich.

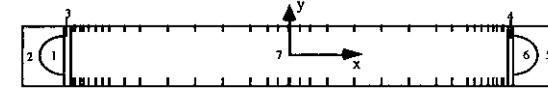


Figura 3.- Esquema del modelo MEC del problema.

Los ensayos se simularon aplicando un desplazamiento según el eje x al sólido N°6 y permaneciendo fijo el sólido N°1, estableciéndose el contacto en las interfaces de los cuerpos 1-2 y 5-6. El resto de interfaces representan uniones rígidas dentro de la propia mordaza y entre mordaza y probeta.

El modelo fue validado ejecutando la simulación de los casos extremos, es decir el caso ideal (con solución analítica conocida) que corresponde a un contacto con fricción nula entre eje y mordaza, y el caso empotrado (solución numérica MEC y MEF) que se corresponde con un contacto con fricción ∞ .

Los resultados de las distribuciones tensionales en el extremo para distintos valores del coeficiente de fricción se muestran en la figura 4.

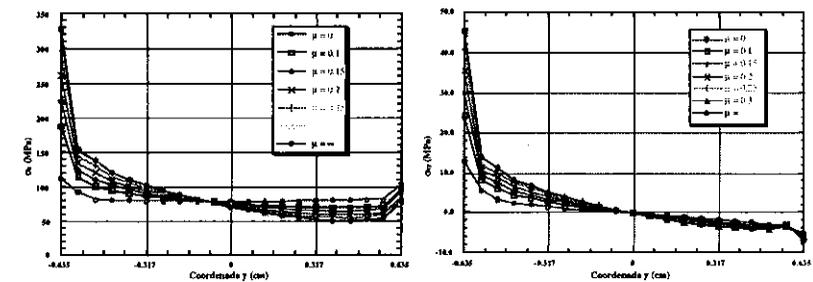


Figura 4.- Distribuciones de tensión en el extremo de la probeta.

A partir de estos resultados, integrando la distribución de σ_x obtenemos la carga aplicada F. Con este valor, el del área de la sección transversal A, el ángulo de orientación de las fibras θ , y la deformación angular γ_{12} en el centro de la probeta obtenida del análisis numérico, se evalúa el módulo aparente G_{12}^* como:

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

En la figura 5 se muestran los resultados del error en el valor aparente del módulo de cizalladura intralaminar G_{12}^* , así como la carga aplicada F y la excentricidad que presenta dicha resultante de cargas, para distintos valores del coeficiente de fricción.

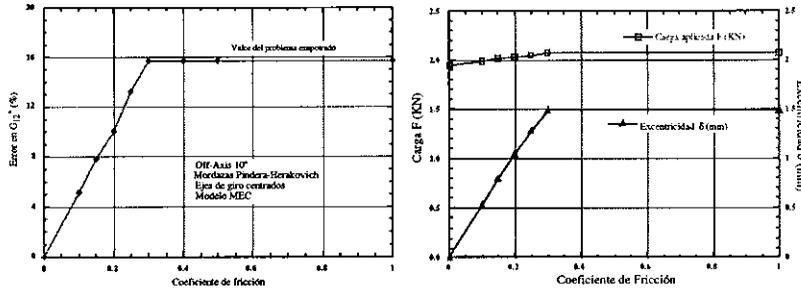


Figura 5.- Error en G_{12}^* , carga F y excentricidad δ frente al coeficiente de fricción.

Como se observa en la figura el efecto de la fricción en este tipo de mordazas contribuye a impedir el libre giro de los extremos, de forma que el aumento del coeficiente de fricción hace que se tienda hacia un comportamiento empotrado, que se alcanza para valores del coeficiente de fricción ≥ 0.3 . Por lo tanto, si bien la presencia de la fricción en el contacto afecta a los resultados del ensayo alejándolos del comportamiento ideal, su efecto no justificaría que este fenómeno por sí solo provoque errores en el valor aparente G_{12}^* superiores a los del caso empotrado.

Analizada la distribución de tensiones en el extremo de la probeta (figura 4), se advirtió que se producía un descentramiento de la resultante de cargas en dirección longitudinal, tal como se esquematiza en la figura 6(a) y se cuantifica en la figura 5. Dicha configuración excéntrica de la carga aplicada da lugar a unos momentos en los extremos como los representados en la figura 6(b), los cuales llevan el mismo sentido que los producidos por el empotramiento de los extremos.

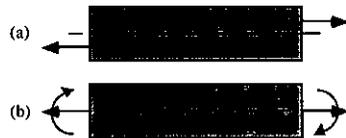


Figura 6.- Esquema de cargas excéntricas.

A la vista del efecto provocado por una configuración de cargas excéntrica del tipo mostrado anteriormente, nos planteamos la posibilidad de que ese tipo de configuraciones pudiera dar lugar a errores en el valor aparente G_{12}^* superiores a los del caso empotrado, ya que a igualdad de carga aplicada el aumento de la

excentricidad produciría mayores momentos en los extremos. Tales momentos inducirían una deformación angular más pequeña del espécimen con respecto a la deformación correspondiente a la configuración ideal, de manera que el cociente $\sigma_{12}^*/\gamma_{12}$ aumenta.

Este tipo de configuración expuesta podría producirse en la práctica por varias circunstancias entre las que cabe contar, además de la fricción en el contacto antes considerada, la excentricidad del dispositivo de mordazas, la colocación girada de la probeta, desviaciones respecto del valor nominal en el ángulo de orientación de las fibras, o bien alguna combinación de las anteriores.

3.1.- Influencia de la excentricidad.

En primer lugar se ha analizado el efecto aislado de la excentricidad. Para ello se ha modificado el modelo previo mediante un descentramiento de los ejes de giro de las mordazas (Figura 7), empleándose un coeficiente de rozamiento nulo.



Figura 7.- Esquema del modelo modificado.

Los resultados obtenidos para diversos ángulos de orientación de las fibras se muestran en la figura 8, donde se representa el error del valor aparente G_{12}^ frente a la excentricidad del dispositivo.

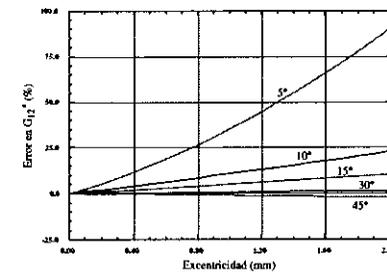


Figura 8.- Variación del error en G_{12}^* con la excentricidad.

Como se observa en la figura el efecto de la excentricidad influye de manera considerable sobre el valor de G_{12}^* para ángulos menores de 15° cuando se usa este tipo de mordazas, llegándose a alcanzar errores en el valor aparente superiores al del caso empotrado. No obstante, los valores de la excentricidad a los que hay que llegar para alcanzar errores del orden de los obtenidos por Pindera y Herakovich en sus ensayos parecen excesivos (2 mm) para las tolerancias que podemos considerar razonables para un dispositivo de este tipo.

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

En cuanto a la desviación angular, se ha analizado el efecto producido por distintos valores de la desviación en el ángulo de orientación de las fibras con respecto al valor nominal, para una orientación nominal de 10° y un ratio de $L/2h = 10$. En cada caso se ha calculado el valor del módulo de cizalladura aparente G_{12}^* , para lo cual se ha empleado el ángulo efectivo de cada configuración θ y el correspondiente γ_{12} :

$$\gamma_{12} = \gamma_{12}(\theta, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}) \quad (2)$$

donde ε_x , ε_y , ε_{xy} son los valores de las deformaciones en el punto central del espécimen. El valor incorrecto del módulo de cizalladura aparente G_{12}^{*e} resulta de suponer que el ángulo de orientación de las fibras es igual al nominal (10°), pudiéndose evaluar con la expresión:

$$G_{12}^{*e} = \frac{\sigma_{12}^e}{\gamma_{12}^e} = \frac{-\frac{F}{A} \sin 10^\circ \cos 10^\circ}{\gamma_{12}(10^\circ, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy})} \quad (3)$$

En la figura 9 se muestra la variación del error en G_{12}^* en función de la desviación angular respecto del ángulo de orientación nominal.

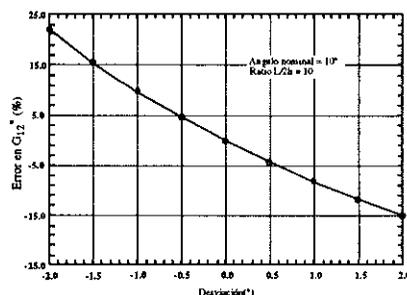


Figura 9.- Variación del error en G_{12}^* con la desviación angular.

Como se puede observar, las desviaciones en el ángulo de orientación de las fibras tienen gran influencia sobre el valor de G_{12}^* . No obstante, los valores de la desviación angular a los que hay que llegar, para alcanzar errores del orden de los encontrados por Pindera y Herakovich, han de estar por encima de $\pm 2^\circ$, lo que resulta una desviación apreciable tanto para lo que sería un error en la colocación de la probeta como para un error en la fabricación de la misma.

3.3.- Consideración de efectos combinados.

En vista de que ninguno de los fenómenos considerados individualmente parece suficiente para justificar los resultados experimentales obtenidos por Pindera y

Herakovich, se han analizado los efectos producidos por configuraciones que combinan estos fenómenos anteriormente expuestos.

En primer lugar, se ha analizado la acción conjunta de la excentricidad y la fricción. Para ello, se analizó el problema de ángulo 10° empleando el modelo con ejes de giro excéntricos, para distintos valores del coeficiente de fricción y para un rango de excentricidades desde 0 hasta 2 mm. En la figura 10(a) se representa el error en el valor aparente G_{12}^* frente a la excentricidad para diferentes valores del coeficiente de fricción.

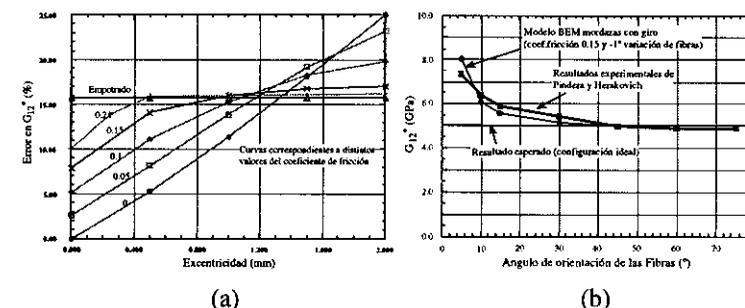


Figura 10.- (a) Evolución del error en G_{12}^* con la excentricidad y con la fricción, (b) Efecto conjunto del error angular y la fricción sobre el valor de G_{12}^* .

Como se observa en la figura 10(a) la presencia de la fricción juega un papel importante cuando nos movemos en un rango de valores de la excentricidad muy pequeños, es decir una pequeñísima desviación de los ejes de giro del dispositivo de mordazas (0.5 mm) para un coeficiente de fricción de 0.15 nos conducirían a un error del 14% en el valor de G_{12}^* . Por el contrario, en el caso de valores de la excentricidad en el rango de 1 a 2 mm, se aprecia que cuanto menor es la fricción se alcanzan errores más elevados con el aumento de la excentricidad. En consecuencia, al igual que ocurría al considerar solamente el efecto de la excentricidad, hemos de llegar a valores de la excentricidad en torno a 2 mm para alcanzar errores en G_{12}^* alrededor del 25%, por lo que la combinación de efectos analizada no parece probable que fuera la responsable de la aparición de los errores encontrados.

La otra combinación de fenómenos considerada ha sido la conjunción de la desviación en el ángulo de las fibras respecto de la orientación nominal con la fricción en el contacto entre eje y mordaza. Dicha configuración se ha analizado para diversos ángulos de orientación nominal (5, 10, 15, 30, 45, 60 y 75 grados) y para un coeficiente de fricción $\mu = 0.15$, en el supuesto de que existe un error angular de -1° respecto al nominal. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 10(b), donde se comparan con los resultados experimentales de Pindera y Herakovich².

Como se observa en la figura 10(b), la tendencia que presentan los resultados experimentales y numéricos es muy similar, apreciándose en estos últimos como la unión de los dos fenómenos considerados da lugar a errores superiores a la suma de los que producen cada uno por separado. Así, para una orientación nominal de 10° se obtiene un error del 21.14%, siendo los errores producidos por la desviación angular (-1°) y por la fricción ($\mu = 0.15$) de un 9.79% y un 8% respectivamente. Por lo tanto,

es posible que la configuración real del ensayo pudiera aproximarse a una similar a la considerada en el análisis presentado.

4.- CONCLUSIONES.

De los resultados expuestos se deduce que los dispositivos de mordazas que intentan permitir el giro, como el empleado por Pindera y Herakovich en sus ensayos, resultan extremadamente sensibles a los fenómenos considerados (contacto con fricción, excentricidad de la carga y error en el ángulo de orientación de las fibras), requiriendo un control riguroso tanto en la fabricación del dispositivo, en orden a asegurar el centrado de los ejes, como en su disposición en la máquina de ensayos. Así mismo, se habría de poner un especial cuidado tanto en la elaboración de la probeta como en su colocación en el dispositivo de mordazas.

En relación a los resultados experimentales obtenidos por Pindera y Herakovich, hemos de decir que, aunque no se puede afirmar con rotundidad sin un conocimiento directo del dispositivo de ensayo, el comportamiento tan similar encontrado para la configuración que incluye los efectos de la fricción y de la desviación angular respecto de la orientación nominal, analizada numéricamente, parece indicar que es muy probable que la conjunción de estos dos fenómenos pudiera ser la fuente que originara los elevados valores del error observados en G_{11} para los ensayos con orientaciones nominales menores de 30° , lo que en cualquier caso haría extremadamente complejo el uso práctico de un dispositivo como el analizado.

AGRADECIMIENTOS

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

5.- REFERENCIAS.

- [1] - Pagano N.J. and Halpin J.C., "Influence of End Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies", J. Composite Materials, Vol.2, No.1, pp. 18-32, 1968.
- [2] - 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.
- [3] - 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.
- [4] - Sun C.T. and Chung I., "An Oblique End-Tab Design for Testing Off-Axis Composite Specimens", Composites, Vol. 24, No. 8, pp. 619-623, 1993.
- [5] - Rizzo R.R., "More on the influence of End Constraint on Off-Axis Tensile Tests", J. Composite Materials, Vol.3, p. 202, April 1969.
- [6] - Blázquez A., París F. and Cañas J., "Frictional Contact Problems with Non-Conforming Discretizations using BEM", Proceedings of BEM XVI, Ed. Computational Mechanics Publications, Vol. 1, pp. 345-352, 1994.