

INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL EN LA CARACTERIZACIÓN A CORTADURA INTRALAMINAR MEDIANTE LA CONFIGURACIÓN DE TABS OBLICUOS DEL ENSAYO OFF-AXIS A 10°.

J.C. Marín, J. Cañas, F. París
Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla,
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla.
e-mail: jcmarin@esi.us.es

Palabras Clave: Módulo y Resistencia a Cortadura Intralaminar; Ensayo de Tracción Off-axis; tabs Oblicuos.

Resumen: En este trabajo se considera el ensayo de tracción off-axis bajo la configuración de tabs oblicuos como procedimiento para la caracterización a cortadura intralaminar, analizándose la influencia que las propiedades del material tienen sobre el ángulo de inclinación de los tabs, y sobre el valor de G_{12} que se obtendría del ensayo, en el supuesto de que se desconoce el valor de las propiedades del material antes de realizar el ensayo (situación que coincide con la realidad). Como consecuencia, se obtiene que la relación de aspecto geométrico $L/2h$ del espécimen y el cociente G_{12}/E_{11} son respectivamente los parámetros que controlan la evaluación ajustada del módulo de cortadura G_{12} y de la resistencia a cortadura S_{12} mediante esta configuración.

Abstract: Oblique end-tabs configuration of the off-axis tension test as a mean for the intralaminar shear characterization is considered in this work. The influence of the material properties on the oblique tab angle and on G_{12} measured value is analysed under the consideration that material properties are unknown values when the test is performed. As a consequence, it is obtained that aspect ratio $L/2h$ and G_{12}/E_{11} quotient are respectively the parameters that control the correct evaluation of shear modulus G_{12} and shear strength S_{12} by this test configuration.

1. INTRODUCCION

El ensayo de tracción off-axis es quizás la configuración más simple de los ensayos para la caracterización a cortadura en el plano de la lámina. Consiste en someter a tracción una probeta rectangular de un laminado unidireccional cuyas fibras están orientadas formando un cierto ángulo respecto a la dirección de la carga. Sin embargo, son bien conocidos los problemas asociados a la influencia sobre el estado tensional de las condiciones en los extremos. Para solventar tales problemas se han propuesto diferentes enfoques, los cuales se pueden clasificar en dos líneas de actuación. La primera consiste en la aplicación de

factores de corrección sobre los resultados directos del ensayo (Pagano & Halpin¹, Pindera & Herakovich², Cañas et al³), y la segunda línea consiste en la modificación de la configuración del ensayo en orden a obtener un estado de deformaciones uniforme aproximado al que correspondería a la configuración ideal. Entre los enfoques propuestos para tal fin destaca la propuesta de Sun & Chung⁴, que consiste en el empleo de unos tabs oblicuos cuya inclinación (ángulo que la línea de corte interior del tab forma con la dirección de la carga) coincida con las líneas de isodesplazamientos longitudinales correspondientes al problema ideal. Dicha configuración conduce a un estado tensional en la zona central del espécimen aproximadamente uniforme, como han confirmado los trabajos de Pierron & Vautrin⁵, Kawai et al⁶ y Pierron et al⁷, con los beneficios que ello reporta en cuanto a una determinación directa de G_{12} , y adicionalmente en cuanto a la posibilidad de evaluar la resistencia a cortante en el plano. En relación a esta última, hay que mencionar que esta configuración produce un estado que no es de tensión tangencial pura y por tanto no permite evaluar directamente la resistencia a cortadura, como han mostrado los mismos autores en un trabajo posterior⁸.

La principal dificultad que presenta este enfoque es el hecho de que el ángulo oblicuo con el que hay que confeccionar los tabs depende del valor de las propiedades del material a ensayar (que son en principio desconocidas). En consecuencia, es necesario estudiar la sensibilidad de G_{12} y de S_{12} evaluados mediante este procedimiento, frente a variaciones de las propiedades del material, las cuales determinan un valor del ángulo de inclinación de los tabs. El objeto del presente trabajo es la realización del estudio mencionado.

2.- CONFIGURACIÓN CON TABS OBLICUOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN OFF-AXIS A 10°

La configuración ideal del ensayo off-axis consiste básicamente en un espécimen rectangular de un laminado unidireccional cuyas fibras están orientadas formando un cierto ángulo θ respecto a la dirección longitudinal x , tal como se muestra en la figura 1(a), el cual se somete a una tensión uniforme σ en dirección longitudinal. En estas condiciones, las líneas de isodesplazamientos longitudinales son rectas inclinadas un ángulo ϕ respecto del eje x , viniendo dado dicho ángulo por la expresión⁴:

$$\cot \phi = -\frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{11}} \quad (1)$$

donde \bar{S}_{11} y \bar{S}_{16} son los coeficientes de flexibilidad, los cuales son función de las propiedades del material (E_{11} , E_{22} , G_{12} y ν_{12}) y del ángulo de orientación de las fibras θ . La configuración propuesta por Sun & Chung⁴ consiste en la utilización de unos tabs oblicuos que formen un ángulo ϕ respecto al eje x del espécimen (figura 1(b)), en orden a obtener una condición de contorno de desplazamientos constantes prescritos sobre los extremos, que ahora coinciden con líneas de isodesplazamientos longitudinales.

Como se desprende de la expresión (1), el valor del ángulo ϕ con el que hay que confeccionar los tabs depende del valor de las propiedades del material (E_{11} , E_{22} , G_{12} y ν_{12}) y del ángulo de orientación de las fibras θ . Este último es un valor conocido a la hora de confeccionar el espécimen, mientras que las propiedades en general no son conocidas (E_{11} ,

E_{22} , y ν_{12} podrían medirse previamente mediante otros ensayos, pero nunca G_{12}). Por ello se va a realizar un estudio de la sensibilidad en la evaluación de G_{12} y de S_{12} ante variaciones de las propiedades del material para evaluar la fiabilidad de esta configuración.

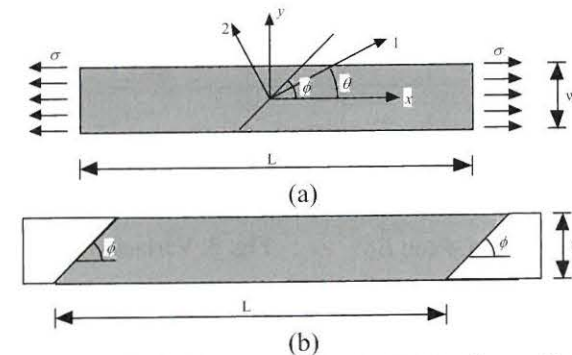


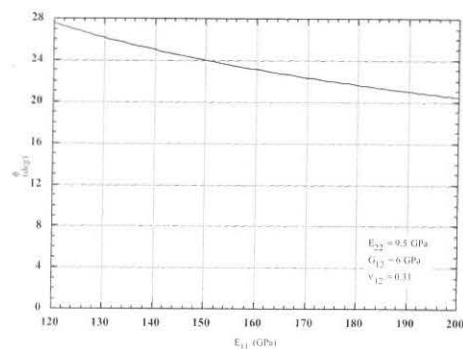
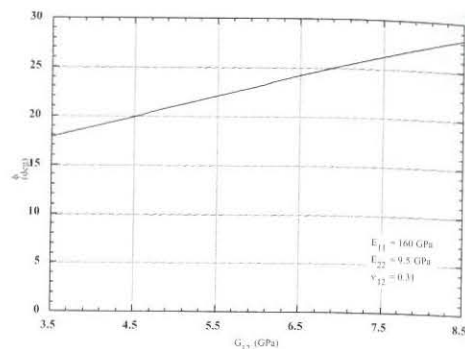
Fig. 1. (a) Configuración ideal del ensayo off-axis, (b) Configuración con tabs oblicuos.

3. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD A LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL EN LA EVALUACIÓN DE G_{12}

Dada la gran variación existente en cuanto a las propiedades (E_{11} , E_{22} , G_{12} y ν_{12}) en los sistemas compuestos parece poco probable que se pueda encontrar un sólo valor del ángulo de los tabs que sea aplicable a todos los materiales. Puede ser más razonable explorar la posibilidad de que para cada sistema material (p.e.: grafito-epoxy, vidrio-epoxy, etc.) fuera factible la realización del ensayo con una orientación de los tabs fija, que diera lugar a errores admisibles en la evaluación de G_{12} . Un enfoque similar en cuanto a resistencia es seguido por Pierron et al⁷.

Para analizar esta posibilidad, vamos a considerar un sistema material concreto como es fibra de carbono-resina epoxy, cuyas propiedades, consultadas diversas fuentes (Tsai⁹, Mil-HDBK-17¹⁰, Schwarz¹¹, Herakovich¹²), se encuentran en el rango: $120 \text{ GPa} \leq E_{11} \leq 200 \text{ GPa}$; $8 \text{ GPa} \leq E_{22} \leq 11 \text{ GPa}$; $3.5 \text{ GPa} \leq G_{12} \leq 8.5 \text{ GPa}$; $0.28 \leq \nu_{12} \leq 0.34$. La idea es tomar unos valores únicos para evaluar ϕ para todos los materiales de este sistema (se tomarán para todas las propiedades los valores medios de su rango de variación), y se determinará el valor nominal de ϕ para estos valores. A continuación se evaluará el error que conlleva tomar este ϕ para todos los materiales del sistema al evaluar G_{12} . Los valores medios son $E_{11} = 160 \text{ GPa}$; $E_{22} = 9.5 \text{ GPa}$; $G_{12} = 6 \text{ GPa}$; $\nu_{12} = 0.31$. Para estos valores nominales se obtiene un ángulo $\phi_n = 23.1^\circ$.

Para constatar la problemática planteada se procede en primer lugar a ver la variación de ϕ con E_{11} (fig.2) y G_{12} (fig.3) independientemente, manteniendo el resto de las propiedades constantes. Puede observarse que para el rango de propiedades considerado se puede llegar a alcanzar una variación máxima de 5.30° para el caso de G_{12} y de 4.44° para el caso de E_{11} .

Fig. 2. Variación del ángulo ϕ con E_{11} .Fig. 3. Variación del ángulo ϕ con G_{12}^* .

Evidentemente, los valores anteriores no representarían los máximos errores angulares que se podrían dar, puesto que ello surgiría de la combinación de ambos efectos. Para calcular este valor hay que considerar los casos extremos posibles, que se muestran en la Tabla 1.

Caso	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ϕ (°)	error (°)
1	120	9.5	3.5	0.31	20.40	-2.70
2	120	9.5	8.5	0.31	34.39	+11.29
3	200	9.5	3.5	0.31	16.24	-6.85
4	200	9.5	8.5	0.31	24.55	+1.46

Tabla 1. Valores de ϕ y del error angular para los casos extremos.

De los valores de la Tabla 1 se desprende que el caso 2 resulta (en términos absolutos) ser el más desfavorable, alcanzándose una variación angular considerable (11.29°). La cuestión inmediata que nos podemos plantear es si las variaciones que se indican en la tabla 1, de por sí ya significativas, tienen una repercusión sobre el valor de G_{12} que se obtendría del ensayo. Para ello, analizaremos los dos casos extremos más significativos en ambos sentidos del error (casos 2 y 3). Describiremos el proceso a seguir para el caso 2 (para el caso 3 sería similar). Suponemos que tenemos un material con unas propiedades $E_{11} = 120$ GPa; $E_{22} = 9.5$ GPa; $G_{12} = 8.5$ GPa; $\nu_{12} = 0.31$, y que sometemos a ensayo de tracción off-axis a 10° una probeta de dicho material, empleándose tabs oblicuos confeccionados con la orientación nominal $\phi_0 = 23.1^\circ$. Para evaluar la respuesta de la probeta, se ha modelado esta configuración mediante Elementos Finitos (la discretización empleada consta de 500 elementos planos de 4 nodos, PLANE42 del programa ANSYS 5.6) con objeto de obtener el valor de G_{12}^* que se obtendría a partir de la deformación angular en el centro de la probeta γ_{12} y de la carga aplicada F , haciendo uso para ello de la expresión correspondiente a la configuración ideal (simplemente apoyada):

$$G_{12}^* = \frac{-F \sin \theta \cos \theta}{A \gamma_{12}} \quad (2)$$

donde $\theta = 10^\circ$ y A es el área de la sección transversal de la probeta. Los valores de G_{12} evaluados mediante la expresión (2) utilizando los resultados de F y γ_{12} obtenidos del

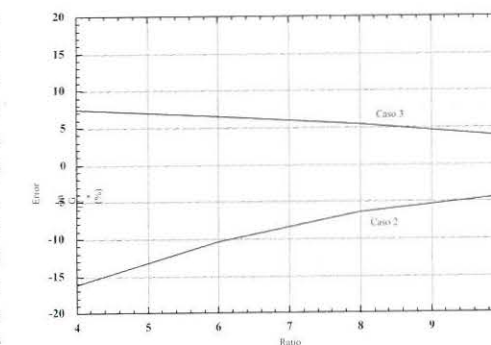
análisis numérico de los casos considerados, para distintos valores de la relación de aspecto geométrico del espécimen (Longitud/ancho = 4, 6, 8, 10), se resumen en la Tabla 2. El error que se comete respecto del valor real en cada caso se puede evaluar mediante (3).

Ratio L/w	4	6	8	10
G_{12}^* caso 2 (GPa)	7.13	7.62	7.95	8.13
G_{12}^* caso 3 (GPa)	3.76	3.73	3.69	3.63

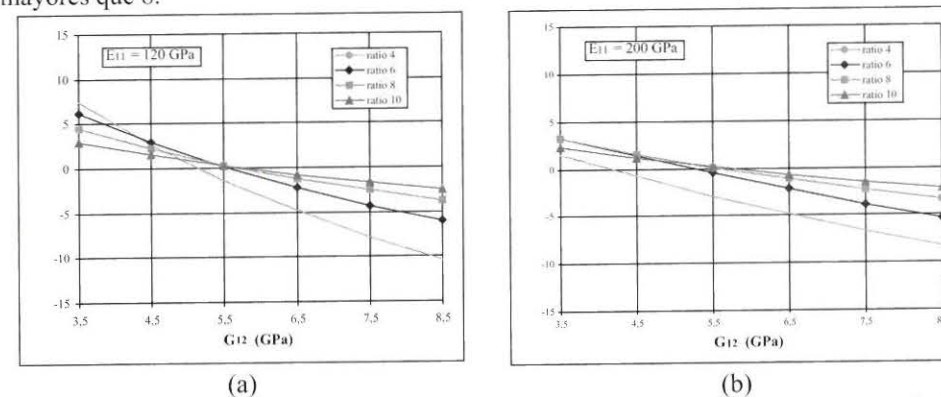
Tabla 2. Valores de G_{12}^* correspondientes a los casos 2 y 3.

$$\text{Error (\%)} = \frac{G_{12}^* - G_{12}}{G_{12}} \cdot 100 \quad (3)$$

En la figura 4 se representa dicho error frente al ratio de la probeta para ambos casos analizados, observándose que el caso 2 resulta ser también el más desfavorable para la evaluación de G_{12} , ya que conduce a los mayores valores del error. En ambos casos se observa que el error depende del ratio, siendo creciente conforme disminuye el ratio del espécimen. En cuanto a los valores del error alcanzados, se observa que para los ratios pequeños (4 y 6) se presentan errores superiores al 10%, y que tenemos que llegar hasta ratio 10 para encontrar errores menores del 5%.

Fig. 4. Error en G_{12}^* en función del ratio del espécimen para los casos 2 y 3.

De lo anterior se deduce que el ratio del espécimen juega un papel importante sobre los resultados del ensayo, siendo portanto recomendable el empleo de especímenes con ratios mayores que 8.

Fig. 5. Evolución del error en G_{12}^* con la variación de G_{12} para los valores extremos de E_{11} : (a) 120 GPa, (b) 200 GPa.

Dado que el conocimiento aproximado del valor de E_{11} de un material resulta factible en base al tipo de fibra utilizada o a la caracterización directa del material, sería razonable plantear el uso de un ángulo nominal de los tabs correspondiente a cada valor de E_{11} y al valor central del intervalo de variación de G_{12} . Para analizar esta alternativa, se ha evaluado numéricamente la respuesta del espécimen considerando cinco valores diferentes del módulo elástico E_{11} (120, 140, 160, 180 y 200 GPa), y cuatro valores de la relación de aspecto geométrico L/w (4, 6, 8 y 10). Para cada uno de los casos se ha determinado el error que presenta el valor del módulo de cortadura aparente G_{12}^* respecto del valor real G_{12} , representándose dicho error frente a la variación de G_{12} en la fig. 5.

Como se puede apreciar en la figura 5, el valor del máximo error alcanzable (ratio 4, $E_{11} = 120$ GPa, $G_{12} = 8.5$ GPa) supera ligeramente el 10%, lo que pone de manifiesto que la influencia de errores en la estimación inicial de G_{12} en su valor final es mayor que la influencia de errores en la estimación inicial de E_{11} (la influencia de los dos conjuntamente, caso 2, fig. 4, era del 16%).

4. ESTUDIO DE SENSIBILIDAD A LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL EN LA EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A CORTADURA

En cuanto a la determinación de la resistencia a cortadura mediante la configuración del ensayo off-axis a 10° con tabs oblicuos, ésta también puede verse afectada por las mismas causas consideradas anteriormente para el caso de la rigidez. En este sentido, las concentraciones de tensión (nominalmente singularidades) presentes en las esquinas, las cuales se agravan debido al error angular que se produce por el uso de una orientación nominal, pueden afectar a la determinación de la resistencia a cortadura intralaminar. En relación a esta circunstancia Pierron et al.⁷ advierten que errores angulares del orden de 7° podrían afectar negativamente, mientras que errores entorno a 3° serían admisibles. Dado que los errores alcanzables (casos 2 y 3 considerados en el apartado anterior) son del orden de 7° o mayores, independientemente del ratio del espécimen, es cuestionable por esta razón el uso de la configuración de tabs oblicuos empleando una sola orientación nominal.

La idea más inmediata que nos podemos plantear como posible solución del problema descrito anteriormente sería, como apuntan Pierron et al.⁷ dividir los compuestos de fibras de carbono en varios grupos de acuerdo a su módulo elástico E_{11} . Consideremos una división de los compuestos de fibras de carbono en dos grupos de acuerdo al valor de E_{11} : 1º rango: $120 \text{ GPa} \leq E_{11} \leq 160 \text{ GPa}$; 2º rango: $160 \text{ GPa} \leq E_{11} \leq 200 \text{ GPa}$. Evaluando los ángulos ϕ y los errores angulares correspondientes para cada uno de los casos extremos asociados a cada uno de los rangos considerados, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 3.

1º rango						
Caso	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ϕ (°)	error (°)
1	120	9.5	3.5	0.31	20.40	4.60
2	120	9.5	8.5	0.31	34.39	9.39
3	160	9.5	3.5	0.31	17.79	7.21
4	160	9.5	8.5	0.31	28.27	3.27
2º rango						

Caso	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	ϕ (°)	error (°)
1	160	9.5	3.5	0.31	17.79	3.83
2	160	9.5	8.5	0.31	28.27	6.65
3	200	9.5	3.5	0.31	16.24	5.38
4	200	9.5	8.5	0.31	24.55	2.94

Tabla 3. Valores de ϕ y del error angular para los casos extremos.

Como se puede observar de los valores de la Tabla 3, para el segundo rango aunque los errores permanecen por debajo de 7° el máximo alcanzado está sólo ligeramente por debajo de este valor, mientras que para el primer rango se siguen obteniendo valores superiores a los 7° , por cuanto podríamos pensar que habría que seguir subdividiendo los intervalos hasta obtener unos errores admisibles. Sin embargo, a la vista de los resultados, estos parecen indicar que la dependencia del ángulo ϕ respecto de las propiedades del material (E_{11} y G_{12}) se dá de manera conjunta, no teniendo efecto sobre el valor del error la acotación de una de ellas independientemente.

Si representamos el valor del ángulo ϕ que forman las líneas de isodesplazamiento en la configuración ideal, para distintas combinaciones de las propiedades del material, en función del cociente G_{12}/E_{11} , se puede observar (ver figura 6) como los puntos tienen una tendencia marcadamente lineal, por lo que la función $\phi = \phi(G_{12}/E_{11})$ se puede aproximar mediante una recta. En consecuencia, el planteamiento de un procedimiento que produzca errores angulares entorno a los 3° pasa por la acotación de rangos de valores del cociente G_{12}/E_{11} .

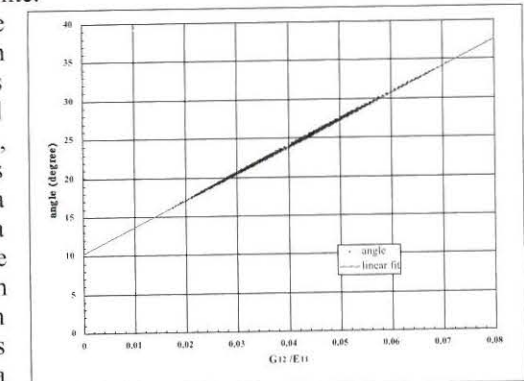


Fig. 6. Variación del ángulo ϕ con el cociente G_{12}/E_{11} , y ajuste lineal.

En consecuencia, el planteamiento de un procedimiento que produzca errores angulares entorno a los 3° pasa por la acotación de rangos de valores del cociente G_{12}/E_{11} . Obviamente, la acotación de rangos de valores del cociente G_{12}/E_{11} presenta dificultades debido a que depende de G_{12} que es el valor que se pretende determinar.

5. CONCLUSIONES

Del estudio de sensibilidad realizado sobre la configuración con tabs oblicuos del ensayo de tracción off-axis a 10° se han obtenido las siguientes consecuencias. En primer lugar, se ha puesto de manifiesto que la evaluación ajustada de G_{12} mediante esta configuración depende de la relación de aspecto geométrico del espécimen y de los valores del resto de propiedades del material (fundamentalmente E_{11}). Para asegurar que los errores, debidos a que el ángulo de inclinación de los tabs no coincide con el de las líneas de isodesplazamientos longitudinales, resulten admisibles sería recomendable el empleo de especímenes con ratios superiores a 8 si se utiliza una sola orientación nominal de los tabs, o bien la evaluación de una orientación nominal de los tabs adecuada al valor de E_{11} .

estimado para el material objeto de ensayo pudiéndose usar cualquier dimensión del espécimen, aunque resulta recomendable emplear ratios superiores a 4 para minimizar el error en G_{12} .

En segundo lugar, se ha observado que, independientemente del ratio del espécimen utilizado, los errores angulares alcanzables en el ensayo podrían afectar a la determinación de la resistencia a cortadura si admitimos como criterio las recomendaciones propuestas por Pierron et al⁷. No obstante, la confirmación de este hecho requeriría de un estudio experimental más amplio y detallado.

En tercer lugar, se ha puesto de manifiesto que el ángulo ϕ que forman las líneas de isodesplazamientos longitudinales depende linealmente del cociente G_{12}/E_{11} , y por tanto el control del error angular está exclusivamente asociado al control del valor de dicho cociente. En este sentido, hay que mencionar que dicho control del cociente G_{12}/E_{11} requeriría un ensayo previo para la estimación de G_{12} .

6.- AGRADECIMIENTOS

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

7.- REFERENCIAS

1. Pagano N.J. and Halpin J.C. (1968), "Influence of End Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies", *J. Composite Materials*, Vol. 2, No. 1, pp. 18-31.
2. Pindera M-J., Herakovich C.T. (1986), "Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test", *Exp. Mech.*, Vol. 26, No. 1, pp. 103-112.
3. Cañas J., París F., Marin J.C. (1991), "Numerical Analysis of Off-Axis Tension Test for Unidirectional Graphite-Epoxy Composites", *ICCM VIII, Hawaii(USA)*, pp. 36F1-36F12.
4. Sun C.T. and Chung I. (1993), "An Oblique End-Tab Design for Testing Off-Axis Composite Specimens", *Composites*, Vol. 24, No. 8, pp. 619-623.
5. Pierron, F.; Vautrin, A. (1996), "10° off-axis tensile test: A critical approach", *Composites Science and Technology*, v56, n4, p 483-488.
6. Kawai, M.; Morishita, M.; Satoh, H.; Tomura, S.; Kemmochi, K. (1997), "Effects of end-tab shape on strain field of unidirectional carbon/epoxy composite specimens subjected to off-axis tension", *Composites - Part A: Ap. Sc. and Manufacturing*, v 28, n 3, p 267-275.
7. Pierron, F.; Alloba, E.; Surrel, Y.; Vautrin, A. (1998), "Whole-field assessment of the effects of boundary conditions on the strain field in off-axis tensile testing of unidirectional composites", *Composites Science and Technology*, v 58, n 12, p 1939-1947.
8. Pierron, F.; Vautrin, A. (1997), "New ideas on the measurement of the in-plane shear strength of unidirectional composites", *J. of Composites Materials*, v 31, n 9, p 889-895.
9. Tsai S. W. (1988), *Composites Design, Think Composites*.
10. MIL-HDBK-17-2E (1998), *Polymer Matrix Comp. Mat. Prop., Dep. of Def. Handbook*.
11. Schwartz M. M. (1984), *Composite Materials Handbook*, Mc Graw-Hill.
12. Herakovich C. T. (1998), *Mechanics of Fibrous Composites*, John Wiley & Sons, Inc.