

N. Carbajal^a, F. Mujika^a

^a GRUPO MATERIALES + TECNOLOGÍAS / MECÁNICA DE MATERIALES,
Departamento de Ingeniería Mecánica,
Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, UPV/EHU,
Plaza Europa 1, 20018, Donostia-San Sebastián, España.

Flexión en dos planos de laminados composites unidireccionales

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

Flexión en dos planos

Laminados unidireccionales

Criterios de fallo

En este trabajo se propone la flexión en dos planos de laminados unidireccionales de composites reforzados con fibra larga como método de ensayo para conocer el comportamiento del material ante sollicitaciones combinadas. Se han fabricado y ensayado diferentes muestras utilizando el material T6T/F593 formado por matriz epoxi reforzado con fibra de carbono. Se han diferenciado tres casos según sea el ratio entre las tensiones normales en dirección de la fibra y las tensiones normales en dirección perpendicular a la fibra: menor, igual o mayor a la unidad.

En todos los casos el fallo está asociado con la rotura de la matriz, siendo lineal la relación entre tensión y deformación hasta rotura. Los resultados obtenidos se han analizado mediante tres criterios de fallo: Rankine, Tsai-Wu y máxima energía de deformación. El método de Rankine responde bien para los dos primeros casos. Con los resultados obtenidos se ha calculado el parámetro del Criterio Tsai Wu que relaciona las tensiones en dirección de la fibra y en dirección perpendicular a la fibra. Para los casos en que la tensión en dirección de la fibra es bastante mayor que la tensión en dirección perpendicular se puede desprestigiar esta última en el cálculo de la máxima energía de deformación.

Bending in two planes of unidirectional composite laminates

ABSTRACT

Keywords:

Bending in two planes

Unidirectional laminates

Failure criteria

In this work bending in two planes of long fiber composite laminates is proposed as a test method for knowing the behaviour of this material in case of combined loads. Different samples have been manufactured and tested using carbon/epoxy T6T/F593 material. Three cases have been considered depending on the value of the ratio between normal stress in fiber direction and normal stress in direction perpendicular to fibre: less than 1, equal to 1 and greater than 1.

In all cases failure has been related to matrix failure, being a linear relation between stress and deformation until failure. Stress values have been analyzed by three failure criteria: Rankine, Tsai-Wu and maximum strain energy. Rankine criteria fits well the first two cases. The parameter of Tsai-Wu criteria between normal stresses in fiber direction and normal stresses in direction perpendicular to fibre has been obtained using experimental results. When stress in fiber direction is much greater than stress in direction perpendicular to fiber, this small stress can be ignored in the calculus of maximum strain energy.

1 Introducción

Tsai and Wu [1] propusieron un criterio de fallo para materiales anisótropos sometidos a estados de tensión complejos. Mujika [2] propuso una nueva aproximación para el ensayo de flexión de 3 puntos de laminados multidireccionales basada en métodos energéticos. En este trabajo se pretende conocer el comportamiento de laminados composite unidireccionales frente a un estado de tensión plano debido a la existencia de momentos flectores en 2 planos.

2 Aproximación analítica

En la figura Figura 1 se muestra la configuración del ensayo realizado con flexión en dos planos.

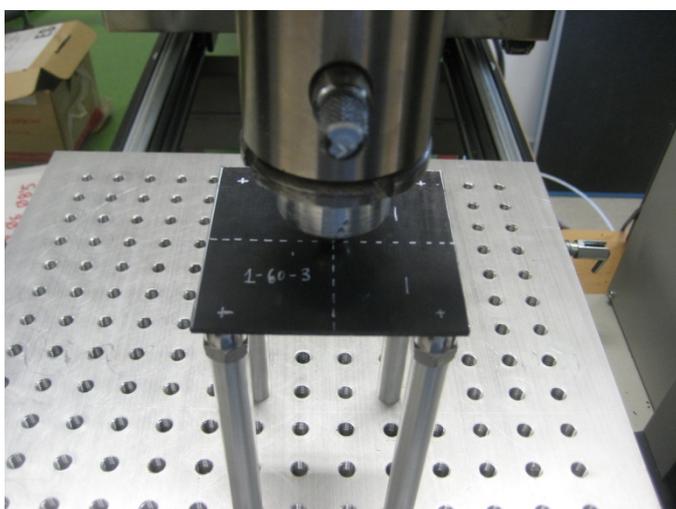


Figura 1. Ensayo de flexión en dos planos

Se han calculado las tensiones máximas en dirección de la fibra σ_x y en dirección perpendicular a la fibra σ_y

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{3PL_x}{2bh^2} \\ \sigma_y &= \frac{3PL_y}{2Lh^2} \end{aligned} \quad (1)$$

donde P es la máxima carga, L_x es la luz entre apoyos en dirección de la fibra, L_y es la luz entre apoyos en dirección perpendicular a la fibra, L es la longitud total en dirección x y b es la longitud en dirección perpendicular a la pieza del laminado.

Asimismo se define B como el ratio entre las tensiones σ_x y σ_y .

$$B = \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (2)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1) en la ecuación (2) y considerando la condición de $L/b = L_x/L_y$

$$B = \left(\frac{L_x}{L_y}\right)^2 \quad (3)$$

Si se define t como el ratio entre las luces L_x y L_y la ecuación (3) se puede expresar

$$B = t^2 \quad (4)$$

De acuerdo a la ecuación (4) la relación de tensiones σ_x y σ_y es igual al cuadrado de la relación entre luces L_x y L_y .

El criterio de Tsai-Wu [1] para caso de tensión plana cuando las únicas tensiones distintas de cero son σ_x y σ_y se expresa

$$F_{11}\sigma_x^2 + F_{22}\sigma_y^2 + F_1\sigma_x + F_2\sigma_y + F_{12}\sigma_x\sigma_y = 1 \quad (5)$$

donde los parámetros F_{11} , F_{22} , F_1 y F_2 se obtienen a partir de estados uniaxiales de tensión mediante la siguientes expresiones

$$\begin{aligned} F_{11} &= \frac{1}{X_t|X_c|} & F_{22} &= \frac{1}{Y_t|Y_c|} \\ F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{|X_c|} & F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{|Y_c|} \end{aligned} \quad (6)$$

siendo X_t la resistencia a tracción longitudinal, X_c la resistencia a compresión longitudinal, Y_t la resistencia a tracción transversal e Y_c la resistencia a compresión transversal.

Sin embargo el parámetro F_{12} precisa de un estado biaxial de tensiones para su obtención [3].

En la ecuación (5) se puede despejar F_{12}

$$F_{12} = \frac{1 - F_{11}\sigma_x^2 - F_{22}\sigma_y^2 + F_1\sigma_x + F_2\sigma_y}{\sigma_x\sigma_y} \quad (7)$$

Utilizando el criterio de la máxima energía de deformación para tensión plana cuando las únicas tensiones distintas de cero son σ_x y σ_y con valores de B mucho mayores que 1 la máxima energía de deformación por unidad de volumen U_0 se puede aproximar al valor correspondiente al estado uniaxial de tensiones

$$U_0 = \frac{\sigma_x^2}{2E_L} \quad (8)$$

donde E_L es el módulo longitudinal del material.

3 Parte experimental

Se han fabricado laminados de espesores nominales 2 y 3,5 mm y se han ensayado hasta rotura laminados con valores de t 0,25, 1, 4, 5, 6 y 7 que corresponden a valores de B 0,0625, 1, 16, 25, 36 y 49.

En la Tabla 1 se muestran las dimensiones de las muestras

Tabla 1. Dimensiones de las muestras

Muestra	L_x (mm)	L_y (mm)	L (mm)	b (mm)	h (mm)
0.25-20-2	20	80	25,4	101,1	2,00
1-40-2	40	20	50,7	50,3	1,99
1-60-2	60	20	75,4	76,2	2,02
4-80-2	80	20	100,6	26,1	2,00
4-80-3.5	80	20	100,5	25,5	3,50
5-100-3.5	100	20	125,3	25,8	3,38
6-120-3.5	120	20	150,6	25,7	3,39
7-140-3.5	140	20	175,7	25,4	3,52



En la tabla 2 aparecen los valores de X_t , X_c , Y_t e Y_c , donde X_t e Y_t se han obtenido mediante flexión de 3 puntos utilizando una muestra de espesor nominal 2,53 mm y una luz de 80 mm y otra muestra de espesor nominal 2,69 y una luz de 30 mm respectivamente. Por otro lado X_c e Y_c se han obtenido mediante flexión de 3 puntos [4, 5]

Tabla 2. Propiedades resistentes de T6T/F593

X_t (MPa)	X_c (MPa)	Y_t (MPa)	Y_c (MPa)
1500	-1100	100	-400

En la Tabla 3 se muestran los valores de los coeficientes de Tsai-Wu obtenidos según las ecuaciones (5) a partir de los valores de la Tabla 1.

Tabla 3. Valores de coeficientes de Tsai-Wu

F_{11} (MPa ⁻²)	F_{22} (MPa ⁻²)	F_1 (MPa ⁻¹)	F_2 (MPa ⁻¹)
$5,56 \cdot 10^{-7}$	$2,50 \cdot 10^{-5}$	$-1,67 \cdot 10^{-4}$	$7,50 \cdot 10^{-3}$

4 Resultados

Todas las muestras ensayadas presentan relación lineal entre carga y desplazamiento hasta el momento de la rotura, tal como se observa en la Figura 2, que se produce de forma súbita

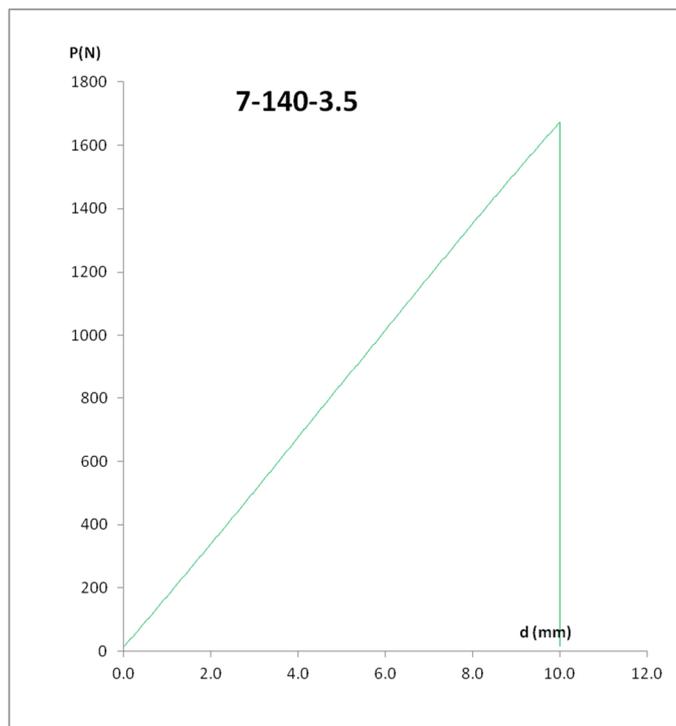


Figura 2. Curva carga –desplazamiento en muestra 7-140-3.5

Todas las muestras sufren una rotura en transversal es decir la superficie de rotura es paralela a la dirección de la fibra según se muestra en la Figura 3.

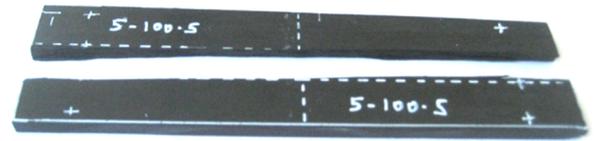


Figura 3. Rotura transversal en la muestra 5-100-3.5

En la Tabla 4 se muestran los valores de tensión máxima en dirección de la fibra σ_x y en dirección perpendicular a la fibra σ_y para las muestras con distinta valor de B.

Tabla 4. Valores de tensiones σ_x y σ_y para cada muestra

Muestra	B	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)
0.25-20-2	0.0625	6	101
1-40-2	1	94	93
1-60-2	1	89	90
4-80-2	16	600	39
4-80-3.5	80	695	44
5-100-3.5	25	798	33
6-120-3.5	36	986	28
7-140-3.5	49	1010	21

Para el caso de B menor que 1 las tensiones σ_y en dirección perpendicular a la fibra son mayores que la tensión en dirección de la fibra σ_x , por lo que el criterio de Rankine de la máxima tensión normal explica el fallo transversal en por alcanzarse en primer lugar el valor menor de los de la tabla 2.

Para el caso de B =1 también el criterio de Rankine explica el fallo transversal, aunque sin embargo las tensiones máximas que se obtienen son ligeramente menores que la resistencia a tracción transversal.

Para el caso de B mayor o igual que 1 se ha utilizado la ecuación (7) del criterio de Rankine para calcular el valor de F_{12} . En la figura 4 se muestra la variación de F_{12} con el ratio de tensiones B. Se observa que al aumentar B el valor obtenido de F_{12} se hace ligeramente mayor que el valor medio.

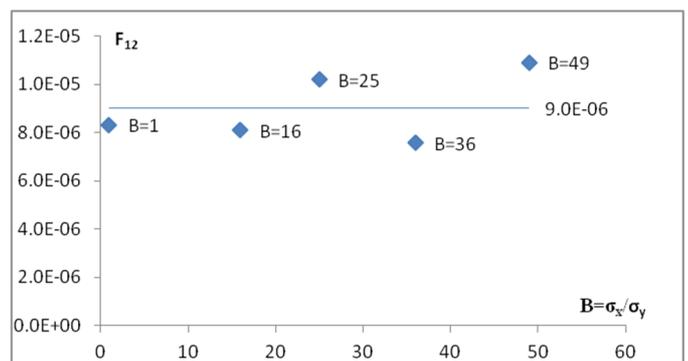


Figura 4. F_{12} según ecuación (6) en función de B



Para el caso de B mayor que 1 en la Figura 5 se muestra la variación de σ_x con B, observándose que cuando B se hace mucho mayor que 1 σ_x tiende a un valor de 1000 MPa.

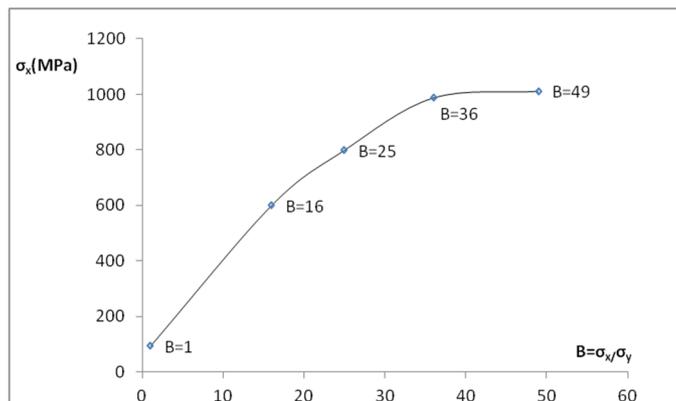


Figura 5. Tensión en dirección de la fibra en función de B

Por último el criterio de la máxima energía de deformación en caso de B mucho mayor que 1 es equivalente al caso uniaxial de tensiones en que σ_y es nula.

5 Conclusiones

Se ha analizado el comportamiento de laminados compuestos unidireccionales bajo un estado biaxial de tensiones σ_x en dirección de la fibra y σ_y en dirección perpendicular a la fibra ocasionado por flexión en dos planos, pudiendo ser el ratio entre estas tensiones, B, menor, igual o mayor que 1.

En todos los casos el fallo observado es transversal relacionado con el fallo de la matriz, incluso para valores del ratio de tensiones mucho más grandes que 1.

Cuando B es menor que 1 el criterio de Rankine explica bien el fallo transversal. Cuando B es igual a 1 los valores de tensión que se obtienen son ligeramente inferiores a la resistencia a tracción transversal.

Mediante el estado biaxial de tensiones producido por flexión en dos planos se puede obtener el valor del parámetro F_{12} del Criterio de Tsai-Wu.

Para valores de B mayores que 1 los valores de tensión en dirección de la fibra aumentan a medida que aumenta B y tienden a un valor próximo al valor de resistencia a compresión longitudinal cuando B es mucho mayor que 1.

Finalmente, para valores de B mucho mayores que 1 la máxima energía de deformación por unidad de volumen en estado biaxial de tensiones es independiente del valor de σ_y .

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) la financiación del Grupo de Investigación Mecánica de Materiales GIU 16/51 en la convocatoria de 2016.

Referencias

- [1] S.W. Tsai, E.M. Wu. *Journal of Composite Materials*, **5**, pág. 58-80 (1971).
<http://dx.doi.org/10.1177/002199837100500106>
- [2] F. Mujika, *Journal of Composite Materials*, **46**, pág. 259-274 (2012).
<http://dx.doi.org/10.1177/0021998311412636>
- [3] E.M. Wu, *Journal of Composite Materials*, **6**, pág. 472-489 (1972).
<http://dx.doi.org/10.1177/002199837200600304>
- [4] N. Carbajal, F. Mujika, *Polymer Testing*, **28**, pág. 618-626 (2009).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymeresting.2009.05.005>
- [5] N. Carbajal, F. Mujika, *Polymer Testing*, **30**, pág. 578-584 (2011).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymeresting.2011.04.012>

