

Análisis del comportamiento a compresión de un laminado [0,90,0,90] de tejido no ondulado mediante un modelo 3D de elementos finitos

E. Graciani, A. González, F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Universidad de Sevilla, España

RESUMEN

El presente trabajo está dedicado al análisis numérico del comportamiento a compresión de un laminado $[0, 90]_a$ de tejido no ondulado o non-crimp fabric (NCF). Para ello se ha realizado un modelo tridimensional de elementos finitos del laminado a nivel mesoscópico en el que se han modelado los constituyentes del material, mazos de fibras y paquetes de resina, como entes homogéneos, sin considerar la microestructura que caracteriza a cada uno de ellos. Los resultados obtenidos con este modelo muestran que el mecanismo de fallo a compresión de un laminado de NCF está asociado a la curvatura que presentan los mazos de fibras en este tipo de materiales compuestos, como consecuencia del curado. En efecto, en la zona en que dicha curvatura es máxima aparecen deformaciones tangenciales de diferente signo cuya diferencia crece a medida que la carga de compresión aplicada aumenta hasta que llega un momento en que el material no es capaz de soportarlo y se produce el fallo.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos ofrecen considerables ventajas en aplicaciones en que son necesarios al mismo tiempo gran resistencia y bajo peso debido a las elevadas propiedades específicas que los caracterizan. No obstante, su elevado coste así como su pobre comportamiento ante cargas fuera de su plano han limitado en muchos casos su uso a estructuras secundarias. Para mejorar esto se han desarrollado nuevas tipologías de materiales compuestos, entre las cuales se encuentran los tejidos no ondulados o Non-crimp fabrics (NCF). En relación a los materiales compuestos clásicos, los NCF se sitúan en una posición intermedia entre los laminados unidireccionales y los tejidos ofreciendo mejor resistencia ante cargas fuera del plano que los laminados y mejores propiedades en el plano que los tejidos clásicos. Finalmente se procede a la inyección de la resina y al curado.

La estructura interna de los NCF consiste básicamente en una red de mazos de fibras tejidos entre sí y unidos por matriz. Cada mazo de fibras es un conjunto de fibras colocadas en una sola dirección y unidas entre sí por matriz. Estos mazos se disponen formando láminas que se apilan unas encima de otras, constituyendo los laminados de NCF. En la Figura 1 se muestra un esquema del proceso de fabricación de un NCF y sobre esta figura puede observarse cómo todos los mazos de una misma lámina tienen la misma orientación, pudiendo variar ésta de una lámina a otra, en función de las cargas que el laminado deba resistir.

Una vez colocados los mazos de cada una de las láminas, y con el objetivo de mejorar las propiedades del material ante cargas perpendiculares al plano del laminado, los

mazos se tejen entre sí y también con los mazos del resto de las láminas que forman el laminado.

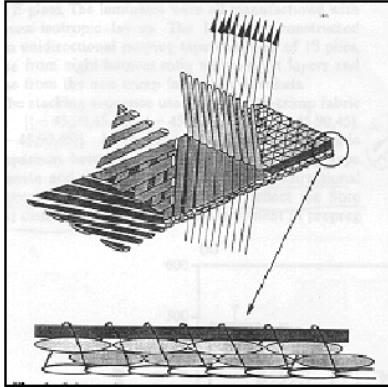


Fig. 1 - Proceso de fabricación de un laminado de NCF, Ávila et al (2001)

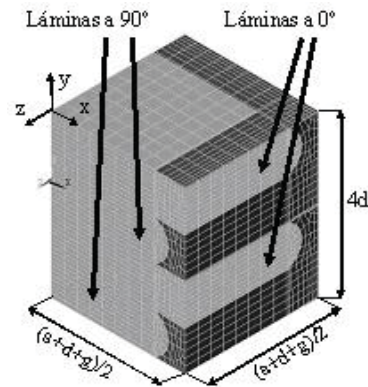


Fig. 2 - Malla de elementos finitos del modelo

La mayor resistencia de un NCF ante cargas fuera del plano se debe al cosido de los mazos y la mejora de las propiedades en el plano se debe a que las ondulaciones que presentan las fibras de un NCF como consecuencia del curado son menores que las ondulaciones de las fibras de un tejido clásico.

Por otro lado, el uso de tecnologías derivadas de la industria textil reduce el coste de fabricación de las piezas de NCF en comparación con los procesos de fabricación de los materiales compuestos tradicionales.

El uso de este nuevo tipo de materiales compuestos en cualquier tipo de aplicación exige el estudio y caracterización de su comportamiento. Precisamente con este propósito de conocer el comportamiento de este tipo de materiales, en el presente estudio se han usado modelos tridimensionales de elementos finitos para analizar numéricamente su comportamiento a compresión.

La exposición del trabajo se ha estructurado como sigue. En el apartado 2 se describe el modelo tridimensional de elementos finitos usado, en el apartado 3 se describen las propiedades mecánicas de los mazos de fibras y de los paquetes de resina que constituyen los NCF y en el apartado 4 se enumeran las condiciones de contorno aplicadas al modelo para generar el estado de compresión. Los resultados obtenidos así como la influencia que sobre ellos tiene la discretización del modelo se exponen en el apartado 5. Finalmente, en el apartado 6 se enumeran las conclusiones obtenidas con el estudio llevado a cabo.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

En el presente trabajo se ha analizado el comportamiento a compresión de un laminado 0/90 antisimétrico de NCF a nivel mesoscópico.

Para realizar esta tarea se ha desarrollado un modelo tridimensional de elementos finitos cuyas características geométricas y mecánicas se describen a continuación y al que se le ha aplicado una carga de compresión en la dirección de los mazos de las láminas a 0°.

Este modelo, representado en la Figura 2, corresponde a la mínima celda unidad de este laminado, de tal forma que repitiéndolo a lo largo de su plano, plano XZ en dicha

figura, es posible obtener un laminado $[0,90]_a$ con las dimensiones que se deseen. En dicha figura, el color claro corresponde a los mazos y el oscuro a la resina.

Los mazos de las láminas a 0° y, por ende, las fibras que los componen, están orientados a lo largo de la dirección X, los mazos de las láminas a 90° están orientados según la dirección Z y la dirección Y corresponde a la dirección a lo largo del espesor del laminado. La primera y la tercera lámina del modelo corresponden a las láminas a 0° del laminado y la segunda y la cuarta a las láminas a 90° . En esta configuración, los ejes X, Y y Z corresponden a las direcciones de ortotropía del laminado.

El programa de elementos finitos usado ha sido ANSYS 8.0, y se ha empleado un elemento sólido lineal con ocho nodos y tres grados de libertad en cada uno de ellos. Estos tres grados de libertad son las traslaciones en las direcciones X, Y y Z.

La geometría y las propiedades mecánicas de los constituyentes se han definido de forma paramétrica, permitiéndose así analizar la influencia que tienen sobre el comportamiento a compresión del laminado. En las Figuras 3 y 4, se han representado los parámetros geométricos que se han usado para definir la geometría del modelo. Concretamente, en la Figura 3 se ha representado la sección longitudinal de un mazo y en la Figura 4 se muestra el tamaño del espacio libre que queda entre dos mazos adyacentes.

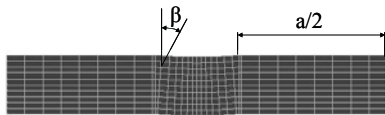


Fig. 3 - Sección longitudinal de un mazo con los parámetros β y a representados sobre ella.

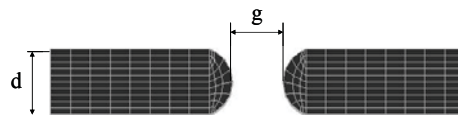


Fig. 4 - Sección transversal de dos medios mazos con los parámetros d y g .

El parámetro a representa la longitud de la parte recta de cada mazo, es decir, la longitud de cada uno de ellos no afectada por la ondulación. El espesor de cada mazo del modelo se ha supuesto igual al espesor de la lámina a la que pertenece, considerándose de esta forma que no existe acumulación de resina entre dos mazos adyacentes de dos láminas contiguas de un laminado. Ambos espesores están representados en el modelo por el parámetro d . El parámetro g es una medida de las dimensiones del espacio que queda entre cada dos mazos adyacentes de una misma lámina y β es un parámetro angular que representa la curvatura máxima de los mazos.

3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONSTITUYENTES

La resina se ha modelado como un material isótropo elástico y lineal y, como tal, su comportamiento mecánico queda definido al conocer su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson. Estos valores están indicados en la Tabla 1.

Las propiedades mecánicas de los mazos se han estimado a partir de las propiedades mecánicas de las fibras y la matriz que los constituyen usando la Regla de las Mezclas, (1), (2) y (3).

E_m (GPa)	ν_m
4.5	0.4

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la resina.

E_f (GPa)	ν_f	G_f (GPa)
237	0.25	94.8

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las fibras.

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m; E_{22} = E_{33} = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \approx \frac{E_m}{V_m} \quad (1)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_f V_f + \nu_m V_m; \nu_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad (2)$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \approx \frac{G_m}{V_m} \quad (3)$$

Siguiendo los estudios llevados a cabo por Drapier y Wisnom et al (1998) y Drapier y Wisnom et al (1999) sobre el comportamiento a compresión y cortadura de los NCF, en el presente análisis los mazos se han modelado como un material transversalmente isótropo, caracterizado por un comportamiento no lineal a cortadura. Esta no linealidad se ha considerado solamente en dos planos de los mazos, concretamente en los planos 1-2 y 1-3, donde el índice 1 representa la dirección de las fibras y los índices 2 y 3 las direcciones transversales de las mismas.

Esta no linealidad en el comportamiento mecánico de los mazos se ha introducido en el modelo mediante una relación bilineal entre σ_{12} y γ_{12} , y también entre σ_{13} y γ_{13} .

En las Tablas 2 y 3 se indican las propiedades mecánicas de las fibras y los mazos respectivamente.

E ₁₁ (GPa)	E ₂₂ =E ₃₃ (GPa)	ν ₁₂ =ν ₁₃	G ₂₃ (GPa)	ν ₂₃	G ₁₂ =G ₁₃ (GPa)	
					0<σ ₁₂ ,σ ₁₃ <60MPa	σ ₁₂ ,σ ₁₃ >60MPa
129	9.77	0.32	1.5	0.45	2.5	0.75

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los mazos

4. CONDICIONES DE CONTORNO

Las condiciones de contorno impuestas al modelo tienen como finalidad, por un lado, garantizar la compatibilidad del mismo con el resto de la pieza de NCF a la que representa y, por otro, aplicar la carga de compresión.

Con tales objetivos, en las dos caras del modelo paralelas al plano coordenado XY y en una de las caras paralelas al plano YZ, se han impuesto condiciones de simetría. En la otra cara paralela al plano YZ se ha aplicado la carga de compresión. Finalmente, en la arista A mostrada en la Figura 5 se han impedido los desplazamientos en la dirección Y para evitar los desplazamientos como sólido rígido del modelo.

En la Tabla 4 están indicadas las condiciones de contorno impuestas al modelo y en la Figura 5 están representadas dichas condiciones sobre la cara Z=0 del modelo.

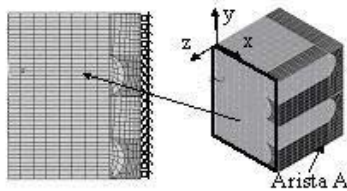


Fig. 5 - Malla de elementos finitos de la cara Z=0 del modelo con las condiciones de contorno aplicadas.

CARAS DEL MODELO	CONDICIONES DE CONTORNO
X=0	Carga de compresión: $\sigma_x = -P, \sigma_{xy} = 0, \sigma_{xz} = 0$
X=(a+d+g)/2	$u_x = 0, \sigma_{xy} = 0, \sigma_{xz} = 0$
Z=0 y Z=-(a+d+g)/2	$u_z = 0, \sigma_{xz} = 0, \sigma_{yz} = 0$

Tabla 3. Condiciones de contorno impuestas al modelo

5. RESULTADOS

Al interpretar los resultados obtenidos llama especial atención la distribución de las deformaciones de cortadura γ_{xy} en la parte ondulada de los mazos a 0° . En efecto, si se observa la Figura 6, en la que se han representado las deformaciones γ_{xy} en la cara $Z=0$ del modelo, puede apreciarse que en la parte izquierda de la misma, la correspondiente a la parte en que los mazos están rectos, el mapa de deformaciones es uniforme mientras que en la parte derecha de la misma, correspondiente a la parte en que aparecen los paquetes de resina entre cada dos mazos a 90° y en la que los mazos a 0° están ondulados, aparecen gradientes de deformaciones que las hacen incluso variar de signo.

Para comprender mejor este efecto, que se ha considerado relacionado con el mecanismo de inestabilidad a compresión del laminado, en la Figura 7 se ha representado la evolución de las deformaciones γ_{xy} a lo largo de la dirección A mostrada en dicha figura frente a la coordenada X en dicha dirección, y para dos valores de la carga de compresión aplicada. Puede observarse cómo dicha discontinuidad de las deformaciones aumenta con la carga de compresión.

Puesto que, como se ha dicho, esta discontinuidad de las deformaciones de cortadura γ_{xy} aparece en las zonas del material en que cada mazo de las láminas a 0° se ondula introduciéndose en el paquete de resina que existe entre los dos mazos adyacentes de la lámina a 90° contigua, se puede pensar que dicha discontinuidad es consecuencia de la ondulación de los mazos orientados en la dirección de la carga de compresión, mazos a 0° , de la heterogeneidad del material en dicha zona o de ambos.

Para analizar esto se han desarrollado dos modelos de elementos finitos. En el primero de ellos se ha supuesto que los mazos no están afectados por la ondulación y en el segundo modelo se han eliminado los paquetes de resina sustituyendo el volumen de cada uno de ellos por el material que modela los mazos de la lámina a la que pertenecen. Puede decirse que el segundo modelo corresponde a un “pre-preg” en que las láminas están curvas. En lo que sigue nos referiremos al primer modelo como “modelo sin ondulación” y al segundo como “modelo sin paquetes de resina”.

Para visualizar la diferencia de estos modelos entre sí y también con el modelo descrito en el apartado 2, en lo que sigue “modelo con ondulación y paquetes de resina”, en la Figura 8 se muestra la malla de elementos finitos de las caras $Z=0$ de los tres modelos descritos.

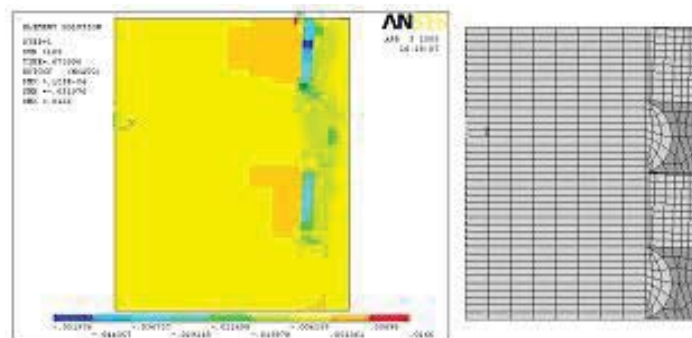


Fig. 6 - Deformaciones de cortadura γ_{xy} a lo largo de la cara $Z=0$ del modelo y malla de elementos finitos de esa cara

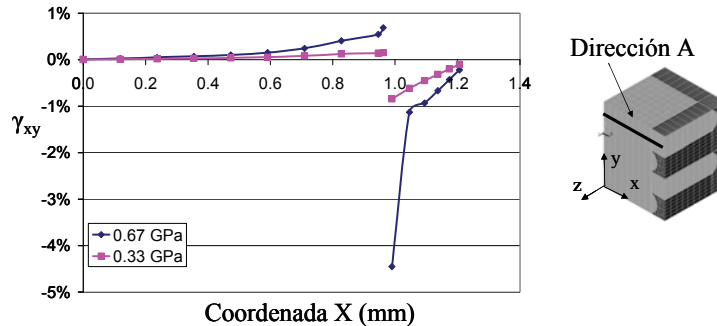


Fig. 7 - Evolución de las deformaciones de cortadura γ_{xy} a lo largo de la dirección A para dos valores de la carga de compresión aplicada.

Con el objetivo de que los tres modelos sólo se diferencien en la existencia de la ondulación de los mazos y de los paquetes de resina, las propiedades mecánicas de los mazos y la resina así como las dimensiones de los modelos se han supuesto iguales en los tres casos.

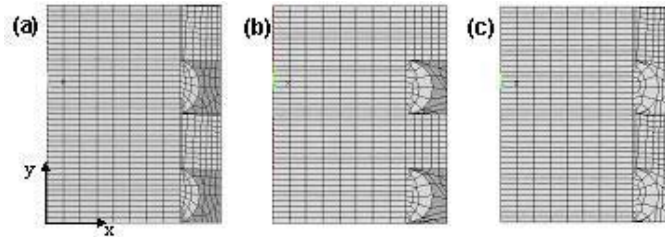


Fig. 8 - Malla de elementos finitos de la cara $Z=0$ del "modelo con ondulación y paquetes de resina" (a), del "modelo sin ondulación" (b) y del "modelo sin paquetes de resina" (c).

Para comparar los resultados de los tres modelos, en la Figura 9 se han representado las deformaciones de cortadura de los elementos P y M mostrados en dicha figura. Estos elementos están situados sobre la dirección A mostrada en la Figura 7, y corresponden a los elementos en que sucede la discontinuidad por cambio de signo mostrada en esta misma figura.

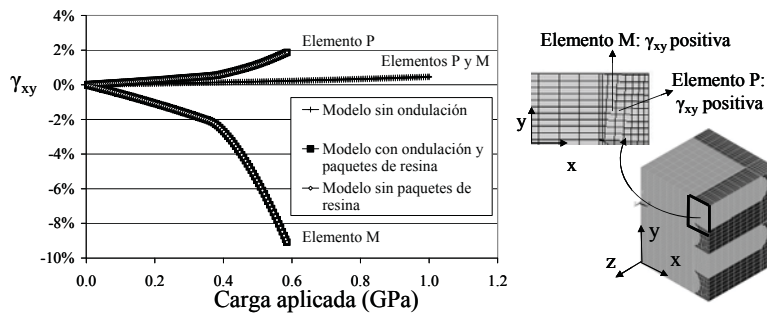


Fig. 9 - Deformación de cortadura de los elementos P y M frente a la carga de compresión aplicada para los tres modelos considerados

En la Figura 9 puede observarse que las curvas correspondientes al “modelo con ondulación y paquetes de resina” y al “modelo sin paquetes de resina” son idénticas entre sí pero diferentes a las correspondientes al “modelo sin ondulación”. Obsérvese también que las deformaciones de los puntos P y M de este modelo tienen igual signo. Puede por ello concluirse que es la ondulación de los mazos orientados en la dirección en que se aplica la carga de compresión, la responsable de las discontinuidades de las deformaciones de cortadura.

5.1 Influencia de la discretización del modelo de elementos finitos

Para estudiar la influencia de la discretización del modelo sobre los resultados obtenidos, se ha refinado la malla de elementos finitos de la parte ondulada de los mazos a 0° y se ha cambiado la forma de los paquetes de resina. En la Figura 10 puede apreciarse las diferencias entre las discretizaciones del modelo descrito en el apartado 2, en lo que sigue “modelo con malla gruesa” y del modelo con la malla refinada, en lo que sigue “modelo con malla fina”.

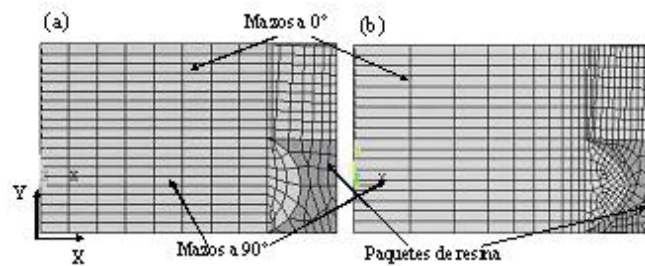


Fig. 10 - Malla de elementos finitos del “modelo con malla gruesa” (a) y el “modelo con malla fina” (b).

Para ilustrar la diferencia de los resultados obtenidos con ambos modelos en la Figura 11 se han representado las deformaciones de cortadura γ_{xy} a lo largo de la dirección A mostrada en dicha figura frente a la coordenada X pudiéndose comprobar que las dos discretizaciones conducen a los mismos resultados.

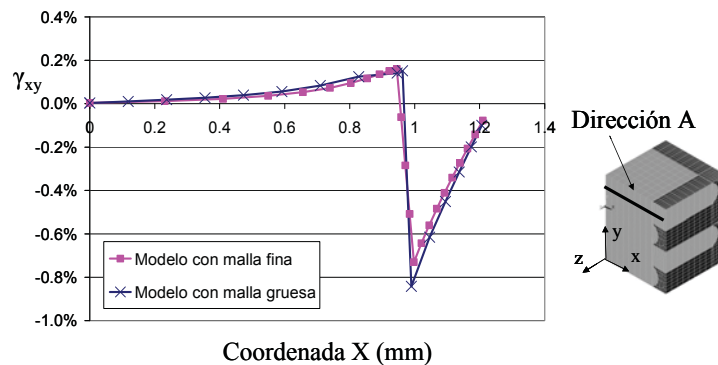


Fig. 11 - Evolución de las deformaciones de cortadura γ_{xy} a lo largo de la dirección A para los dos modelos considerados.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado el comportamiento a compresión de un laminado $[0/90]_a$ de NCF usando un modelo tridimensional de elementos finitos.

Se ha deducido, a partir de la interpretación de los resultados obtenidos con este modelo, que el mecanismo de inestabilidad del material cuando se somete a una carga de compresión en la dirección de los mazos de las láminas a 0° , está asociado al cambio de signo que experimentan las deformaciones γ_{xy} en la zona de ondulación máxima de dichos mazos.

Así mismo, se ha comprobado que este cambio de signo es debido a la ondulación que sufren los mazos como consecuencia del curado. Puede afirmarse por ello, que basándose en los resultados obtenidos, es interesante, desde el punto de vista de obtener NCFs con el mejor comportamiento a compresión posible, usar en su fabricación procedimientos que provoquen la menor ondulación posible de los mazos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo recibido por parte de la Unión Europea a través del programa FALCOM, "Failure Performance and Processing Prediction for Enhanced Design with Non-Crimp Fabrics Composites" con número de contrato G4RD-CT-00694 (V Programa Marco) dentro del cual este trabajo ha sido llevado a cabo.

REFERENCIAS

- ÁVILA, R. *Composites manufacturing using non-crimp fabrics (NCF)*, Structure and material center, DERA, Fanborough, HANTS, GU14OLXUK, (2001).
- DRAPIER, S. and WISNOM, M.R. (1998), "A finite element investigation of the compressive strength of non-crimp fabric-based composites". *Composites Science and Technology* 59, pp. 1287-1297.
- DRAPIER, S. and WISNOM, M.R. (1999), "A finite element investigation of the interlaminar shear behaviour of non-crimp fabric-based composites". *Composites Science and Technology* 59, pp. 2351-2362.
- FLORES, M., PARÍS, F. and GRACIANI, E. (2003), "3D Modelling of non-crimp fabrics using finite elements". (in Spanish). In *Proceedings of the 5th Conference on Composite Materials, AEMAC*, pp. 145-152, Zaragoza, Spain.