

Modelización 3D de “Non-Crimp Fabrics” mediante elementos finitos

M. Flores, F. París, E. Graciani

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

RESUMEN

La aparición de nuevas topologías de materiales compuestos, como los “Non-Crimp Fabrics” (NCF) ha hecho necesario el estudio del comportamiento particular de este tipo de composites, analizando la influencia que ciertos parámetros característicos de su geometría tienen sobre las propiedades ingenieriles (rigidez, resistencia, peso, etc) de los NCF.

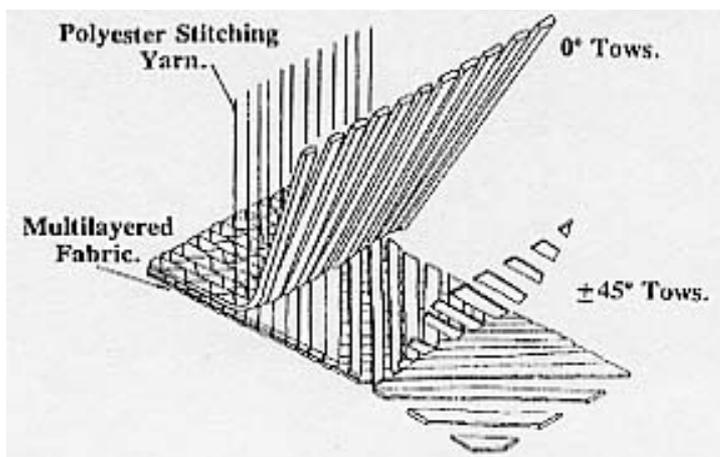
El objetivo de este estudio consiste en analizar, mediante el uso de un modelo tridimensional de elementos finitos, el comportamiento mecánico de un volumen elemental representativo (RVE) de un laminado 0/90 de NCF. El modelo creado tiene parte de su geometría en forma parametrizada, aprovechando para ello las capacidades del programa comercial FEM ANSYS. Esta característica proporciona una herramienta rápida y eficiente para estudiar los efectos que la variación de determinados parámetros geométricos tiene en las propiedades mecánicas del modelo.

1. INTRODUCCIÓN

El interés mostrado recientemente, por la industria aeroespacial y del transporte, en nuevas tipologías de materiales compuestos como los tejidos tridimensionales, cosidos ó los Non-Crimp Fabrics (NCF) ha generado la necesidad de realizar análisis detallados y concretos del comportamiento mecánico de estos tipos de composite, superando las meras generalizaciones del comportamiento de los prepregs (Kamiya et al., 1999). Todas éstas nuevas tipologías están basadas en preformas de fibra que son impregnadas con resina mediante procesos como el RTM (Resin Transfer Moulding), RFI (Resin Film Infusion) ó RIFT (Resin Infusion Flexible Tooling). Las dos mayores ventajas para el uso de los NCF son un mejor comportamiento en las propiedades en la dirección del espesor (rigidez y resistencia sin un significativo deterioro de las propiedades en el plano) además de un menor coste de fabricación comparado al de las estructuras en material compuesto más tradicional debido al uso de tecnologías derivadas de la industria textil.

En éste artículo se procederá a explicar el proceso de modelado tridimensional de Non-Crimp Fabrics usando el Método de los Elementos Finitos (MEF) bajo la herramienta

ANSYS, analizando la respuesta de un determinado volumen elemental representativo (RVE) frente a cargas de compresión. Los resultados obtenidos de este estudio del NCF, como material heterogéneo a nivel mesomecánico, podrían ser, con posterioridad, aplicados sobre un modelo global y homogéneo a nivel macromecánico de una estructura fabricada con NCF.



En la figura 1 se puede observar la estructura básica de fabricación de un NCF, donde los mazos de fibra seca son dispuestos según una orientación y secuencia dada antes de ser cosidos entre sí y finalmente pasar a ser impregnados por la resina mediante uno de los métodos anteriormente reseñados (RTM, RFI ó RIFT).

Fig. 1 - Estructura de un NCF (Drapier y Wisnom, 1998)

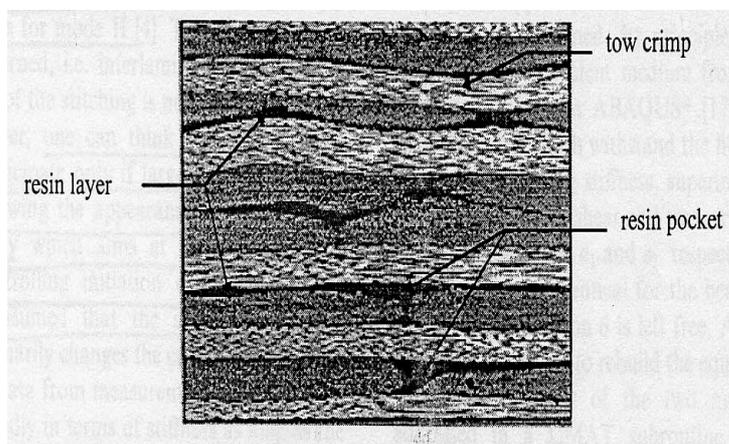
El modelo a nivel meso tridimensional serviría para:

- Estimar la rigidez y resistencia de los RVE considerados
- Ver la influencia que tendrían los diferentes parámetros característicos de los NCF en su comportamiento mecánico
- Analizar los mecanismos de fallo para poder reforzar la estructura interna en la forma adecuada.

2. EL MODELO

La idea bajo la que se va a crear el modelo está inspirada en las conclusiones de Wisnom (1993) donde el autor establece que cuando un material compuesto con una cierta curvatura interna de sus elementos es sometido a compresión se inducen en él tensiones de cortadura debido a la diferencia entre la dirección de aplicación de la carga y la de los elementos encargados de resistirla. Las tensiones de cortadura generadas producirían una mayor desviación de los mazos induciendo más tensiones y desembocando, para un valor de la carga crítico, en un proceso inestable que conduciría al fallo del composite (mecanismo de fallo debido a la inestabilidad en cortadura). Para modelar de forma correcta este modo de fallo del composite, Wisnom (1993) sugiere una serie de parámetros que deben ser tomados en cuenta, como por ejemplo la influencia de la ondulación de los haces de fibras en las propiedades mecánicas del composite tanto antes de la aplicación de la carga como durante ésta, así como la relación no lineal existente entre las tensiones y deformaciones tangenciales, ya que es la rigidez a cortadura de los haces de fibras la más

importante frente a la inestabilidad que va a ser estudiada. Es por ello, que el modelo presentado en este artículo debe cumplir una serie de características, cuya posible influencia en los resultados será ponderada a la finalización del proyecto dentro del cual se desarrolla este estudio.



En la figura 2 aparece una microfotografía de la estructura interna de un NCF donde aparecen mazos a 0° (los más claros), las secciones de los mazos a 90° (de color pardo) y la resina intersticial (de color negro), situada entre mazos ó incluso entre láminas pudiendo ser éstas zonas susceptibles de fallo.

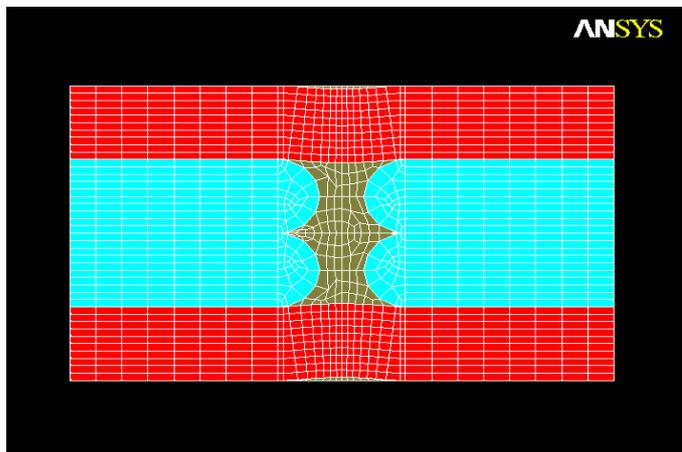
Fig. 2 - Microestructura de un NCF (de Miller, 1996)

Se puede apreciar además en la figura 2, cómo a pesar de que este tipo de material compuesto tiene, originalmente, todas sus fibras dispuestas sin ondulación, al introducirse la resina en el laminado durante su fabricación se producen desplazamientos relativos de los mazos, en los que los haces de una lámina tienden a apoyarse de forma recta, sobre los de las láminas circundantes, curvándose al encontrarse con apoyos de resina entre mazos mucho menos rígidos que el propio haz. La disminución en las propiedades dentro del plano que se ha hallado de forma experimental tendría aquí su explicación, siendo por tanto imprescindible incluir éste efecto en el modelo dispuesto.

Si nos atenemos a sus propiedades mecánicas, se pueden considerar dos tipos de elementos definidos sobre el modelo, elementos mazo y elementos resina. Los elementos mazo estarían dispuestos según el volumen generado al trasladar una sección en forma de óvalo por una línea que es recta en aquellas partes en las que se encuentra sobre ó bajo elementos tipo mazo y es curva (definiendo de este modo el ángulo máximo de ondulación de los haces) cuando se encuentra rodeada por elementos resina, los cuales ocuparían el resto del espacio hasta formar el cubo que define el RVE. La curva de ondulación sobre la que los elementos haces de fibras son extruidos ha sido definida de tal forma que se verifica que su tangente es continua en todos los puntos cambiando su carácter de cóncava a convexa y viceversa durante la ondulación.

Para proceder al modelado de la influencia de la ondulación de los haces en el comportamiento de los NCF, las propiedades mecánicas ortótropas de los elementos que componen los haces han sido referidas a unos ejes propios de los elementos (ejes locales),

definidos según sus nodos y que siguen la curvatura de los haces de fibras, tanto en posición indeformada como deformada, pudiéndose por tanto, analizar la degradación de las propiedades en el plano de los elementos cuyas propiedades estén desalineadas con la carga, elementos con una rigidez menor y donde el fallo por inestabilidad será más probable.

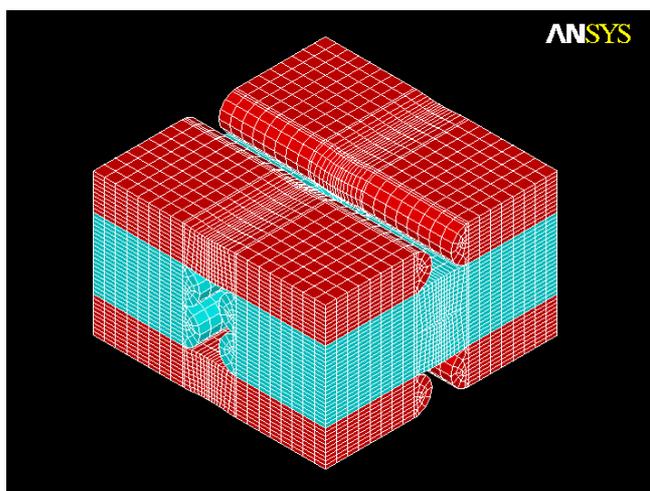


En la figura 3 se puede observar el modelo FE sobre ANSYS de un laminado $[0^\circ/90^\circ]_s$ de un NCF donde los elementos que corresponden a los haces de fibras a 0° con la carga aplicada tienen un color pardo frente al más oscuro de los elementos a 90° y al tono medio de los elementos que representan la resina intersticiales.

Fig. 3 – Modelo FE de un laminado $[0^\circ/90^\circ]_s$

El tipo de elemento empleado en el modelo de MEF ha sido en forma de cubo sólido lineal con ocho nodos por elemento (cinco en su forma degenerada de tetraedro) y con tres grados de traslación por nodo (UX, UY, UZ) donde en ejes globales X correspondería a la dirección horizontal, Y a la dirección vertical y Z a la profundidad.

Dentro del elemento mazo de fibras se considera la dirección 1 local como la dirección longitudinal de las fibras mientras que las direcciones 2 y 3 locales están contenidas dentro del plano de isotropía transversal de la fibra formando un triedro ortogonal con 1.



El modelo tridimensional está caracterizado por la ondulación de los mazos de fibras en las dos direcciones del espacio (X y Z) por lo que, en contraposición con otros modelos bidimensionales (e.g. Drapier y Wisnom, 1998) donde sólo una de las direcciones era tomada en consideración, es capaz de analizar la influencia conjunta que las variaciones de ángulos de los haces de fibras tienen en el comportamiento de los NCF.

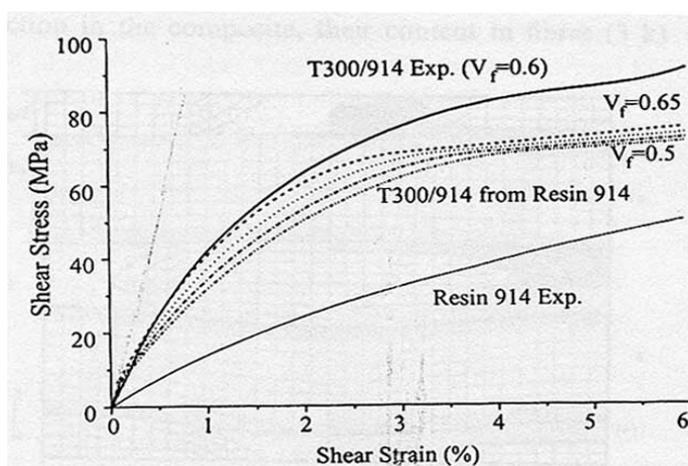
Fig. 4 - Modelo FE de un laminado $[0^\circ/90^\circ]_s$ (sin resina para una mejor visualización)

Los valores de las propiedades mecánicas aplicados en el estudio están basados en un material compuesto T300/914 con una fracción volumétrica de 0.55, análogo al usado por Drapier y Wisnom (1998):

Mazo de fibras	Resina
$E_{11} = 129\text{GPa}$	$E = 4.5\text{ GPa}$
$E_{22} = E_{33} = 9.77\text{ GPa}$	$\nu_m = 0.4$
$\nu_{12} = \nu_{13} = 0.32$	
$\nu_{23} = 0.45$	

Tabla 1 - Propiedades mecánicas de los constituyentes

La no linealidad de la curva de tensiones-deformaciones tangenciales se ha introducido en los elementos de tipo haz de fibras a través de la propiedad ANISO de ANSYS por la cual un elemento posee la capacidad de comportarse de forma lineal para ciertas propiedades y no lineal para otras. En este caso se han tomado como lineales los comportamientos asociados a E_{11} , E_{33} y G_{23} bien porque realmente lo son (E_{11} y E_{33}) ó porque no están, a priori, implicadas en el mecanismo de fallo (G_{23}). La relación entre τ_{12} y γ_{12} a través de G_{12} se ha tomado como no lineal por su papel significativo en el mecanismo de fallo del NCF a compresión.



Para la inclusión de propiedades no lineales se ha hecho uso de la curva de τ_{12} vs. γ_{12} que aparece en la figura 5 donde para el material compuesto elegido (T300/914) y dependiendo del contenido en fibras del composite se obtendría un comportamiento a cortadura u otro. También aparece la curva obtenida del ensayo a cortadura de la resina 914.

Fig. 5 - Relación entre τ_{12} y γ_{12} (de Drapier y Wisnom, 1998)

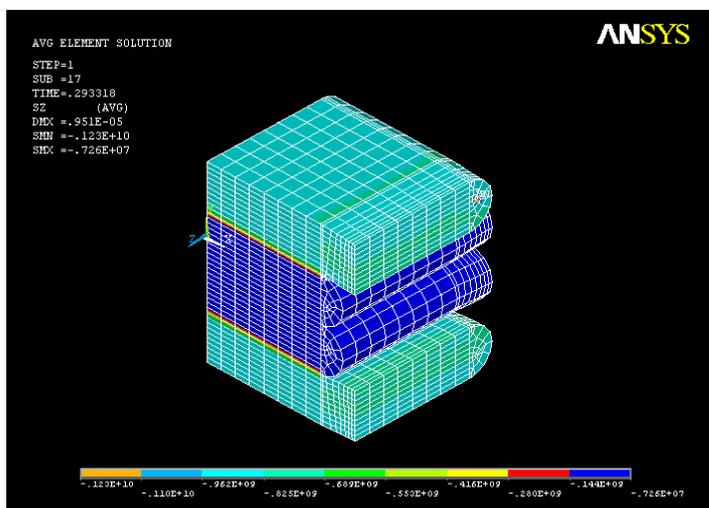
Las condiciones de contorno que se han aplicado al modelo han sido impuestas con la intención de garantizar la compatibilidad de desplazamientos en los límites del RVE. Así, en tres de las caras laterales del modelo se establecieron condiciones de contorno de simetría (impidiendo el desplazamiento en dirección perpendicular a las caras), mientras en

el cuarto perfil se imponía un cierto desplazamiento UX, provocando la carga de compresión en el RVE. Además de esto, en la cara superior e inferior del modelo se han acoplado los desplazamientos UX y UY para que los desplazamientos verticales y horizontales del modelo sean compatibles.

3. RESULTADOS

Se han estudiado dos configuraciones distintas de NCF, frente a inestabilidad de segundo orden y en régimen de grandes deformaciones, con cargas de compresión en dirección global X: primero un laminado simétrico $[0^\circ/90^\circ]_S$ y después otro antisimétrico $[0^\circ/90^\circ]_O$. Se han analizado las tensiones normales en la dirección de la carga σ_{11} así como la tensión tangencial τ_{12} responsable a priori del fallo por inestabilidad a cortadura. Dada la simetría del modelo, sólo es necesario analizar un cuarto del RVE original para optimizar el tiempo de cálculo.

El desplazamiento impuesto es del orden de los 10 μm (siendo equivalente a un $\sim 1\%$ de deformaciones) y su aplicación se produce en forma de función rampa, es decir, de forma lineal y progresiva hasta que se obtiene la inestabilidad. Para cada uno de los estados intermedios para los que el programa es capaz de cumplir las ecuaciones de equilibrio interno se generan resultados parciales cuya evolución puede ser representada para analizar mejor su variación con la carga de compresión.



En la figura 6 se observa que los resultados para σ_{11} son conforme a lo esperado con una relación entre las tensiones máximas en los mazos a 0° (dirección de la carga) y el resto de elementos del orden de la relación entre las rigidez de los haces a 0° y el módulo de Young de la resina y elementos orientados perpendicularmente a la dirección de la carga.

Fig. 6 – Mapa tensional σ_{11} (caso $[0^\circ/90^\circ]_S$)

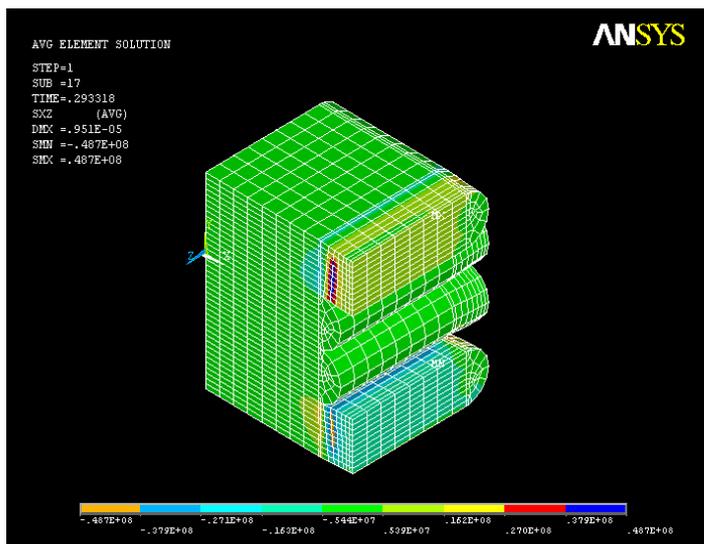


Fig. 7 – Mapa tensional τ_{12} (caso $[0^\circ/90^\circ]_s$)

En la figura 7 los resultados muestran cómo los máximos y mínimos de las tensiones tangenciales sobre los elementos mazo se producen sobre los elementos del haz de fibras más solicitados y donde el ángulo de la ondulación es máximo. Es en estos elementos donde podría suponerse que se empezaría a propagar el fallo que acabaría inestabilizando a todo el RVE.

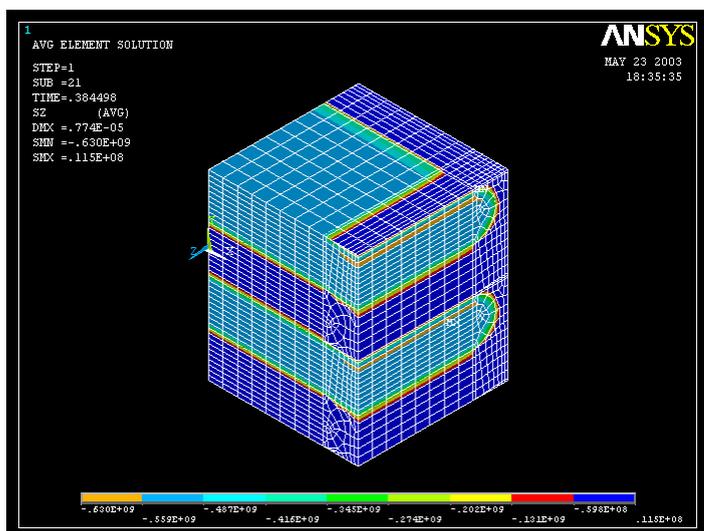


Fig. 8 – Mapa tensional σ_{11} (caso $[0^\circ/90^\circ]_Q$)

En la figura 8 se observa cómo en el caso de laminado antisimétrico $[0^\circ/90^\circ]_Q$ la inestabilidad se produce con unos valores de tensiones de compresión σ_{11} menores que en el caso simétrico. Este resultado estaría de acuerdo a las conclusiones reflejadas por Woo y Withcomb (1997) que relacionan la rigidez de los laminados con su carácter simétricos ó antisimétrico.

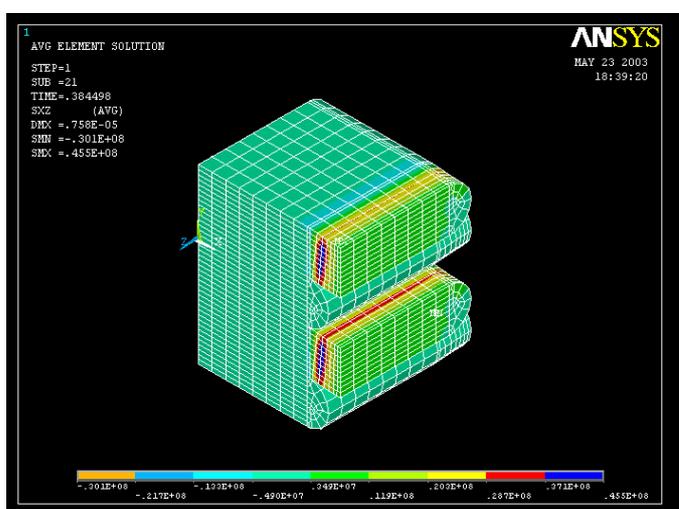


Fig. 9 – Mapa tensional τ_{12} (caso $[0^\circ/90^\circ]_Q$)

En la figura 9 los resultados de las tensiones τ_{12} sobre el RVE vuelven a solicitar más los elementos sometidos a una mayor desviación angular respecto a la dirección de la carga aplicada. Sería en esta sección del mazo donde la aparición de daños y posterior crecimiento de grietas a través de la interfase fibra-matriz sería más plausible.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo tridimensional en elementos finitos sobre dos tipos de laminados (simétrico y antisimétrico) de Non-Crimp Fabrics (NCF). Aspectos muy importantes para el modelado de estos tipos de materiales compuestos como la variación de las propiedades de los haces de fibras con la ondulación de éstos así como la no linealidad de la relación entre las tensiones y deformaciones tangenciales han sido tomados en cuenta.

Otros aspectos para posteriores estudios sobre la misma estructura básica de NCF pasaría por analizar la ocurrencia de la inestabilidad así como conjugar distintos valores geométricos característicos del RVE y propiedades materiales de éste, analizando su influencia en el modo de fallo del laminado.

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 Composite” con número de contrato G4RD-CT-00694 (V Proyecto Marco) dentro del cual este trabajo ha sido llevado a cabo.

REFERENCIAS

- DRAPIER, S. y WISNOM, M.R. (1998). Finite element investigations of the compressive strength of non-crimp fabrics-based composites. *Composites Science and Technology* 59, pp. 1287-1297.
- KAMIYA, R., CHEESEMAN, B. A., POPPER, P. Y CHOU, T. (1999). Some recent advances in the fabrication and design of three-dimensional textile performs: a review. *Composites Science and Composite* 60, pp. 33-47.
- MILLER, A.J. (1996). *The effect of microstructural parameters on the mechanical properties of non-crimp fabric composites*. M. Phil thesis, Cranfield University, School of Industrial and Manufacturing Science.
- WISNOM, M.R. (1993). Analysis of shear instability in compression due to fibre waviness. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 12(11), pp. 1171-1189.
- WOO, K. y WITHCOMB, J. D. (1997). Effect of fiber tow misalignment on the engineering properties of plain weave composites. *Composite Structures* 37 (3/4), pp. 343-355.