

ESTUDIOS PRELIMINARES PARA DEFINIR UN NUEVO ENSAYO DE PELADO EN UNIONES ADHESIVAS COMPOSITE-COMPOSITE

A. Estefani, J. Cañas, A. Blázquez y F. París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.

RESUMEN

Las uniones son, por lo general, los puntos más débiles de cualquier estructura. El comportamiento de las mismas en metales está ampliamente estudiado, mientras que aún quedan aspectos por clarificar en el caso de que la unión se realice entre laminados de material compuesto con el uso adhesivos.

El presente trabajo pretende ayudar a caracterizar las uniones encoladas composite-composite mediante la realización de ensayos de pelado. Actualmente la evaluación de la calidad del encolado se realiza mediante el ensayo de fractura interlaminar (G_{Ic}). Sin embargo este ensayo no fue ideado para evaluar las uniones encoladas, pues en concreto, la energía a fractura interlaminar crítica (G_{Ic}), ver (ASTM D 5528-01, AITM 1-0053 e I+D-E-290), no depende exclusivamente del encolado ni de la preparación superficial, sino que este valor podría verse afectado por otros parámetros (propiedades de los adherentes, parámetros geométricos, etc).

Como alternativa al ensayo de fractura interlaminar, se pretende desarrollar y diseñar un ensayo de pelado sobre laminados de carbono, donde la carga de pelado se mantenga constante durante el ensayo. Los ensayos estandarizados (pelado de campana, o pelado de tambor), no son de aplicación directa, ya que provocan una flexión en la probeta incompatible con la rigidez de los laminados a ensayar.

Tal como indica el título del trabajo, se trata de presentar una serie de estudios preliminares para la definición de aspectos relacionados con el ensayo, partiendo de la elección de la posible configuración del mismo, así como analizar los efectos sobre los resultados del ensayo de factores tanto geométricos de los laminados y de los útiles del ensayo, como parámetros asociados a la modelización numérica del adhesivo entre láminas, como sería definir correctamente la ley de comportamiento cohesiva del adhesivo entre láminas.

Por otro lado se describe el modelo numérico que se ha utilizado para definir la propuesta de ensayo, haciendo hincapié en la modelización del contacto entre láminas entre sí y entre el útil del ensayo y el laminado.

Como técnica numérica se ha empleado el Método de los Elementos Finitos. Dicho método ha sido usado para la simulación de ensayos similares (Miravete et al. 2002 y Tay. Te 2003). El modelo aquí planteado implementa un modelo cohesivo para simular el efecto del adhesivo (M.F.S.F de Moura et al. 2006).

El objetivo principal es generar un ensayo que permita la aceptación de un tejido pelable en función de su cara de pelado, supuestamente que fuera posible diseñar un ensayo en el que la carga se mantiene constante. Asimismo se trata de realizar un estudio paramétrico del dispositivo de ensayo, de manera que permita estudiar diferentes aspectos para la puesta en marcha del ensayo que por la vía puramente experimental podían resultar muy gravosos.

1. CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO

Tal como se ha comentado anteriormente, la idea básica es diseñar un ensayo de pelado sobre laminados de carbono, donde la carga de pelado se mantenga constante durante el ensayo. Se pretende generar un ensayo que permita la aceptación de un pelable en función de la carga de pelado, permitiendo una flexión en el ensayo compatible con la rigidez de los laminados.

Como punto de partida para el estudio de nuevas alternativas se podría pensar en un ensayo como el esquematizado en la Figura 1.

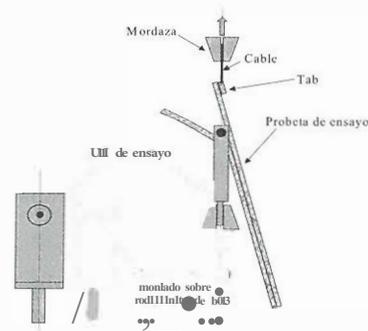


Fig. 1- Esquema de la configuración propuesta

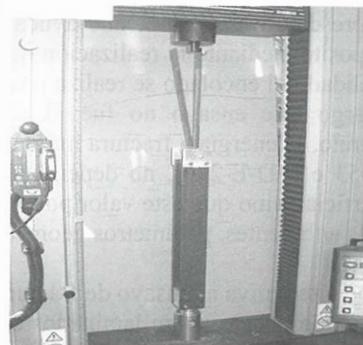


Fig. 2- Disposición del ensayo en Laboratorio

En esta configuración el útil básico es un cilindro macizo que se introduce entre las láminas de la probeta. Un extremo de la probeta se encuentra conectado a una mordaza superior y el otro extremo se conecta a través de un útil a la otra mordaza. Con esta configuración se tira hacia arriba en el extremo superior de la probeta, provocando el deslizamiento del cilindro entre las láminas con la consiguiente separación de las mismas. Al tener libre el extremo inferior de la probeta, se consigue que conforme va avanzando el cilindro las láminas puedan rotar y por tanto ubicarse de manera que los desplazamientos no se encuentren restringidos.

Antes de pasar a describir el modelo numérico llevado a cabo, se realizaron algunas pruebas en el laboratorio de esta posible configuración, utilizando un preimpregnado de designación: AS4/8552(Z-19775) y un adhesivo de denominación FM 300 k-0.5. El objetivo de esta prueba era poder establecer la viabilidad de realizar un ensayo de pelado en laminados composite-composite. En la Figura 2 se presenta el aspecto de cómo quedó la probeta tras el ensayo y en la Figura 3 la curva carga-desplazamiento del rodillo que quedó registrada durante la realización del ensayo.

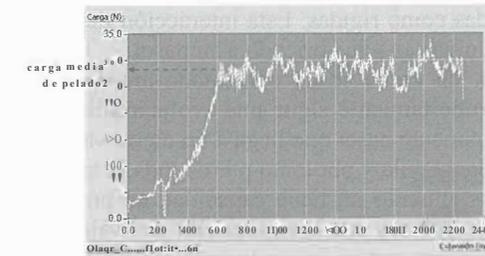


Fig. 3- Registro carga-desplazamiento del rodillo

Conviene en primer lugar indicar que el primer período de carga (que no tiene interés para nuestro estudio) presenta una evolución no lineal debido a la reorientación de la probeta con la carga (aumentando la rigidez a medida que avanza esta reorientación). En segundo lugar conviene establecer algunas de las razones que han podido dar lugar a la presencia de los saltos en la fase de pelado. En primer lugar pueden deberse al soporte del adhesivo (un FM 300 k-0.5) cuya estructura interna puede estar en el sustrato, al menos parcialmente, de estos saltos. En segundo lugar el giro de la probeta puede afectar a las zonas de contacto donde la presencia de un coeficiente de rozamiento puede originar saltos al vencerse la fuerza de rozamiento en cada nueva configuración que se va generando. Finalmente el propio sistema de adquisición de datos puede tener alguna influencia en la señal obtenida dado el muy bajo nivel de la carga a registrar. En todo caso esta situación nada tiene que ver con los saltos que aparecen en la determinación de la tenacidad a la fractura G_{Ic} , saltos que tienen que ver con la progresión discontinua del daño en el material.

En todo caso, tal y como se puede observar en la Figura 3, con esta configuración ha sido posible encontrar un ensayo con una carga media de pelado que permanece razonablemente constante, con el avance del rodillo.

2. MODELO NUMÉRICO

Para poder analizar la influencia de los parámetros asociados al ensayo, y dado que dicho estudio puede resultar gravoso, se procede a la creación de un modelo numérico del ensayo.

El modelo numérico se ha realizado aplicando el Modelo de Elementos Finitos (MEF), utilizando para ello el programa comercial ANSYS v.8.0. El modelo consiste en dos láminas de material compuesto en contacto una con la otra. Entre las dos láminas se encuentra el adhesivo, el cual se modela con unos elementos muelles con capacidad de desactivación tras alcanzar una cierta elongación. También se define un elemento rígido (cilindro) que modela el útil que se introduce entre las láminas.

El modelo incluye dos tipos de contacto según el comportamiento elástico de los sólidos en contacto, clasificándolo en dos grupos: contacto deformable-deformable, donde los cuerpos que entran en contacto se deforman, es decir, tienen una rigidez similar y contacto rígido-deformable, donde una o varias de las superficies que entran

en contacto son tratadas como rígidas. Esta interacción tiene lugar entre el cilindro que va avanzando y las láminas que va abriendo a su paso.

La capa de adhesivo, tal como se ha comentado anteriormente se modela mediante muelles, la ley de comportamiento sigue una evolución lineal, de manera que la carga va aumentando gradualmente hasta que llega a un cierto valor a partir del cual el muelle se descarga con pendiente nula y por tanto pierde toda la capacidad de carga, ver Figura 4. Esta ley de comportamiento no tiene capacidad de propagación del daño. Los dos parámetros que definen esta ley son la rigidez (K) y el valor de ruptura (RUPT), el cual fija el alargamiento máximo que es capaz de soportar el muelle. A partir de este valor el muelle se rompe y deja de actuar. Este elemento actúa entre nodos en contacto de ambas láminas.

En cuanto al contacto rígido-deformable, éste se asocia a lo que se denomina un "nodo piloto" que gobierna el movimiento de toda la superficie, por lo que al definir el desplazamiento del cilindro, éste se impone en el "nodo piloto", siendo los grados de libertad de este nodo los representantes del movimiento de toda la superficie rígida.

El modelo utiliza los siguientes elementos: Elementos PLANE42 para las láminas; estos elementos se definen por 4 nodos, teniendo dos grados de libertad en cada uno. Elementos CONTACT175 - TARGET169 para el contacto entre láminas, CONTACT161-TARGET169 para el contacto entre el cilindro y las láminas y elementos COMBIN37 para los muelles con capacidad de desactivación. En la resolución del problema se han supuesto las hipótesis de tensión plana, grandes desplazamientos y material elástico lineal.

3. PASOS DE CARGA DEL MODELO NUMÉRICO

El proceso de resolución consta de cuatro pasos de carga distintos:

1. Separación inicial de las láminas. Este primer paso consiste en separar las láminas la cantidad necesaria para permitir la introducción del cilindro entre las mismas (Figura 5). El desplazamiento se realiza en un sistema de coordenadas girado 15 grados de Y (eje vertical) a X (eje horizontal) en la lámina inferior. La lámina superior tiene impedidos los desplazamientos en su extremo (zona de cogida de la mordaza). La cantidad que hay que desplazar ha sido tomada como el radio del cilindro.
2. Introducir el cilindro una pequeña cantidad entre ambos laminados (ver Figura 6) manteniendo el desplazamiento impuesto en el extremo de la lámina inferior. El desplazamiento en el cilindro está prefijado en el "nodo piloto" y es paralelo a la dirección X. La probeta en su extremo inferior se encuentra libre de restricciones al movimiento.

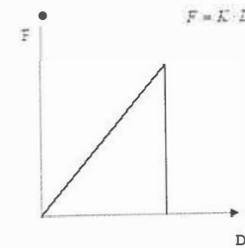


Fig. 4 Ley de comportamiento

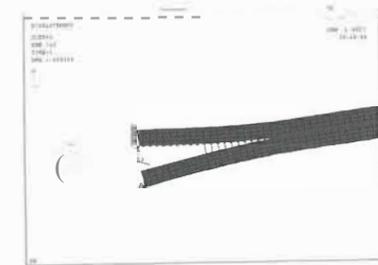


Fig. 5- Separación inicial

3. Eliminación de los desplazamientos impuestos en la lámina inferior. Dejar libre de desplazamiento el extremo de la lámina inferior para permitir que cuando el cilindro avance, la lámina inferior tenga capacidad de estar libremente. Para ello se elimina el desplazamiento impuesto y se mantiene todo lo demás sin variación.
4. Desplazamiento del cilindro entre láminas. Se desplaza el cilindro en dirección paralela al eje X, permaneciendo tangente a la lámina superior y provocando a su paso la deformación de la inferior y la rotura de los muelles que modelan el adhesivo tras alcanzar el valor de ruptura (ver Figuras 7, 8 y 9).

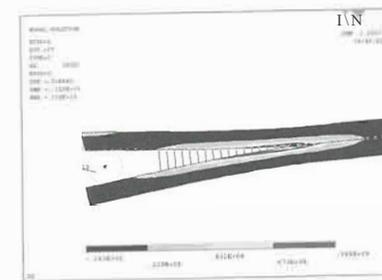


Fig. 6- Introducción
Del cilindro. $u_x = 3$ mm

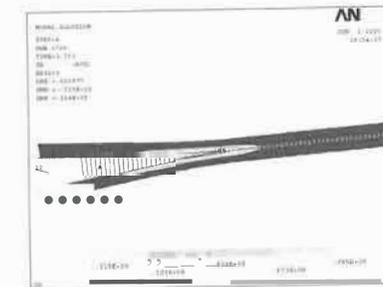


Fig. 7- Deformada Y (5x)
para u_x cilindro= 23 mm

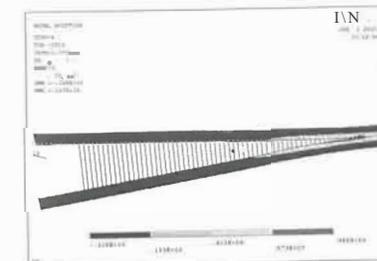


Fig. 8- Deformada y (5x)
Para u_x cilindro= 52 mm



Fig. 9- Deformada y (5x)
para u_x cilindro= 76 mm

4. ESTUDIO PRELIMINAR DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS EN LOS RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO

Los parámetros de partida para la configuración inicial fueron los siguientes: espesor de la probeta: 5mm; longitud inicial de la grieta: 10 mm; radio del cilindro (rodillo): 2.25mm; desplazamiento impuesto para el primer paso de carga: 2.25 mm rotado el nodo 15° en la dirección de Y a X; distancia entre muelles a lo largo del eje x: 2.5mm. Las propiedades del material son: $E_1 = 130$ GPa; $E_y = 130$ GPa; $E_2 = 5$ GPa; $\nu_y = 0.09$; $\nu_{yz} = 0.04$; $\nu_{22} = 0.09$; $G_{xy} = 4.478$ GPa; $G_{yz} = 4.478$ GPa; $G_{xz} = 4.478$ GPa. Los parámetros que definen el comportamiento de los muelles son: $K = 1340000$ N/m y $Rupt = 0.1$ mm

La Figura 10 representa una típica evolución de la carga en la dirección vertical (F_x en Newtons) que representa la reacción del rodillo según va avanzando, frente al desplazamiento horizontal (u_x en metros) del rodillo. Puede observarse cómo existe un primer tramo de comportamiento lineal que correspondería a un intervalo de valores de la fuerza F_x en el que no se produce fallo de ninguno de los muelles. La zona de saltos de F_x corresponde a intervalos de valores de los desplazamientos que conllevan el fallo de los muelles. No debe en ningún caso establecerse ninguna relación entre los saltos en las predicciones numéricas, que básicamente se deben a la discretización empleada y a los valores de rigidez y ruptura empleados, y los saltos en el experimento, cuyo origen ya fue anteriormente discutido. En lo que se refiere a la Figura 11, una bajada en la evolución de F_x , significa que uno o varios muelles han fallado y una subida implica que la penetración del cilindro entre las láminas no conlleva la rotura de ningún muelle.

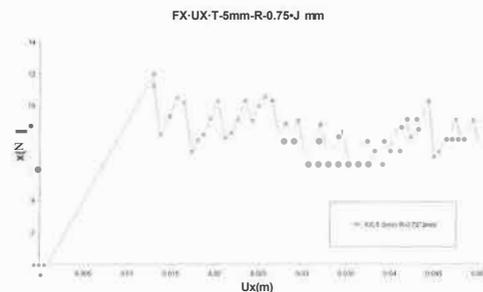


Fig. 10- Evolución de la carga frente a su desplazamiento

El modelo numérico simple que aquí se presenta pretende básicamente servir de herramienta para dilucidar la influencia de ciertos factores. A título de ejemplo se consideran a continuación las influencias del radio del cilindro y de la rigidez de los muelles.

4.1 Influencia del radio del cilindro

En la Figura 11 se representa la influencia del radio del cilindro, habiéndose empleado cuatro valores diferentes.

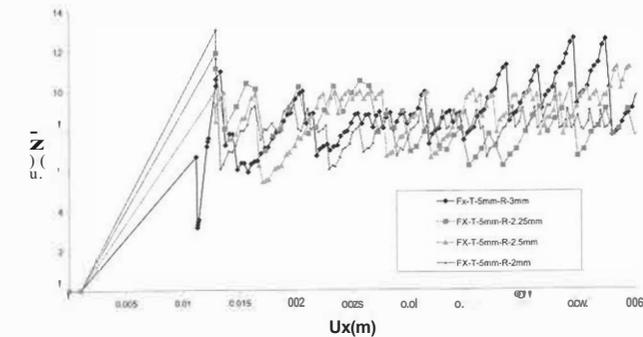


Fig. 11- Fuerza-desplazamiento para diferentes valores del radio del cilindro.

Aunque en el tramo lineal la respuesta es diferente (a menor valor del radio mayor valor de la carga que se requiere) ello no es significativo para el objeto de este estudio. Lo interesante es observar que en este caso los valores medios de la zona en que se van rompiendo los muelles aparecen razonablemente constantes, lo que induce a pensar que el diámetro del cilindro no es un parámetro significativo del ensayo.

4.2 Influencia de la rigidez de los muelles

En la Figura 12 se presenta la influencia de variar la rigidez del muelle, manteniendo constante la longitud de ruptura, habiendo considerado tres valores de la rigidez.

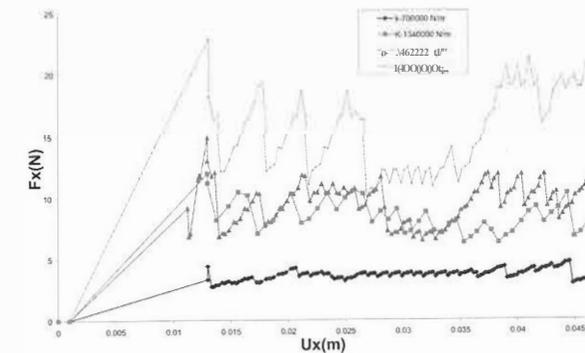


Fig. 12- Fuerza-desplazamiento del cilindro para diferentes valores de las rigideces de los muelles.

La rigidez de los muelles, que para un desplazamiento de ruptura fijado repercute en la fuerza que hay que aplicar para romper la unión, sí que influye en las predicciones obtenidas. Así, aunque la magnitud de los saltos es diferente para los diferentes valores de la rigidez, puede observarse la evolución del valor medio de F_x con la variación de la rigidez. Así, cuanto mayor es la rigidez de los muelles, la carga media de penalización aumenta, es decir, cuesta más esfuerzo que el cilindro avance entre las dos láminas. Comparando los dos valores extremos de las rigideces empleadas en la Figura 12,

mientras que una distribución suave del crecimiento del daño aparece para el menor valor de K (700000 N/m), para el caso del mayor valor de K (2000000 N/m) la rigidez es tan elevada que el cilindro puede penetrar sin que se produzcan roturas de muelles, lo cual es responsable de las subidas significativas de F_x con U_x .

5. CONCLUSIONES

Se ha constatado inicialmente la viabilidad experimental de realizar un estudio experimental de pelado para evaluar la integridad estructural de una unión encolada composite-composite. A continuación se ha desarrollado un modelo numérico simple basado en el método de los elementos finitos que pretende servir de herramienta para dilucidar, y en su caso cualificar y predecir, la influencia en el ensayo de diferentes factores. Los resultados obtenidos para la influencia del radio del rodillo y de la rigidez del adhesivo concuerdan con lo esperado y permiten la aplicación del modelo para estimar la influencia de factores como el espesor del laminado, los pasos de carga, la variación en el número de subpasos, abriendo también la posibilidad de estudio de diferentes leyes cohesivas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos TRA2005-06764 y TRA2006 08077 del Ministerio de Educación y Ciencia y los proyectos de excelencia TEP-1207 y TEP-02045 de la Junta de Andalucía.

6. REFERENCIAS

ASTM D 5528-01. Test method for Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional Fiber-reinforced polymer matrix composite.

ASTM 1-0053. Carbon fiber reinforced plastics. Determination of fracture toughness energy of bonded joints. Mode I GIC test.

ISO 15849-2. Ensayo de tenacidad a la fractura interlaminar sobre estratificado de fibra de carbono.

ANTONIO MIRAVETE Y MIGUEL A. JIMENEZ (2002). Application of the finite element method to prediction of onset of delamination growth. *Appl Mech Rev* vol 55, no 2.

TAY. T. E. (2003). Characterization and analysis of delamination fracture in composites: An overview of developments from 1990 to 2001. *Departments of Mechanical Engineering National University of Singapore. Appl Mech Rev* vol 56, no 1.

M.F.S.F. DE MOURA, J.A.G. CHOUSAL (2006). Cohesive and continuum damage models applied to fracture characterization of bonded joints. *International Journal of Mechanical Science* 48.

M. E.J. GÓMEZ (2006). Modelización del ensayo de tenacidad a fractura interlaminar en materiales compuestos. Proyecto de Fin de carrera. Universidad de Sevilla