

Influencia de la geometría de adherentes y adhesivo en el comportamiento de uniones adhesivas a solape simple en laminados

Elena M. Moya-Sanz, Lorena M. Fernández-Cañadas, Inés Iváñez, Shirley K. García-Castillo

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras,
Universidad Carlos III de Madrid, España

RESUMEN

En las uniones adhesivas de materiales compuestos la transferencia de carga y la concentración de tensiones entre los adherentes y el adhesivo, son aspectos fundamentales a estudiar. En este trabajo se ha desarrollado un modelo numérico 2D, mediante el código de elementos finitos Abaqus/Standard, que permite estudiar uniones adhesivas a solape simple de laminados de cinta sometidos a cargas en el plano. La unión adhesivo-adherente se ha modelizado mediante el uso de elementos cohesivos, que permiten evaluar la degradación del adhesivo durante la aplicación de la carga. El modelo se ha validado comparando sus resultados con datos de carga de rotura tomados de la literatura científica. Tras la validación se ha evaluado la influencia de la variación de la geometría de los adherentes y adhesivos en el comportamiento de la unión. Se analizarán parámetros tales como la longitud de solape, el espesor del adhesivo, el escalonado del adherente y el ángulo de biselado de los adherentes y adhesivos.

PALABRAS CLAVE: uniones adhesivas, adherentes, adhesivo, geometría, FEM.

1. INTRODUCCIÓN

De forma general, los componentes estructurales fabricados con materiales compuestos no se fabrican en piezas monolíticas, si no que su montaje implica la unión piezas de diferentes geometrías y tamaños. La unión de estas piezas puede llevarse a cabo mediante la utilización de remaches, roblones o tornillos, dando lugar a uniones mecánicas, o mediante uniones adhesivas. A diferencia de las uniones mecánicas, las uniones adhesivas añaden un mínimo de peso estructural y eliminan los concentradores de tensiones debido a la ausencia taladros [1]. Sin embargo, las uniones adhesivas presentan un inconveniente en la transferencia de carga entre los adherentes y el adhesivo, debido a que en la zona de solape tienen lugar tensiones de cortadura y de pelado con una distribución no uniforme [2] que dan lugar a una incertidumbre en la resistencia mecánica de la unión, lo que conlleva la utilización de mayores coeficientes de seguridad y, por consiguiente, un diseño no optimizado [3].

Las uniones adhesivas a solape simple son las más utilizadas debido a su simplicidad y eficiencia. Su principal desventaja es la concentración de tensiones de cortadura y pelado en los extremos de la zona de solape. Algunas de las alternativas que se pueden

adoptar para mejorar la eficiencia de este tipo de unión son: variar la geometría de los adherentes, adhesivo y del rebose [3, 4].

Las metodologías que permiten estudiar el comportamiento mecánico son de tipo analítico, numérico y experimental. En el caso de los modelos analíticos y numéricos es fundamental el conocimiento de las propiedades mecánicas de los adherentes y el adhesivo [5]. Existen tres aproximaciones que permiten modelizar el fallo de la unión adhesiva: Mecánica de Medios Continuos, Mecánica de la Fractura y Modelos de Daño Progresivo. Los modelos basados en daño progresivo utilizan elementos cohesivos, que permiten combinar aspectos de la Mecánica de Medios Continuos para predecir el inicio de fallo y de la Mecánica de la Fractura para prever el crecimiento del mismo [6].

En uniones adhesivas las variables geométricas de los adherentes y el adhesivo son factores determinantes para un diseño óptimo [3]. En este trabajo se ha desarrollado un modelo numérico, implementado en el código de elementos finitos Abaqus/Standard, que permite estudiar uniones adhesivas a solape simple de laminados que se encuentran sometidos a cargas de tracción. El modelo se validará y se evaluarán diversas variables geométricas del adherente y el adhesivo.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Con el objetivo de evaluar la influencia de diferentes parámetros geométricos en el comportamiento mecánico de uniones a solape simple, se ha desarrollado un modelo numérico 2D utilizando el código Abaqus/Standard.

El modelo está constituido por dos materiales: un laminado unidireccional carbono-epoxi (SEAL® Texipreg HS 160 RM) de 16 láminas, definido como material elástico-lineal y ortótropo, que conforma los adherentes de la unión y un adhesivo dúctil de base de poliuretano, SikaForce 7888. Las propiedades de ambos se encuentran recogidas en el trabajo desarrollado por Neto et al. [5].

El adhesivo se ha modelizado mediante el uso de elementos cohesivos, que permiten estudiar la separación de dos interfaces, tomando la forma de una ley de tracción-separación. Para que el material quede totalmente definido por sus propiedades cohesivas, es preciso conocer la tensión máxima que puede transmitir y la separación antes de iniciar el daño, así como la energía de rotura en cada uno de los modos, recogidas todas en la Tabla 1. Según las propiedades descritas por el fabricante [7], el adhesivo tiene el mismo comportamiento a tracción y a cortadura hasta comenzar la degradación del mismo.

Tabla 1. Propiedades cohesivas del adhesivo [5,7]

| | | | |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| $E = 1.89 \text{ GPa}$ | $t_n^0 = 28.60 \text{ MPa}$ | $G_n^c = 702.3 \text{ N/m}$ | $\delta_n^0 = 0.015 \text{ m}$ |
| $G = 0.727 \text{ GPa}$ | $t_s^0 = 28.60 \text{ MPa}$ | $G_s^c = 8720 \text{ N/m}$ | $\delta_s^0 = 0.015 \text{ m}$ |

La longitud de los adherentes es de 140 mm, con un espesor de 2,4 mm. El adhesivo tiene un espesor de 0,2 mm y la longitud de solape es de 40 mm, tal y como se muestra en la Figura 1. La unión adhesivo-adherente se ha llevado a cabo a través de

interacciones tipo “Tie”, que no permiten desplazamiento relativo entre las superficies.

Figura 1. Esquema del problema

Para el mallado de los adherentes se han utilizado elementos CPE4 de 4 nodos, con deformación plana y compatibles con los elementos empleados en el adhesivo, COH2D4, elemento cohesivo de 4 nodos. Se ha realizado un análisis de la sensibilidad de la malla y se ha seleccionado el tamaño de elemento de menor coste computacional sin comprometer los resultados.

La validación del modelo se ha realizado con los resultados numéricos y experimentales obtenidos por Neto et al. [5]. En la Figura 2 se muestra la variación de la carga de rotura de la unión para diferentes longitudes de solape, obteniendo una desviación máxima, aislada, del 13% para una longitud de solape de 10 mm, el resto de desviaciones no superan el 5,6% con respecto a los datos experimentales. Por lo tanto, se puede considerar validado el modelo.

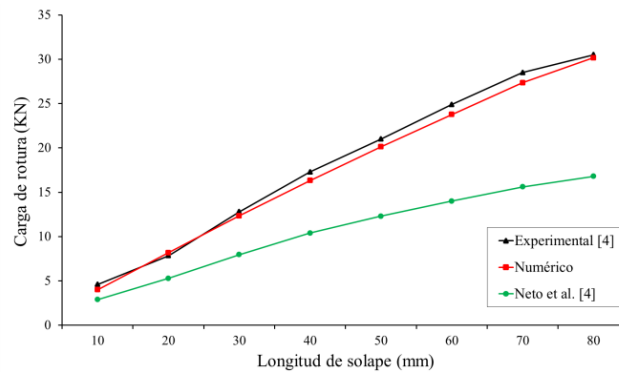


Figura 2. Validación del modelo numérico

3. RESULTADOS

Para evaluar la influencia de las variaciones geométricas en la carga de rotura y en el desplazamiento vertical del adherente, se han realizado algunas variaciones geométricas con respecto al modelo de referencia mostrado en la Figura 1. Tales variaciones son: espesor del adhesivo, escalonado del adherente (ver esquema en la Figura 3) y ángulo de biselado del adherente, del adhesivo y de ambos (ver esquemas en la Figura 5). Estas variaciones están enfocadas a reducir las tensiones de pelado en el adhesivo [8] y así valorar el efecto de la excentricidad de las cargas en la unión. Los resultados se presentan como variaciones porcentuales con respecto a los del modelo de referencia

que se muestra en la Figura 1, que tiene una carga de rotura de 16,324 KN y un desplazamiento vertical del adherente de 0,0293 mm. La variación del espesor del adhesivo se realizó desde 0,01 mm hasta 0,4 mm, observándose una disminución de la variación de la carga de rotura desde 101,24 % hasta un 99,96 %. Por el contrario, el desplazamiento vertical se ve incrementado desde un 92,78 % hasta un 111,11%.

En el escalonado, se han estudiado tres espesores de escalón que corresponden a un 25%, 50%, 75% del espesor del adherente. La Figura 3 muestra las variaciones de la carga de rotura en función de la longitud del escalón. Se observa que para la mínima longitud de escalón estudiada, 2,5 mm, la variación en la carga de rotura es independiente del espesor, es decir, para longitudes muy pequeñas, el escalonado no supone una mejora y el comportamiento es similar a la unión sin escalón. Para la máxima longitud de escalón estudiada, se observa una reducción de la carga de rotura en el caso de escalón de menor espesor. Para todos los casos estudiados existe una relación óptima de espesor/longitud en porcentaje del escalón que se encuentra entre un 6,4% y 8%.

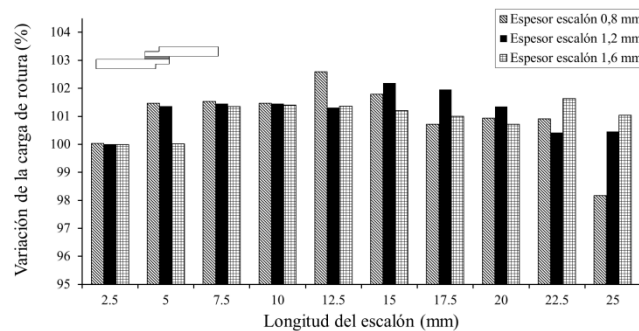


Figura 3. Variación de la carga de rotura para diferentes escalonados

En relación con los desplazamientos verticales en función de la longitud de escalón (Figura 4), se observan tendencias similares para los tres espesores estudiados. Alcanzándose el desplazamiento mínimo en relaciones de espesor del escalón entre el 5,3% y el 9,6% de la longitud del mismo. Adicionalmente, los mínimos desplazamientos se obtienen para el escalón de menor espesor.

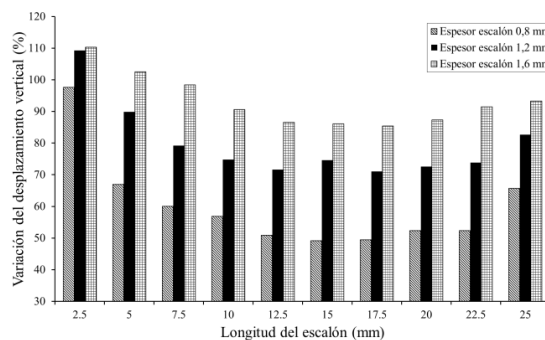


Figura 4. Variación de del desplazamiento vertical para diferentes escalonados

Se ha estudiado el biselado del adherente, del adhesivo y de ambos y sus resultados se muestran en las Figuras 5 y 6, con un primer caso de ángulo de biselado de 90° que se corresponde con el modelo inicial. Un biselado del adherente mayor a 20° tiene una influencia despreciable en la carga de rotura, como consecuencia, el biselado tanto de los adherente como de los adherentes y el adhesivo tienen efectos similares sobre la carga de rotura. El diseño óptimo, de todos los estudiados en el biselado de los adherentes y el adhesivo con un ángulo de 15° .

En la Figura 6 se muestra una considerable disminución de la variación del desplazamiento vertical para ángulos de biselado reducidos. Sin embargo, el biselado de los adherentes puede llegar a ser perjudicial para ángulos desde 90° a 25° , ya que se incrementa el desplazamiento vertical por encima del desplazamiento del modelo de referencia.

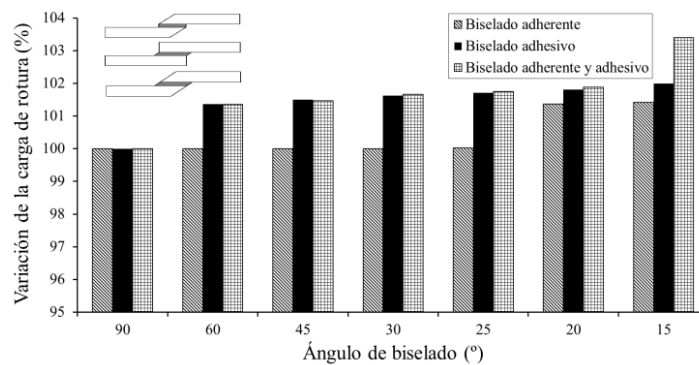


Figura 5. Variación de la carga de rotura para diferentes biselados

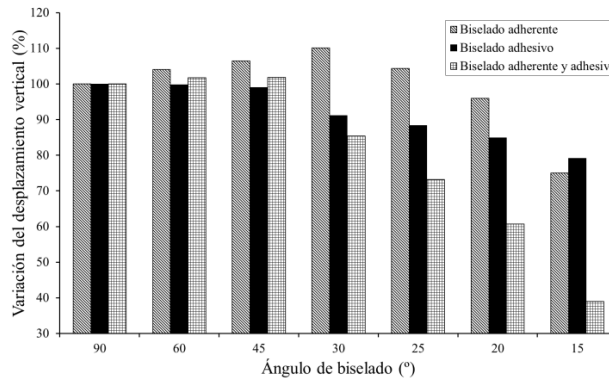


Figura 6. Variación de del desplazamiento vertical para diferentes biselados

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un modelo numérico, implementado en el código de elementos finitos Abaqus/Standard, que permite estudiar uniones adhesivas a solape simple de laminados que se encuentran sometidos a cargas de tracción. El modelo se ha validado y se han podido evaluar diversas variables geométricas de los adherentes y el

adhesivo buscando una solución de compromiso entre la carga que soporta y la excentricidad de la misma.

Los escalones de pequeña longitud no suponen una mejora en la carga de rotura, pues su comportamiento es similar al de una unión sin escalón. La relación espesor/longitud del escalón de 6,4% a 8 % permite obtener el máximo incremento de carga de rotura. Los mínimos desplazamientos verticales se obtienen para una relación espesor/longitud del escalón de 5,3% y el 9,6%. A la vista de estos resultados, se concluye que una relación espesor/longitud de escalón $7,2\pm 0,8$ % proporciona una unión optimizada, según los términos aquí estudiados.

El biselado de los adherentes, solo tiene efectos significativos sobre las variables estudiadas para ángulos menores a 20° , mientras que los efectos del biselado del adhesivo están siempre presentes. A la vista de los resultados, la solución óptima es el biselado de 15° del adherente y el adhesivo de forma simultánea. Los desplazamientos verticales de los adherentes se ven muy reducidos para dicha solución.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la financiación recibida para el desarrollo de este trabajo del Ministerio de Economía y Finanzas de España en el marco del proyecto DPI2013-42240-R.

REFERENCIAS

1. KWANG-SOO, K., YEONG-MOO, Y., GWANG-RAE, C., CHUN-GON, K. (2006). Failure prediction and strength improvement of uni-directional composite single lap bonded joints *en Compos Struct.*, 72, pp 477-485.
2. MAGALHÃNES, A.G., DE MOURA, M.F.S.F., GONÇALVES, J.P.M. (2005). Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials *en Int J Adh & Adh.*, 254, pp. 313-319.
3. BANEJA, M.D. Y DA SILVA, L.F.M. (2009). Adhesively bonded joints in composite materials: an overview *en Proceedings of the institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications* 223.
4. VICENTINI, D.F. (2008). Análisis 3D elástico y 2D elastoplástico de una esquina bimaterial en uniones adhesivas (Tesis de Máster). Universidad de Sevilla, Sevilla.
5. NETO, J.A.B.P., CAMPILHO, R.D.S.G., DA SILVA, L.F.M. (2012). Parametric study of adhesive joints with composites *en Int J Adh & Adh.*, 37, pp. 96-101.
6. SENTHIL, K., AROCKIARAJAN, A., PALANINATHAN, R., SANTOSH, B., USHA, K.M. (2013). Defects in composite structures: its effects and prediction methods- A comprehensive review *en Compos Struct.*, 106, pp. 139-149.
7. GRUPO SIKA. Hoja de Datos del Producto (Versión 3), SikaForce®-7888 L10. Recuperado de www.esp.sika.com. (Última visita: 17/04/2015).
8. CAMPILHO, R.D.S.G., DE MOURA, M.F.S.F., DOMINGUES, J.J.M.S. (2009). Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes *en Int J Adh & Adh.*, 29, pp. 195-205.