

Análisis de la localización del daño en laminados empleando un modelo de daño discreto

Ever J. Barbero,

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, West Virginia University, USA
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad
Carlos III de Madrid, España

Marta M. Moure, Sonia Sánchez-Sáez, Enrique Barbero

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

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado un estudio de la localización del daño en laminados utilizando un modelo basado en la Mecánica del Daño Discreto. Este modelo tiene la ventaja de requerir una única variable de estado, la densidad de fisuras existente en el laminado. Se ha formulado en un volumen representativo del laminado y ha sido implementado en Abaqus. La localización del daño se ha analizado en dos situaciones, placa con daño inicial y placa con agujero. Se ha observado que el modelo predice la localización del daño en ambos casos.

PALABRAS CLAVE: Localización, daño, densidad de fisuras

1. INTRODUCCIÓN

Existen diversas metodologías para modelizar el fallo de materiales compuestos que han sido utilizadas en la literatura científica, tales como los criterios de fallo (generalmente basado en tensiones) o la Mecánica del Daño Continuo. Estas metodologías tienen algunas limitaciones, por ejemplo los criterios de fallo proporcionan información sobre la iniciación del fallo pero no sobre su evolución; y los modelos de Mecánica del Daño Continuo requieren parámetros de difícil obtención experimental. Por ello, frecuentemente ambas metodologías se combinan, empleando un criterio de fallo para predecir el fallo y la Mecánica del Daño Continuo para analizar la evolución.

Una alternativa a estas metodologías es la Mecánica del Daño Discreto. De entre los modelos basados en esta metodología, el propuesto por Barbero y Cortes [1] tiene la ventaja de requerir una única variable de estado, la densidad de fisuras existente en el laminado.

El fallo de un laminado se suele iniciar en puntos donde existen defectos en el material o en los que existe una concentración de tensiones, como en la zona próxima a un taladro asociado a una unión mecánica. Por ello un modelo que pretenda analizar la evolución del daño debe ser capaz de predecir la localización del daño.

El estudio de la distribución de tensiones alrededor de un agujero es ampliamente conocido en el caso de laminados intactos. Nuismer y Whitney [2] emplearon un modelo analítico para expresar el factor de concentración de tensiones asociado a placas con un agujero sometidas a carga uniaxial. También propusieron un criterio fenomenológico para predecir el fallo del laminado.

En este trabajo se ha evaluado la capacidad del modelo de Barbero y Cortes para localizar el daño, tanto en situaciones asociadas a defectos iniciales como a la concentración asociada a un agujero. En ambos casos se ha considerado un estado de tensión uniaxial aplicado sobre el laminado.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo utilizado es aplicable a problemas con cargas de membrana, y predice el modo de fallo de rotura de la matriz. Las ecuaciones de equilibrio se han formulado en un elemento representativo de volumen definido entre dos fisuras consecutivas en una de las láminas que se encuentra entre el plano medio y la parte superior del laminado. El modelo estima la matriz de rigidez equivalente de cada lámina para cada nivel de densidad de fisuras. Se evalúa una función de activación similar al criterio de fallo de Hahn [3], iterando la densidad de fisura en esa lámina mediante un algoritmo de retorno. Este proceso se repite iterando en cada una de las láminas del laminado. El modelo se ha implementado como una subrutina UGENS en ABAQUS. Este modelo ha sido previamente validado experimentalmente en un laminado vidrio/epoxi con diferentes secuencias de apilamiento [1] sin localización. Se han obtenido variaciones de la rigidez en función de la densidad de fisuras.

3. RESULTADOS

3.1. Descripción del problema

En este trabajo se ha analizado la localización del daño en una placa cuadrada de 25 mm de lado de un laminado de fibra de vidrio en matriz epoxi con una secuencia de apilamiento [0/90_g/0/90_g/0]. Las propiedades mecánicas de este laminado se han obtenido del trabajo de Varna et al. [4]. El problema se ha simulado en Abaqus, modelizando únicamente un cuarto de la placa por razones de simetría. Se ha empleado un mallado con elementos cuadráticos rectangulares (S8R) y triangulares (STR165). Se ha impuesto un desplazamiento a la placa en dirección horizontal, simulando un estado uniaxial de carga. Para el análisis de la placa con taladro, se ha considerado un agujero centrado en la placa con un diámetro de 2.5 mm.

Se ha demostrado que el modelo empleado es independiente del tamaño de malla. Para ello se ha analizado la respuesta global de la placa, determinando la relación entre la carga aplicada y el desplazamiento producido para tres tamaños de malla, con 297, 1424 y 3508 elementos. Las diferencias entre las tres mallas son despreciables, Figura 1. Se observa un comportamiento lineal elástico hasta un desplazamiento impuesto de alrededor de 0.06 mm en el que el daño en las láminas a 90° comienza a afectar a la rigidez del laminado. El daño en la lámina aparece en las láminas a 90° para un desplazamiento impuesto de 0.02 mm, aunque al ser muy localizado no influye significativamente en la rigidez global.

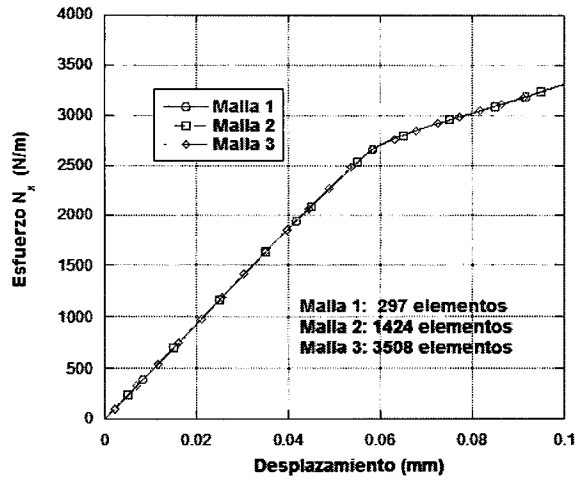


Fig. 1. Curva fuerza aplicada frente a desplazamiento para diferentes mallas para el modelo con agujero

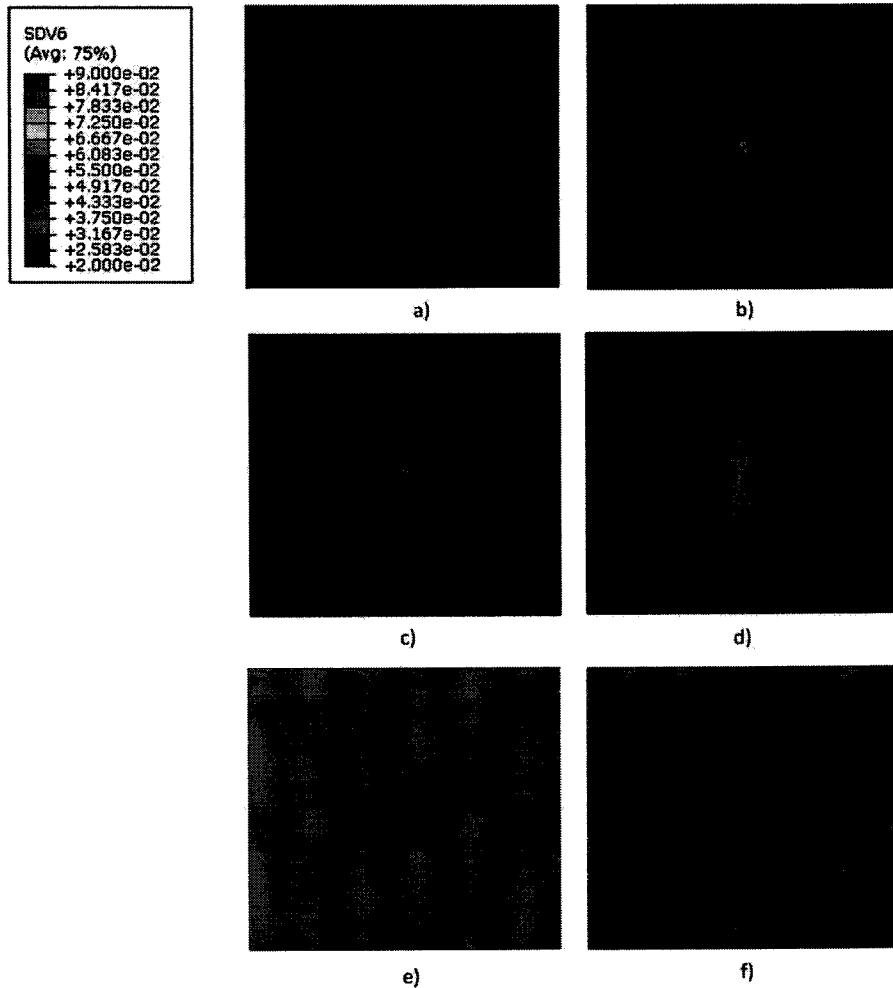


Fig. 2. Densidad de fisuras en la lámina a 90°, Desplazamiento impuesto de a) 0 mm (instante inicial), b) 0.05899 mm, c) 0.05925 mm, d) 0.05974 mm, e) 0.06037 mm, f) 0.06551 mm

3.2 Placa con daño inicial

Para modelizar un laminado con daño inicial se ha introducido un nivel de densidad de fisuras de $9 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ en las láminas a 90° en el elemento situado en el centro de la placa, mientras que el daño inicial en toda la placa es $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$. Dado que el problema es simétrico el daño se ha introducido en todas las láminas con esta orientación.

En la Figura 2 se muestra la evolución del daño desde el punto en el que se introduce un defecto para distintos niveles de carga aplicados y una densidad de fisuras inicial de $2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$. El daño comienza a propagarse en la dirección de las fibras de las láminas con orientación a 90° , Figura 2b. Cuando el nivel de daño alcanza un cierto nivel en toda las láminas a 90° , una zona con orientación horizontal próxima al defecto inicial mantiene un menor nivel de daño, dado que la zona más dañada y con menor rigidez hace disminuir las tensiones en la zona adyacente, Figura 2c. Este proceso se repite cuando el nivel de daño va creciendo (Figuras 2d y 2e) hasta que toda la lámina alcanza un nivel de daño igual al daño del defecto (Figura 2f). A partir de ese instante no se produce localización del daño y la densidad de fisuras en toda la lámina crece de manera homogénea. Resultados similares se han encontrado para diferentes niveles de daño inicial, demostrándose que el modelo localiza el daño.

3.3. Placa con taladro

En el estudio de la placa con agujero, el primer resultado obtenido ha sido la distribución del factor de concentración de tensiones en los puntos a lo largo del eje de simetría de la placa en dirección perpendicular a la de aplicación de la carga.

Se ha comparado la distribución del factor de concentración de tensiones para un laminado intacto calculada numéricamente con la obtenida con la solución aproximada empleada por Nuismer y Withney [2]. En la Figura 3 se puede observar que las distribuciones del factor de concentración obtenidas con ambos métodos son prácticamente idénticas, siendo ligeramente menor el factor de concentración de tensiones en el borde del agujero en el modelo numérico (3.06 frente a 3.09).

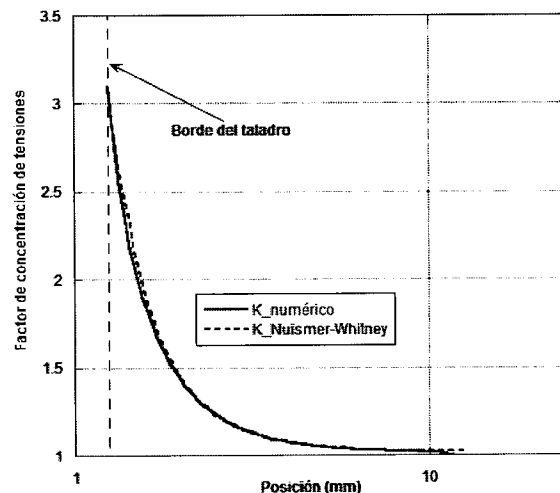


Fig. 3. Distribución del factor de concentración de tensiones para el laminado intacto.

En la Figura 4 se representa la variación del factor de concentraciones máximo en función del desplazamiento impuesto a la placa. Entre el punto 1 y 2 no se produce daño en el laminado. Cuando el laminado comienza a dañarse, a partir del punto 2, el factor de concentración de tensiones en el borde del agujero disminuye rápidamente hasta alcanzar un mínimo (punto 3) para un desplazamiento impuesto de 0.0475 mm. El factor de concentración tensiones vuelve a aumentar (punto 4) hasta un valor similar al inicial (punto 5) para un desplazamiento de 0.125 mm.

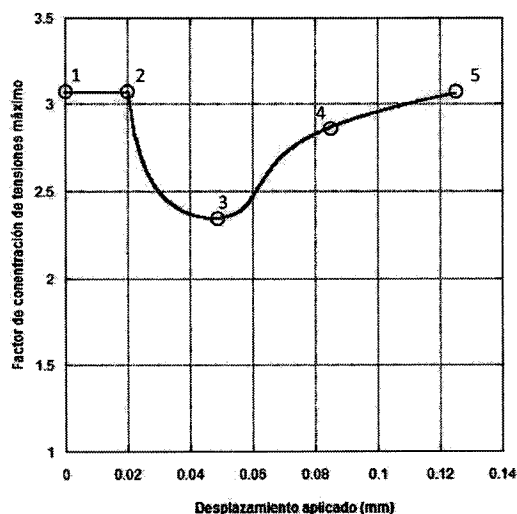


Fig. 4. Variación del factor de concentraciones máximo en función del desplazamiento impuesto a la placa

En la Figura 5 se representa la variación de la densidad de fisuras en la lámina a 90° para los desplazamientos impuestos representativos de la Figura 4. El daño se inicia en las láminas a 90° , Figuras 5b. Cuando aparece un daño muy localizado, el factor de concentración de tensiones cae rápidamente, llegándose a un valor mínimo, Figura 5c. Cuando la extensión dañada crece, Figura 5d, el factor de concentración aumenta. Cuando la densidad de fisuras en estas láminas es del orden del inverso de su espesor, Figura 5e, su capacidad resistente es casi nula, y el laminado se comporta de manera similar a un laminado formado por láminas únicamente a 0° . Dado que estas láminas están intactas el factor de concentración de tensiones toma un valor similar al inicial.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la capacidad del modelo de Barbero y Cortes para localizar el daño en laminados sometidos a carga de membrana cuando existe un defecto inicial y cuando existe concentración de tensiones asociada a la presencia de un agujero. Se ha observado en este último caso, como el factor de concentración de tensiones máximo disminuye cuando se inicia el daño, hasta alcanzar un valor mínimo, aumentando posteriormente cuando la lámina en la que se inició el daño está completamente dañada.

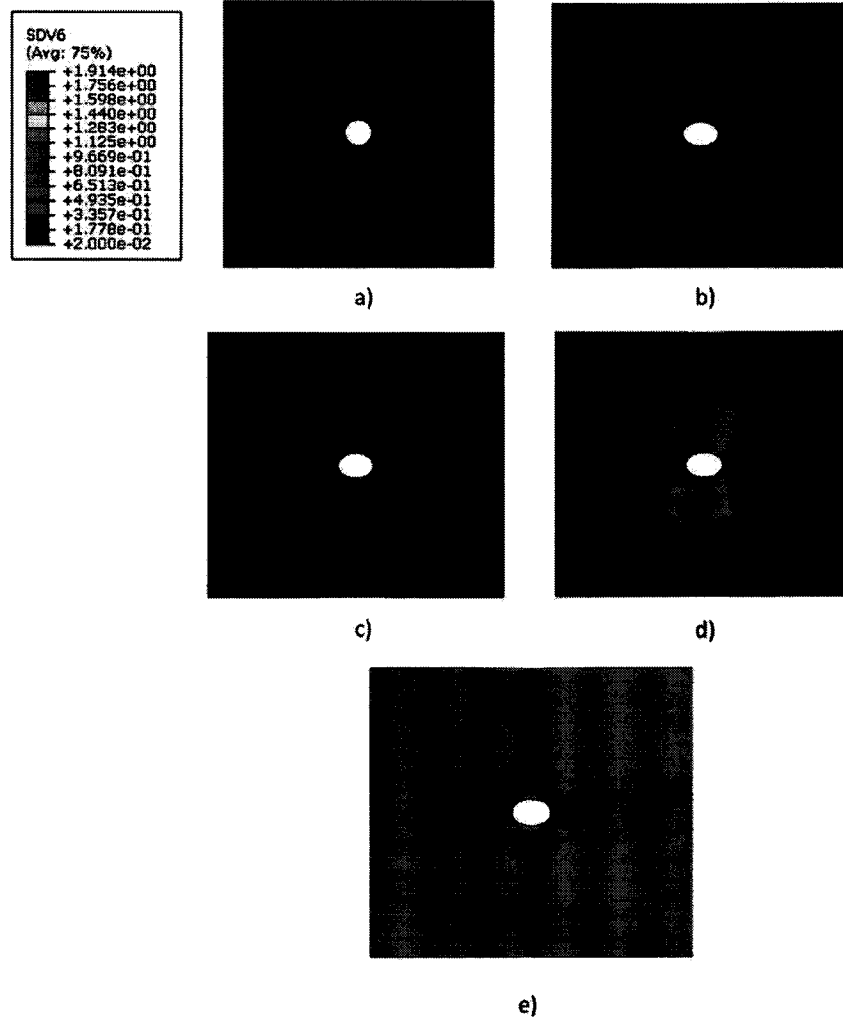


Fig. 5. Variación de la densidad de fisuras en la lámina a 90° . a) punto 1 b) punto 2, c) punto 3, d) punto 4, e) punto 5

REFERENCIAS

1. BARBERO E.J. Y CORTES D.H. (2010). A mechanistic model for transverse damage initiation, evolution, and stiffness reduction in laminated composites *Composites Part B.*, 41, pp. 124-132
2. NUISMER R.J. Y WHITNEY J.M. (1975). Uniaxial Failure of Composite Laminates Containing Stress Concentrations, *en Fracture Mechanics of Composites* (Ed. G P Sendeckyj) pp 117-142. American Society for Testing and Materials.
3. HAHN H.T. (1983). A mixed-mode fracture criterion for composite materials. *J Compos. Technol Res.*, 5, pp. 26-29
4. VARNA J., JOFFE R., AKSHANTALA, N.V. Y TALREJA R. (1999). Damage in composite laminates with off-axis plies. *Compos. Sci. Technol.*, 59, pp. 2139-2147