

A. Solis<sup>a</sup>, S. Sánchez-Sáez<sup>b</sup>, E. Barbero<sup>b</sup><sup>a</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, 11519, Puerto Real, España<sup>b</sup> Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 28911, España

## Efecto de la interacción entre agujeros en la iniciación del daño en laminados

### RESUMEN

#### Historia del artículo:

Recibido 31 de Mayo 2019

En la versión revisada 15 de Junio 2019

Aceptado 5 de Julio 2019

Accesible online 15 de Enero 2020

#### Palabras clave:

Micropandeo  
Modelo daño continuo  
Teoría de mezclas serie/paralelo  
Compresión

En una placa de tipo laminado en la que existe un agujero, cuando se realiza un segundo agujero en las cercanías del primero, se modifican el estado tensional y la evolución del daño. Cuando estas placas se encuentran sometidas a cargas de compresión, los principales mecanismos de fallo son el micropandeo de las fibras y la rotura de la matriz. En este trabajo se estudia la influencia de la presencia de un segundo agujero en los citados mecanismos, considerando dos distancias entre los centros de los agujeros. Se ha empleado la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo para estimar el comportamiento elástico del material y un modelo de daño continuo para modelar el fallo por micropandeo de las fibras y la rotura de matriz. La formulación desarrollada se ha implementado en un código FEM de desarrollo propio. Este modelo se ha validado con datos de la literatura correspondientes a un laminado con dos agujeros situados transversalmente a la dirección de la carga. Se ha puesto de manifiesto que la propagación del daño de fibras es muy diferente a la propagación del daño en la matriz. El daño en el laminado se concentra en la zona entre agujeros. Adicionalmente, cuando la separación entre agujeros se reduce se modifica la distribución del daño alrededor de los agujeros, incrementándose el mismo.

## Effect of hole interaction in the initiation of damage in laminates

### ABSTRACT

#### Keywords:

Microbuckling  
Continuum damage model  
Serial/parallel mixing theory  
Compression

In open-hole laminates, when a second hole is made, the stresses and the damage evolution are modified. The main failure mechanisms in laminates subjected to compressive loads are fibre microbuckling and matrix breakage. In this work, the influence of the presence of a second hole in these mechanisms is analysed for two distances between holes. The Serial/Parallel Mixing Theory was used to model the elastic behaviour of the material and a Continuum Damage Model to represent the fibre microbuckling and matrix failure. The equations were implemented in a FEM code developed by the authors. The proposed model has been validated with results from the literature for a laminate with two holes positioned transversally to the applied load. In this problem, it was shown that the growth of the fibre damage is different from that of the matrix. The laminate is damaged mainly in the zone between the holes. When the distance between holes is reduced, both types of damage around the holes increase.

## 1 Introducción

La presencia de un agujero en un laminado produce un efecto de concentración de tensiones en las cercanías del borde del agujero (tanto en el plano como en la dirección del espesor) que contribuye a la aparición de diferentes modos de fallo. Ambos fenómenos producen la rotura del laminado a una carga inferior a la correspondiente al caso de que no exista agujero. Cuando se aplican cargas de compresión a una placa con agujero los principales mecanismos de fallo que aparecen en el laminado son el micropandeo de las fibras, la rotura de la matriz y la delaminación. El primero de los mecanismos es el que controla la iniciación del daño [1].

La presencia de un segundo agujero cerca del primero modifica el campo tensional y la evolución del daño. En la literatura se ha analizado la influencia en el factor de concentraciones de tensiones en el plano o la carga de rotura de la interacción de dos agujeros, considerando variables como la distancia entre agujeros o la posición de los mismos, la secuencia de apilamiento, etc [2-6]. Existe menos información sobre cómo la interacción entre agujeros afecta a la iniciación y la progresión del daño.

En este trabajo se analiza, para laminados sometidos a cargas de compresión en los que existen dos agujeros en disposición transversal, el efecto de la interacción entre agujeros en el inicio y la propagación del daño. Se ha empleado la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo como ley constitutiva del material compuesto y un modelo de daño continuo para modelar el fallo por micropandeo de las fibras y la rotura de matriz. Esta aproximación tiene la ventaja de predecir la respuesta de un laminado estimando la extensión y distribución del daño, a partir de las propiedades de sus constituyentes sin necesidad de recurrir a una formulación compleja a nivel micromecánico. El modelo se valida en términos de deformación en la zona próxima a los agujeros, empleando datos de la literatura y analizando la influencia de la posición relativa entre agujeros en ambos mecanismos de daño.

## 2 Descripción del modelo

El modelo empleado combina la Teoría de Mezclas Serie/Paralelo (TMS/P) [7] como ley constitutiva del material compuesto, con un modelo de la Mecánica del Daño Continuo (MDC) basado en las propuestas de Kachanov [8] para describir la degradación de fibra y matriz. En la modelización de la fibra y de la matriz se utilizan como leyes constitutivas, las propuestas por Oller [9] que utilizan un modelo de daño escalar isótropo para cada uno de los constituyentes.

La formulación desarrollada permite definir, para cada constituyente, un umbral de daño a compresión diferente del umbral a tracción, utilizando la función de peso propuesta por Olivier et al [10] y el criterio de Simo-Ju [11] como función de fluencia.

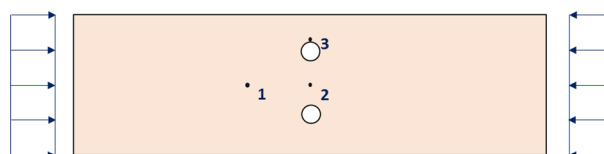
Tanto las ecuaciones que definen el modelo de daño referido como las que definen la ley constitutiva del material compuesto según la TMS/P, se resuelven para cada punto de cuadratura en un soporte de elementos finitos de desarrollo propio que garantiza la convergencia mediante dos bucles de cálculo iterativo, uno exterior que permite igualar las fuerzas internas a

las externas y otro interior que permite resolver las ecuaciones no lineales de la TMS/P. Dicho soporte de elementos finitos que combina todos los elementos que se han indicado, así como el método iterativo utilizado, se describe de forma detallada en [12].

El modelo ha sido validado en un trabajo previo con datos de la literatura con laminados con un único agujero sometidos a cargas de compresión [13].

Como complemento a la validación previa, en este trabajo se analiza la precisión del modelo analizando una placa sometida a una carga de compresión con dos agujeros situados en posición transversal, figura 1. Se ha empleado un laminado  $[\pm 45/0_2]_{3s}$  fabricado a partir de un material carbono/epoxi Toray T800/Ciba-Geigy 924C. El diámetro de los agujeros es de 5 mm y la distancia entre centros es igual a 1.5 veces dicho diámetro. La geometría de la placa es de 245x50x3 mm.

Se evalúa la deformación en la dirección de aplicación de la carga, en tres puntos de la placa, en función del nivel de carga aplicado en los extremos de la probeta, comparando la predicción del modelo (líneas de asteriscos en la figura 2) con datos de la literatura [2] representados en línea discontinua en la figura 2. Los tres puntos inspeccionados se definen en la figura 1. Uno de los puntos está situado lejos de los dos agujeros (punto 1) y representa la respuesta tensión-deformación global. El segundo está localizado en el punto medio entre los dos agujeros (punto 2). Finalmente, se selecciona un punto a 1 mm del borde del agujero derecho (punto 3).



**Figura 1.** Posición de los puntos empleados para la estimación de la deformación.

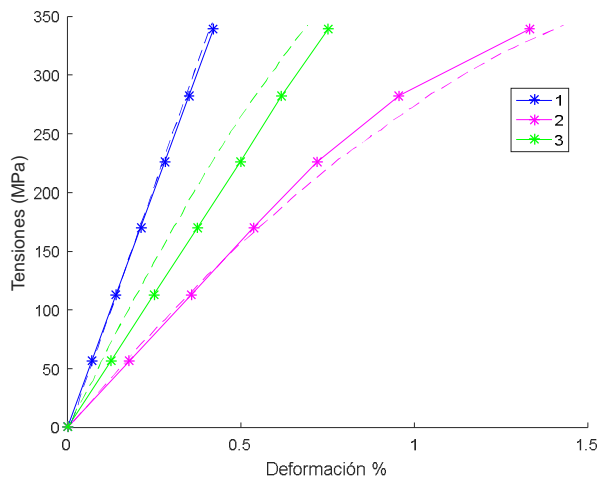
En la figura 2, se observa que el modelo predice el efecto de concentración de tensiones en las cercanías de los agujeros al observarse diferencias significativas en las deformaciones. Las deformaciones en los puntos 2 y 3 son significativamente mayores que en el punto 1, que puede considerarse igual al nivel de deformación aplicado. En el punto 2 se observa una mayor deformación que en el punto 3, además aparece un comportamiento claramente no lineal. De acuerdo a la evidencia experimental mostrada por Soutis et al [2], este comportamiento está asociado a la presencia del daño en la zona entre agujeros.

La aproximación del modelo numérico a la respuesta global de la placa con varios agujeros es excelente. La posición de los tres puntos se ha estimado a partir de los datos de la referencia [2], sin embargo no se dispone de datos precisos de la posición de la galga extensométrica en el borde del agujero (punto 3). Este hecho debe tenerse en cuenta, ya que una pequeña desviación en la posición del punto 3, implica una fuerte variación en las componentes de tensiones y deformaciones. También es necesario considerar que la galga tiene unas



dimensiones físicas concretas, por lo que su medida se puede considerar un valor medio de deformación.

A la vista de estos resultados se puede asumir que el modelo es suficientemente preciso para predecir la respuesta del laminado.



**Figura 2.** Comparación con los resultados de Soutis et al. [2]. Tensión aplicada frente a la medida de deformación longitudinal.

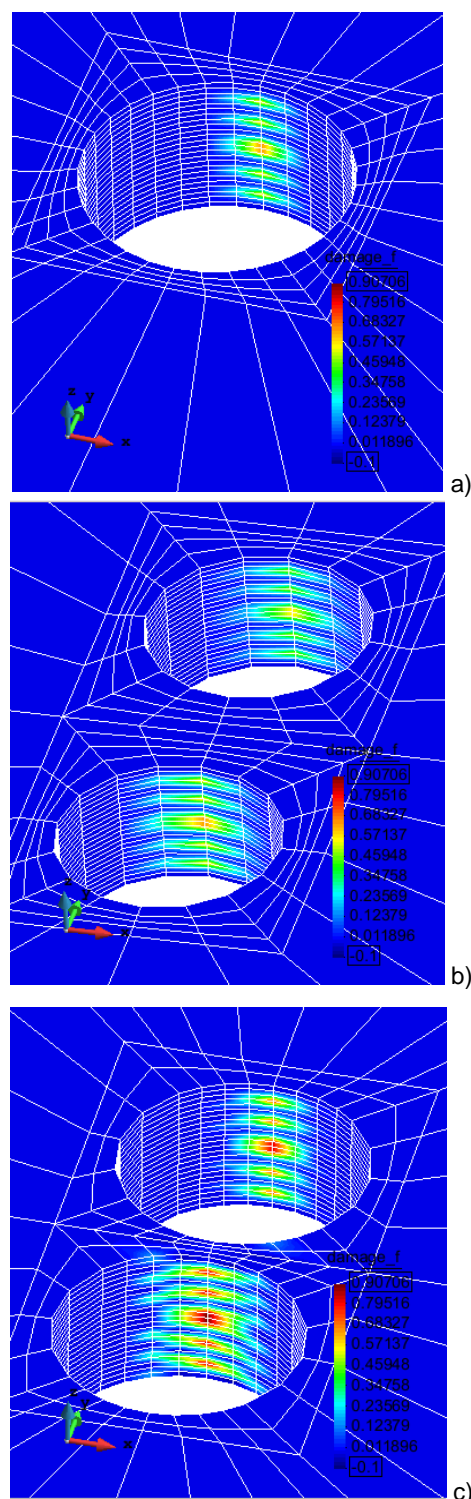
### 3 Resultados

Una vez verificado el modelo, se ha estudiado la distribución del daño en la fibra y en la matriz en las proximidades de los bordes libres del agujero. Para ello se han analizado tres configuraciones: una placa con un agujero centrado empleada como referencia y otras dos con dos agujeros del mismo diámetro, uno centrado y otro situado transversalmente a la dirección de carga. En las configuraciones con dos agujeros, se han considerado dos distancias diferentes entre los centros de los agujeros: una distancia 1.1 veces el diámetro de los agujeros y otra de 1.5 veces.

El material y la secuencia de apilamiento son los mismos que los empleados en la verificación del modelo. Se ha seleccionado una placa cuadrada de 100x100 mm para asegurar que no aparece efecto de borde libre en la zona cercana a los agujeros. En todos los casos, se ha aplicado un nivel de deformación a los extremos de la placa de 0.42% que se corresponde con un nivel de deformación equivalente en el caso estudiado en [2].

En las tres configuraciones estudiadas, únicamente se observa daño por micropandeo en las fibras en aquellas láminas orientadas en la dirección de la carga, siendo mayor en las láminas más cercanas al plano de simetría. Es, en el agrupamiento de láminas orientadas a  $0^\circ$  situado en dicho plano, donde aparece primero este modo de fallo para un nivel de deformación del 0.8% aproximadamente. El daño en la matriz aparece primero en las láminas a  $\pm 45^\circ$  de forma más o menos simultánea a lo largo del espesor y se extiende al resto de las láminas con otras orientaciones. En la placa con un agujero, el daño se distribuye de forma simétrica alrededor del

mismo, figuras 3a y 4a. Tanto el inicio como la progresión del daño es semejante al observado experimentalmente en la literatura.

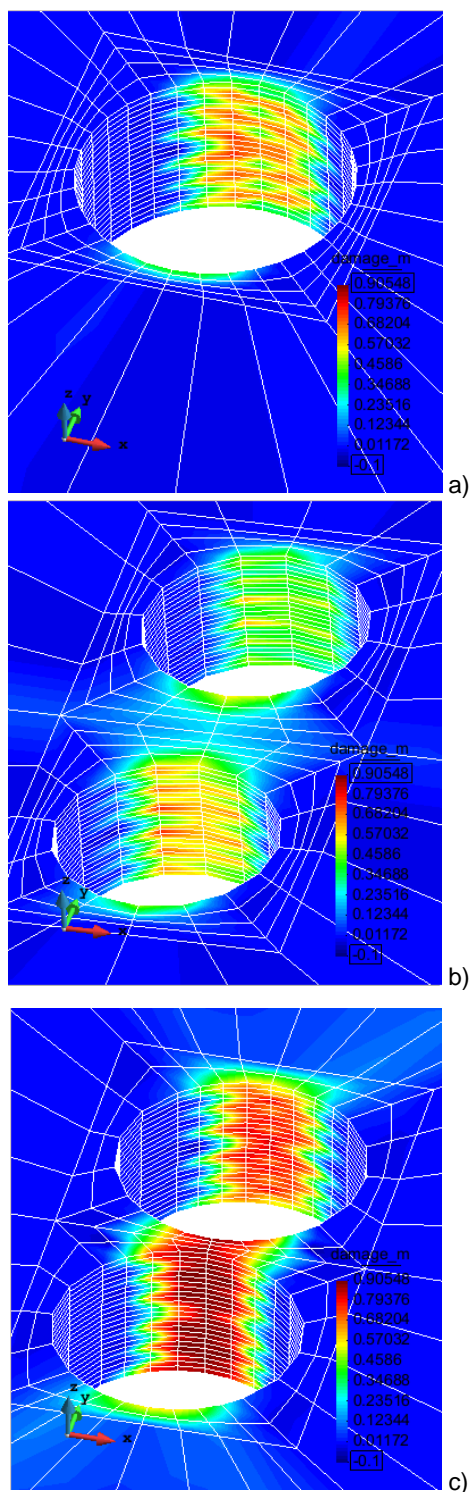


**Figura 3.** Daño en las fibras en el borde del agujero: a) un único agujero centrado, b) un agujero centrado con otro de igual diámetro a una distancia entre centros  $1.5\varnothing$  c) distancia entre centros  $1.1\varnothing$ .

La carga de compresión se aplica en la dirección del eje 'x' (eje rojo en las figuras 3 y 4). La distancia entre agujeros tiene un



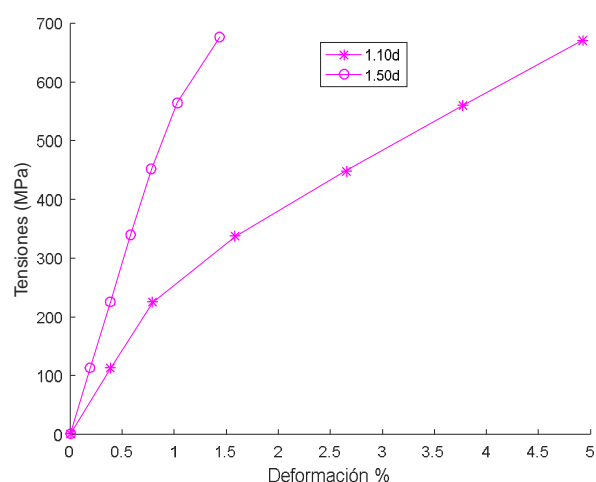
efecto significativo en la distribución del daño de fibra y matriz. Para una distancia entre agujeros de 1.5 veces el diámetro, la distribución del daño en el agujero central crece en la zona más cercana al otro agujero respecto al problema de agujero único, y disminuye en la zona más alejada, figuras 3b y 4b. La reducción es más significativa en la matriz.



**Figura 4.** Daño en la matriz en el borde del agujero: a) un único agujero centrado, b) un agujero centrado con otro de igual diámetro a una distancia entre centros  $1.5\varnothing$  c) distancia entre centros  $1.1\varnothing$ .

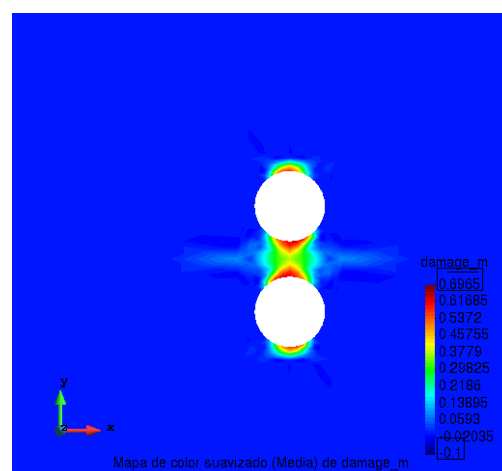
Al aproximar los agujeros, hasta una distancia de 1.1 veces el diámetro, el nivel de daño para el mismo nivel de deformación crece significativamente en todas las láminas, figuras 3c y 4c, especialmente el daño en la matriz. En este caso, el daño en la matriz se extiende en el plano del laminado en toda la zona entre ambos agujeros.

Asimismo, el nivel de deformación (figura 5) al que aparecen los efectos de la no linealidad en la curva tensión deformación en la zona circundante al punto 2 (figura 1) se ve modificado al cambiar la distancia entre centros. En el caso del laminado con dos agujeros separados 1.1 veces el diámetro, la deformación es de aproximadamente un 0.8%, mientras que el valor que se tiene en el caso correspondiente a una distancia de separación entre agujeros de 1.5 veces el diámetro es ligeramente superior (1%).



**Figura 5.** Comparación de los resultados de los valores de tensión y deformación en los puntos centrales para los casos  $1.5\varnothing$  y  $1.1\varnothing$ .

Por otro lado, en todos los casos analizados el daño de la fibra y la matriz se concentra en la zona entre agujeros mientras que en el resto del laminado prácticamente no aparece daño. Este aspecto puede observarse en la figura 6, donde se representan los valores numéricos del daño de la matriz obtenidos.



**Figura 6.** Distribución del daño en la matriz.



Los mapas de daño de la matriz determinados con el modelo numérico que se muestran en la figura 6, se corresponden con las zonas donde experimentalmente se aprecian zonas afectadas por la delaminación, según las imágenes correspondientes al laminado rectangular ensayado a compresión y analizado en [2].

## 4 Conclusiones

Se ha analizado el daño en placas de tipo laminado con dos agujeros en posición transversal, analizando la influencia de la distancia entre agujeros en el inicio y la propagación del daño con respecto a una placa con un solo agujero. Se han considerado dos mecanismos de fallo, el micropandeo de las fibras y el fallo en la matriz mediante un modelo de daño continuo y se ha utilizado la TMS/P como ley constitutiva del material compuesto.

El modelo predice que el fallo en el laminado se inicia por micropandeo de las fibras en las láminas orientadas en la dirección de la carga, seguido por el fallo de la matriz en las láminas a  $\pm 45^\circ$ . El daño de la fibra se produce únicamente en las agrupaciones de las láminas a  $0^\circ$ , mientras que el daño de la matriz empieza a producirse en las láminas a  $\pm 45^\circ$  y se termina extendiendo a lo largo de todo el espesor del laminado. Este comportamiento se ha observado tanto en el caso de un agujero como en el caso de los laminados de dos agujeros analizados.

La cercanía de los dos agujeros, a la vista de los resultados, influye claramente en el desarrollo del daño y en los niveles de deformación en los que empiezan a aparecer efectos no lineales, produciendo un adelanto de la aparición de dichos efectos cuanto más cercanos se encuentren dichos agujeros.

Por último, en los casos estudiados correspondientes a una placa con dos agujeros con una disposición transversal con respecto a la carga de compresión aplicada, se observa que el daño se concentra en la zona comprendida entre los dos agujeros, prediciendo la presencia en esos lugares de zonas donde la rotura de la matriz y el micropandeo de las fibras se encuentran confinados.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida para el desarrollo de este trabajo del Ministerio de Economía y Finanzas de España en el marco del proyecto DPI2017-86324-R.

## Referencias

- [1] EJ Barbero. *Journal of Composite Materials*; **5**(32), pág. 483-502 (1998).
- [2] C Soutis, NA Fleck, PA Smith. *Journal of Composite Materials*; **22**, pág. 31-38 (1991).
- [3] X Xu, L Sun, X Fan. *International Journal of Solids and Structures*. **32**(20), pág. 3001-3014 (1995).
- [4] J Rhee, RE Rowlands. *Computers & Structures*. **61**(5), pág. 935-950 (1996)
- [5] F Ghezzi, G Giannini, F Cesari, G Caligiana. *Composites Science and Technology*. **68**(3-4), pág. 1057-1072 (2008)

- [6] J Ubaid, M Kashfuddoja, M Ramji. *International Journal of Damage Mechanics*. **23**(5), pág. 609-635 (2013).
- [7] S Khedkar, V Chinthapenta, M Madhavan, M Ramji. *Journal of Composite Materials*, **49**(26), pág. 3263-3283 (2015).
- [8] F Rastellini, S Oller, O Salomon, E Oñate. *Computers and structures*, **86**(9), pág. 879-896 (2008).
- [9] L Kachanov. *Introduction to continuum damage mechanics*. Martinus Nijhoff, Dordrecht, Países Bajos (1986).
- [10] S Oller. *Fractura mecánica. Un enfoque global*. Barcelona, Publicaciones CIMNE, pág. 200-208 (2001).
- [11] J Oliver; M Cervera; S Oller, J Lubliner. *Second International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, Austria (1990).
- [12] JC Simo, JW Ju. *International Journal of Solids and Structures*, **23**(23), pág. 821-840 (1987).
- [13] A Solis. *Tesis doctoral*. Universidad Carlos III de Madrid, (2018).
- [14] A Solis, S Sanchez-Saez, X Martinez, E Barbero-Pozuelo. *Composite Structures*, **217**(1), pág. 89-99 (2019).

