

TRATAMIENTO DE LA FATIGA EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL CON MATERIALES COMPUESTOS.

S. Pagès, J. Costa, J.A. Mayugo, N. Blanco

Grupo de Análisis y Materiales Avanzados para el Diseño Estructural (AMADE)
Escola Politècnica Superior. Universitat de Girona.
Av-Luis Santaló s/n. 17071 Girona. España.

RESUMEN

En este trabajo se pretende dar una visión de la problemática del cálculo de la fatiga en el diseño estructural de componentes de material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras. A pesar de que las metodologías tradicionales para abordar esta problemática son similares, si no las mismas, que las utilizadas para los metales, la degradación de los compuestos por la acción continuada de cargas cíclicas conlleva una serie de particularidades que requieren un distinto tratamiento.

En primer lugar trataremos la fenomenología del daño en los compuestos, describiremos los distintos mecanismos microscópicos que conducen a la degradación del material y, a continuación, se comenta la estrategia seleccionada para predecir la esperanza de vida de un elemento estructural sometido a cargas de fatiga.

Palabras clave

Materiales compuestos, fatiga, degradación propiedades mecánicas, esperanza de vida.

1. INTRODUCCION

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras largas utilizados en forma de laminados (apilamientos de láminas cada una de las cuales contiene fibras de refuerzo en una o distintas direcciones) presentan una relación rigidez / peso que los hacen más adecuados que los materiales tradicionales (metales) para aplicaciones en sectores como el aeronáutico, aeroespacial, o de transporte en general. Además son materiales con reputación de tener un buen comportamiento a fatiga.

Sin embargo, del mismo modo que los materiales tradicionales, los compuestos sufren una degradación de sus propiedades mecánicas que puede conducir al fallo del elemento estructural cuando son sometidos a cargas cíclicas. El comportamiento a fatiga de los compuestos presenta diferencias substanciales respecto al de los metales que se pondrán de relieve en el presente trabajo. En particular, el daño en los compuestos es un daño distribuido, de naturaleza diversa (distintos mecanismos a nivel microscópico), altamente anisótropo y que, además, conlleva una pérdida importante tanto de rigidez como de resistencia residual durante la vida del componente.

Pretendemos, pues, mencionar los procesos micromecánicos que conducen a la degradación de un material compuesto de matriz polimérica e introducir las estrategias existentes para la predicción de la esperanza de vida de los compuestos [1], [2] y [3].

2. LA FATIGA EN LOS MATERIALES COMPUESTOS

La degradación de un material compuesto puede ser debida a la aplicación de una carga estática a un elemento estructural o bien puede producirse progresivamente al someter el material a esfuerzos cíclicos, lo que llamaremos daño por fatiga.

A nivel microestructural, el daño en un compuesto sólo puede obedecer a alguno de los siguientes mecanismos: rotura de fibras, formación de grietas en la matriz, rotura de la interfase entre la fibra y la matriz (“*debonding*”), pandeo de la fibra bajo esfuerzos de compresión y el despegue entre láminas adyacentes o delaminación (ver figura 1).

Como consecuencia de la presencia de estos modos de deterioro microestructural, a nivel macroscópico existe una degradación de las propiedades elásticas y la resistencia residual. En un laminado cada una de las láminas van deteriorándose con el tiempo según sea la orientación y contenido de su refuerzo (comportamiento anisótropo).

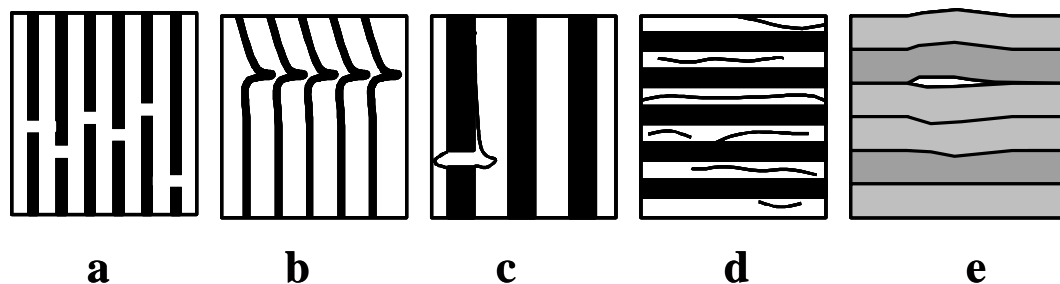


Figura 1. Mecanismos de daño en compuestos. a) rotura de fibras, b) pandeo de fibra por esfuerzos de compresión, c) *debonding* d) agrietamiento en la matriz, e) delaminación.

El deterioro microestructural que padecen los compuestos es muy distinto al de los metales. Si bien en los segundos existe un punto dañado, la nucleación de una grieta, a partir del cual ésta progresa hasta dar lugar a la fractura del material por propagación rápida; en los materiales compuestos el deterioro microestructural se distribuye en todo el material como resultado de los mecanismos de daño descritos anteriormente. La interacción de los mecanismos de daño y su repercusión en las propiedades resultantes del compuesto ya se intuye harto compleja. Por otra parte, en los compuestos se observa una pérdida de rigidez y resistencia residual desde los primeros ciclos que en los metales es casi inapreciable.

Las estrategias más comunes para la predicción de la esperanza de vida de un componente de material compuesto sometido a cargas de fatiga pueden dividirse en tres grandes categorías según a qué nivel estructural se estudian los sucesos de daño. Así distinguiremos los modelos empíricos o macroscópicos de los modelos mecanicistas y, en un paso intermedio, los modelos a nivel de lámina. Cabe comentar que en el presente trabajo se ha desarrollado un modelo empírico.

Los *modelos macroscópicos* conciben el material compuesto como un material homogéneo con unas ciertas propiedades anisótropas equivalentes. Para el uso de estos modelos es necesario disponer de ensayos experimentales de exactamente el mismo material del cual se quieren conocer las propiedades a fatiga. Con esta estrategia podemos abordar gran cantidad de problemas como: estimación de la esperanza de vida a un elevado número de ciclos, estimación de la progresión de la resistencia residual y la rigidez residual, etc. [5] y [6]. El principal inconveniente de estos modelos es la necesidad de una gran experimentación para alcanzar una completa caracterización del comportamiento a fatiga del material.

En los *modelos de degradación a nivel de lámina*, la rotura a fatiga se entiende que proviene del fallo sucesivo de cada una de las láminas con distinta orientación del refuerzo. En este caso, pues, se toma a la lámina (y no todo el laminado) como una unidad de comportamiento homogéneo y se distinguen los modos de fallo intra-lámina de la delaminación. De éste modo, la caracterización experimental obtenida para una lámina, normalmente unidireccional, puede utilizarse para distintas configuraciones de apilamiento.

Finalmente, los *modelos mecanicistas* se basan en la micromecánica. En estos modelos se describen los sucesos elementales de fallo a nivel microscópico (la acumulación, interacción y propagación del daño hasta la rotura del material). Obviamente, estos modelos son computacionalmente costosos y, todavía hoy no bien comprendidos. Sin embargo, son éstos modelos constructivos a partir de los cuales es posible conocer sobre qué aspecto de los constituyentes debe actuarse para mejorar cierta propiedad.

2.1 Modelo Macroscópico

El punto de partida para cualquier modelo empírico de fatiga es conocer sus curvas S-N (o de Whöler) que relacionan la tensión máxima de una carga de amplitud constante (S_{max}) con el número de ciclos necesarios para llegar al umbral de su comportamiento elástico (N_F). También en muchos materiales, las curvas S-N muestran el concepto de resistencia límite de fatiga, punto (S_{e0}, N_{e0}) indicado en la figura 2. Las cargas cíclicas inferiores a S_{e0} no provocan reducciones de la resistencia del material. Sin embargo, para poder obtener las curvas S-N para diferentes índices de reversibilidad (cociente entre el mínimo y el máximo de la tensión cíclica; ver tabla 1) deberíamos realizar un gran número de experimentos que nos permitieran generar una dependencia experimental adecuada. Para podernos ahorrar todos estos experimentos se harán hipótesis sobre su distribución utilizando la ley de Goodman Modificada.

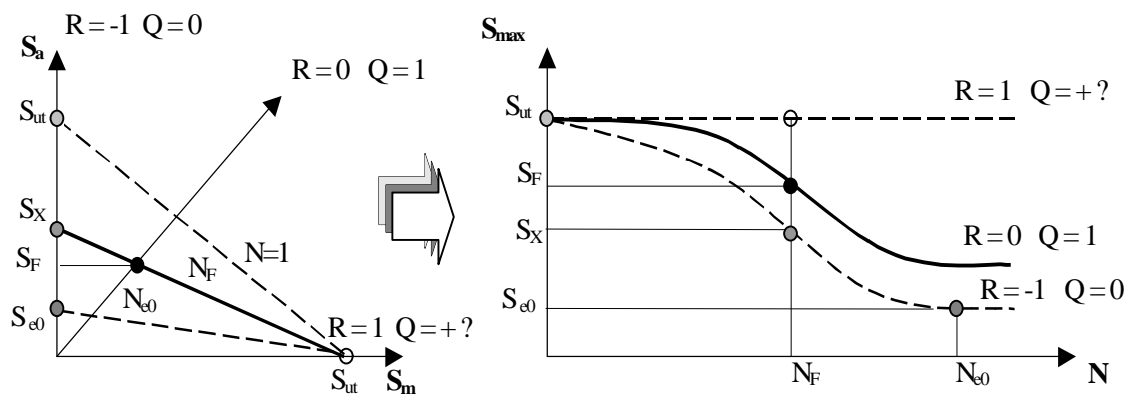


Figura 2. Ley de Goodman y curvas S-N.

A la degradación microestructural se le asocia una variable de daño que se suele identificar con una propiedad del compuesto siendo la resistencia residual y la rigidez residual las más frecuentes. A partir de las curvas S-N es posible obtener la disminución de resistencia que provoca una carga cíclica cualquiera en el material y así conocer la evolución de la resistencia residual (S_R). Normalizando la función de resistencia residual se obtiene la evolución del factor de reducción (f_{red}) del umbral de discontinuidad del material.

Las curvas S-N y la evolución de la variable resistencia residual son dependientes del tipo de tensión cíclica, por lo tanto, es preciso un correcto conocimiento de los parámetros que lo definen. Cada punto de un elemento estructural sometido a cargas cíclicas está sometido también a esfuerzos fluctuantes. Su forma en el tiempo viene dada por una función sinusoidal definida por los parámetros que adjuntamos en la Tabla 1 (ver también figura 4):

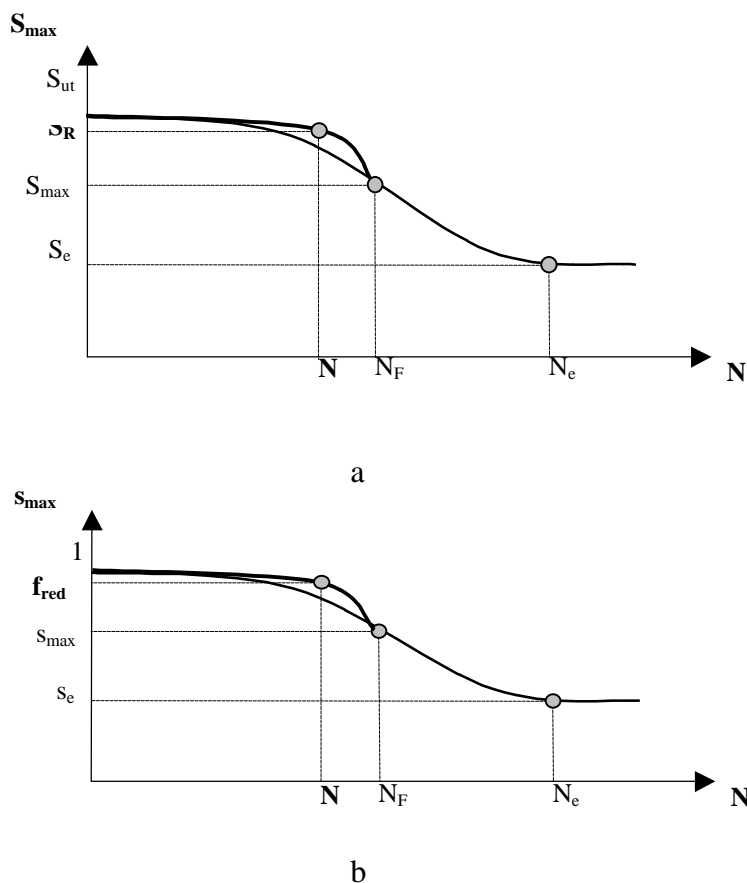


Figura 3. Funciones de la resistencia residual S_R (a) y del factor de reducción f_{red} (b) para cierta tensión S_{max} .

Tabla 1: Parámetros y expresiones para la identificación y modelación de la carga cíclica.

Tensión media S_m	$S_m = \frac{S_{max} + S_{min}}{2}$
Tensión alterna S_a	$S_a = \frac{S_{max} - S_{min}}{2}$
Índice de reversión R	$R = \frac{S_{min}}{S_{max}}$
Índice de reversión o de componente media Q	$Q = \frac{S_m}{S_a} = \frac{S_{max} + S_{min}}{S_{max} - S_{min}}$

El comportamiento de los materiales compuestos a fatiga, como ya hemos introducido anteriormente, difiere mucho respecto al de los metales no tan solo por razón de su anisotropía, sino también por su comportamiento asimétrico dada una dirección en el material. Este aspecto influye mucho a la evolución de las curvas de Wöhler o curvas S-N como también a la ley modificada de Goodman tal como se puede observar en las figuras 5 y 6 dónde se compara el comportamiento a fatiga de un material simétrico respecto a un compuesto para cualquier índice de reversibilidad (R).

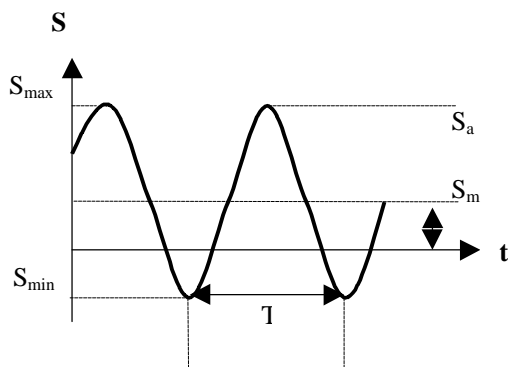


Figura 4. Carga cíclica típica de período T.

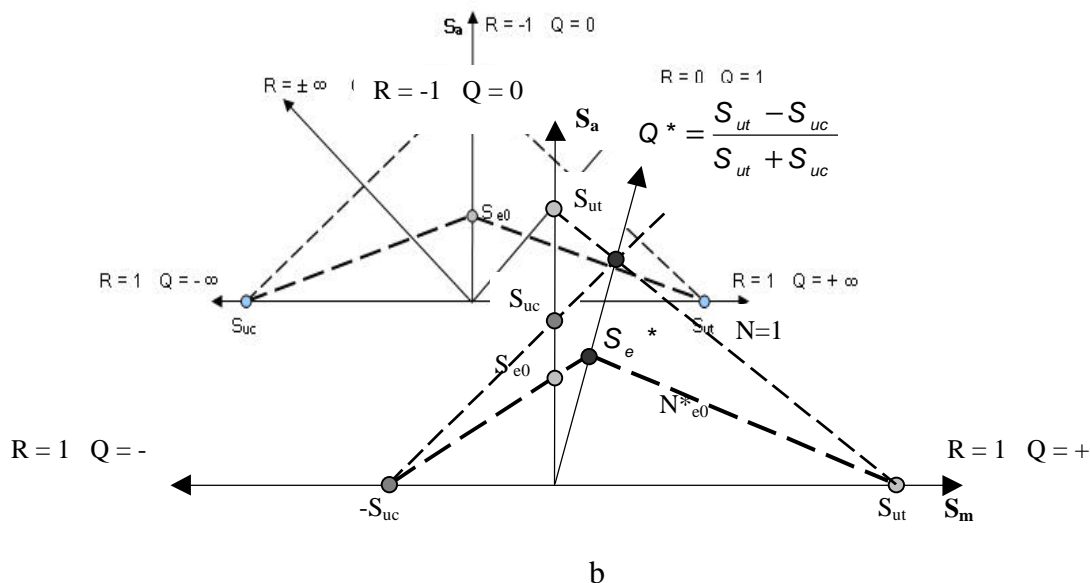
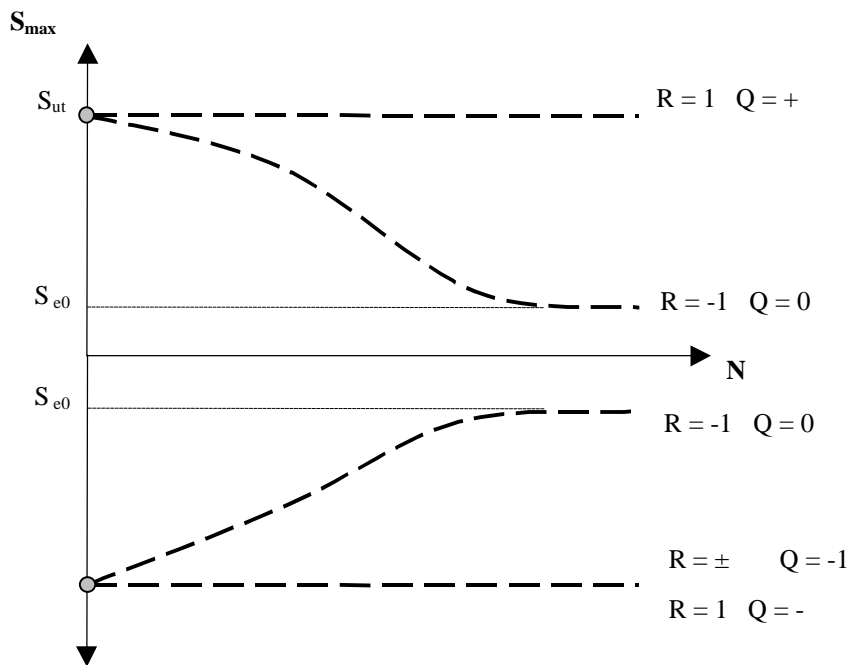


Figura 5. Distribución de las curvas de Goodman para una determinada orientación.

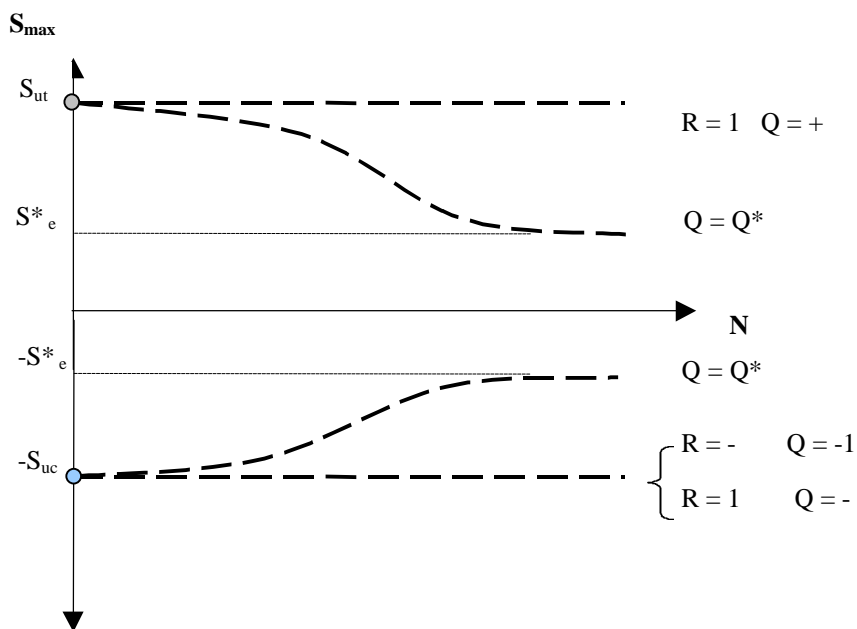
a) material isotrópico, b) material compuesto

El tratamiento de la fatiga en compuestos es, siguiendo esta metodología, relativamente sencillo cuando el estado tensional implica que la tensión más importante coincide mayoritariamente con la dirección de la fibra. Si embargo, la problemática se acentúa al estudiar la degradación de un compuesto de matriz polimérica sometido a un estado complejo de tensiones. En cada una de las direcciones en el plano de la lámina el material compuesto presenta no sólo una resistencia bien distinta sino también una ley de degradación particular. En este caso la estimación de la esperanza de vida requiere postular hipótesis de comportamiento. Suponemos un material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras largas utilizado en forma de laminado. Suponemos también un estado biaxial de cargas para cada una de las láminas. Debemos conocer la magnitud de las tensiones cíclicas en la dirección de los refuerzos de cada lámina así como la perpendicular a ésta. De esta manera podemos dividir la problemática del tratamiento de la anisotropía de un compuesto en dos. Partiendo de las tensiones cíclicas, las curvas S-N y la regla lineal de disminución de la

resistencia residual del material compuesto (que es de hecho, la regla de Palmgren-Miner) para cada una de las dos orientaciones conoceremos la degradación microestructural en la dirección de las fibras y en la perpendicular a ella. En otras palabras, estimaremos el daño acumulado en los refuerzos y en la matriz del material compuesto por separado.



a



b

Figura 6. Distribución de las curvas de Wöhler o curvas S-N para una determinada orientación.

a) material isotrópico, b) material compuesto

3. CONCLUSIONES

Este trabajo representa, por extensión y profundidad, tan sólo un planteamiento y un primer paso en su resolución de la problemática de la fatiga en compuestos. Éstos vienen siendo ampliamente utilizados en aplicaciones donde la fiabilidad es imperativa y, sin embargo, los métodos de cálculo para la estimación de vida son los desarrollados propiamente para metales.

Se ha presentado un formulismo adecuado para el tratamiento de la fatiga a partir de las curvas empíricas de comportamiento y se ha apuntado la metodología para tratar estados biaxiales de tensión en estos materiales anisótropos. Es de prever, sin embargo, que la modelización de la fatiga y el daño van a ir cada vez más ligados a la comprensión de los procesos micromecánicos causantes de la degradación de las propiedades del material.

4. AGRADECIMIENTOS

El trabajo de los autores en el campo de la predicción de vida de laminados ha sido financiado por el DGICYT del Ministerio de Educación y Ciencia español mediante el proyecto MAT 2000-0741-C02-01.

5. REFERENCIAS

1. REIFSNIDER, K.L.; Damage and damage mechanics. In *Fatigue of Composite Materials* (ed. K.L.Reifsnider) 11-778. Amsterdam (Elsevier), 1991.
2. TALREJA, R.; *Fatigue of Composite Materials*, Technomic Publishin Company, Inc.. Lancaster (1987).
3. TALREJA, R.; Fatigue of composite materials: Damage mechanisms and fatigue life diagrams, *Proceedings of the Royal Society, London*, **A378**, 461-475 (1988).
4. COOK, J.; GORDON, J.E.; A mechanism for the control of crack propagation in all-brittle systems, *Proceedings of the Royal Society, London* **A282**, 508-520 (1964).
5. ANDERSONS, J; Methods of fatigue prediction for composite laminates. A review., *Mechanics of Composite Materials* **6**, 545-554 (1994)
6. SENDECKYJ, G.P.; Life prediction for resin-matrix composite materials, en *Composite Materials Series, Vol. 4: Fatigue of composite materials*, ed. K.L.Reifsnider, 431-483 (1991)