

# **Predicción de la vida a fatiga en un material compuesto vidrio-epoxi unidireccional sometido a cargas cíclicas desviadas respecto a la dirección de la fibra**

## ***Fatigue life prediction in a unidirectional glass-epoxy composite material subjected to off-axis cyclic loads***

**D. REVUELTA**

**Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (C.S.I.C.), Madrid**

Persona de contacto/Corresponding author: drevuelta@ietcc.csic.es

**ESPAÑA**

Fecha de recepción: 3-XII-03  
Fecha de aceptación: 16-II-04

### **RESUMEN**

*La mayoría de los actuales métodos de cálculo y diseño a fatiga de estructuras de materiales compuestos se han desarrollado principalmente a partir de la experiencia previa en materiales metálicos homogéneos. Sin embargo, estos métodos presentan serios inconvenientes debido a que la heterogeneidad y microestructura orientada característica de los materiales compuestos laminados provocan modos de fallo diferentes a los de los metales. Basándose en los modos fundamentales de rotura por fatiga y en criterios de rotura local, se desarrolla un modelo teórico de vida a fatiga para materiales compuestos de matriz epoxi reforzados con fibra de vidrio bajo condiciones generales de carga.*

**PALABRAS CLAVE:** composite, refuerzo de fibras, vidrio, polímero, fatiga.

### **1. INTRODUCCIÓN**

La predicción de la vida a fatiga de un material compuesto es complicada debido a los muchos factores que intervienen a diferentes escalas. Estos factores incluyen la identificación de los diferentes modos de rotura, la evaluación de la evolución del daño y la degradación en las propiedades iniciales asociada a este daño, el establecimiento de un criterio de rotura local al nivel de la lámina individual, la determinación exacta del estado tensión-deformación en la lámina, y la investigación de diferentes efectos producidos por las cargas cíclicas en el daño y la rotura final del material compuesto.

Existen numerosos trabajos en la literatura referentes a la fatiga de materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzo de fibra de vidrio. Por ejemplo, Hashin y Rotem (1) han publicado una gran cantidad de datos provenientes de ensayos de fatiga sobre el comportamiento de sistemas de vidrio-epoxi. Hasta la fecha, la interpretación de los resultados de fatiga se ha hecho a través de méto-

### **SUMMARY**

*Most of today's fatigue analysis and design methods for composite laminates were developed primarily on the basis of experience with homogeneous metals. Such methods are subject to serious drawbacks, however, because the failure modes typical of the heterogeneity and directional microstructure of composite laminates differ substantially from the modes of failure observed in metals. A theoretical model for predicting the fatigue life of continuous glass-fibre/epoxy composite materials under general loading conditions has been developed on the basis of fundamental fatigue failure modes and local failure criteria.*

**KEYWORDS:** composite, fibre reinforcement, glass, polymer, fatigue.

### **1. INTRODUCTION**

*Fatigue life prediction for a composite material is a complex task, for the numerous factors and many different levels of action that need to be taken into account, namely: identification of the different failure modes, assessment of damage progression and the associated deterioration of the initial properties, establishment of a criterion for ply failure in multiaxial laminates, accurate determination of stress-strain in laminates, and study of cyclic loading effects on the damage to and ultimate failure of composites.*

*Numerous studies on cyclic fatigue of glass-fibre reinforced polymer composites can be found in the literature. Hashin and Rotem (1), for instance, reported a substantial amount of fatigue test data on the cyclic behaviour of glass-epoxy composites. To date, empirical and semi-empirical methods have been used to interpret fatigue test data. The attempts made to rationalise the*

dos empíricos y semi-empíricos. Modelos analíticos, como el propuesto por Hashin (2) para materiales compuestos unidireccionales sometidos a fatiga, constituyen intentos de racionalizar el complejo fenómeno de la rotura por ciclos de fatiga en materiales compuestos, pero han demostrado un éxito limitado. El autor del presente trabajo realizó previamente varias aproximaciones en las que se adoptaba una expresión probabilística basada en la distribución de Weibull (3), que se había aplicado con éxito a los materiales metálicos. Sin embargo, estos métodos presentan serios inconvenientes debido a que la heterogeneidad y micro estructura orientada, características de los materiales compuestos, provocan modos de fallo diferentes a los de los metales, con la dificultad añadida de que en estructuras de materiales compuestos estos modos pueden aparecer simultáneamente durante su vida útil. Debido a la tremenda importancia que tiene la fatiga en el comportamiento y la seguridad a largo plazo en estructuras de materiales compuestos, se siguen produciendo abundantes estudios sobre el tema. Sin embargo, el desarrollo de un método de predicción adecuada que se base en la observación física de los modos de fallo por fatiga y que vaya acompañada de una formulación rigurosa constituye una tarea todavía pendiente.

## 2. MODELO TEÓRICO

El punto de partida lo constituye el hecho innegable de que en un material compuesto reforzado con fibras existen planos inherentemente débiles (es decir, críticos) que son los más susceptibles al daño por fatiga. La existencia de estos planos es debida a la resistencia anisótropa y a la micro-estructura heterogénea del material, lo que da lugar a diferentes modos de fallo. Considerese un laminado de fibra continua unidireccional que está sometido a un estado de carga cíclica multiaxial,  $\Delta\sigma_1^{\sim}$  y  $\Delta\sigma_2^{\sim}$ , como se ilustra en la Figura. Los modos de fallo más comúnmente observados constituyen el punto de partida del estudio de la rotura por fatiga en la matriz o en la fibra, así como la base de la determinación de los planos críticos que permite llevar a cabo el análisis general del fenómeno de fatiga y la predicción de la vida de un material compuesto con refuerzo de fibras unidireccionales. Estos modos de fallo están ampliamente descritos en la literatura (4-6); el primer signo de degradación por fatiga y el más habitual es el de la formación de grietas en la matriz. Aunque la rigidez y ductilidad del material pueden acelerar o retardar el inicio de esas grietas, llegando incluso en algunos casos de carga casi-estática a evitar su aparición, se ha comprobado que la aplicación de una carga cíclica da lugar a la formación de grietas en prácticamente todos los sistemas de materiales compuestos; no sólo en sistemas de matriz polimérica, sino también en los de matriz cerámica o metálica. En la mayoría de los casos estas grietas se forman dentro de las láminas, y se propagan en el

*complex phenomena involved in cyclic fatigue failure in composite materials, such as in the analytical models proposed by Hashin (2) for fatigue in unidirectional composites, have been only partially successful. In previous research, the author of the present paper developed several approaches that adopted a probabilistic approach based on the Weibull distribution (3) that had been successfully applied to metals. These methods proved to have several shortcomings, however, because the modes of failure arising as a result of the heterogeneity and directional microstructure that characterise composite materials differ significantly from the failure modes observed in metals; moreover, the failed to make provision for the added complexities resulting from the fact that in composites, several modes of failure may occur simultaneously during their service life. Given the tremendous importance of fatigue in the performance and long-term reliability of such materials, this question continues to be the subject of much research. Nonetheless, a suitable fatigue life prediction method based on both physically observed failure modes and the formulation of a rigorous fatigue mechanism has yet to be developed.*

## 2. THEORETICAL MODEL

*The first consideration is the indisputable fact that fibre-reinforced composite materials contain inherently weak (i.e., critical) planes that are highly vulnerable to fatigue damage. These planes are the result of the strength anisotropy that characterises the material and its heterogeneous microstructure, which give rise to a number of different modes of failure. Figure 1 shows a continuous unidirectional fibre laminate subjected to multiaxial cyclic loading,  $\Delta\sigma_1^{\sim}$  and  $\Delta\sigma_2^{\sim}$ . The most commonly observed failure modes in such a composite are the starting points for the study of matrix- or fibre-dominated fatigue failure and the determination of the critical planes underlying general fatigue analysis and prediction of the fatigue life of a composite material with unidirectional reinforcement. Such failure modes are abundantly described in the literature (4-6); the first and most common sign of fatigue deterioration is matrix cracking. Although the stiffness or ductility of the material may expedite or delay the initiation of cracking, and even prevent it from appearing in some quasi-static load cases, application of a cyclic load has been found to cause cracking formation in virtually all composite materials; not only in polymers, but in ceramic- and metal-matrix composite materials as well. Most of the cracks develop within each individual layer and propagate across the*

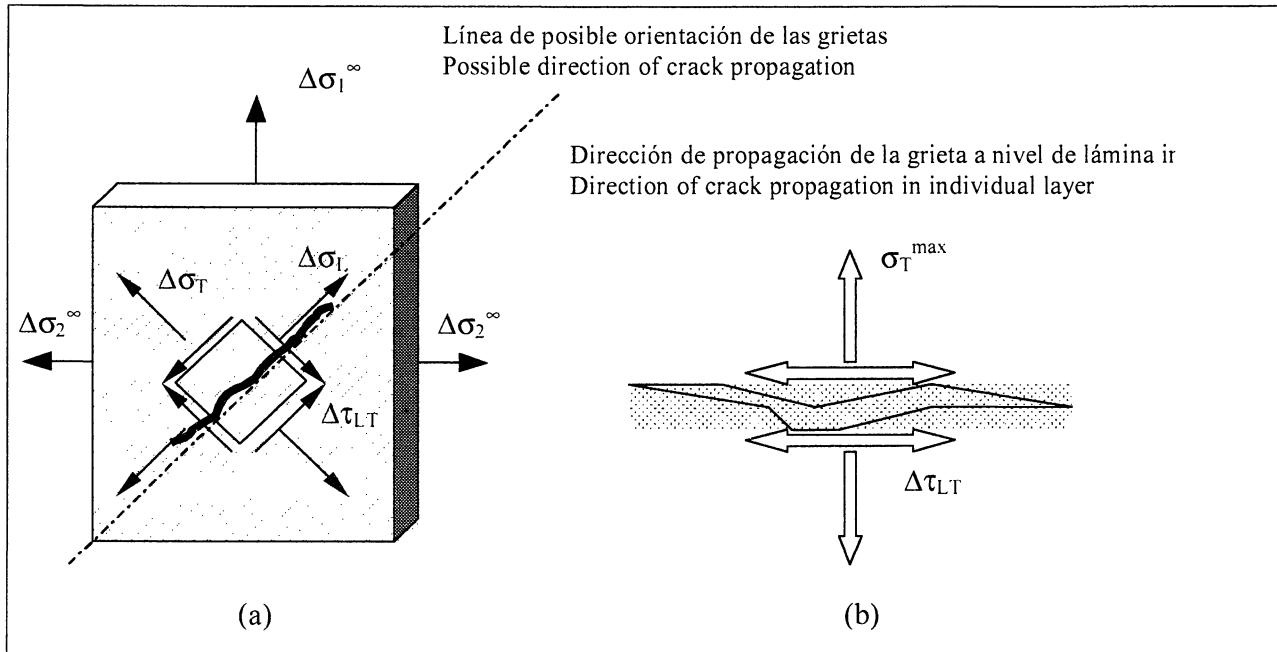


Figura 1.- a) Grietas en un laminado, b) Componentes de tensión cíclica que gobiernan el crecimiento de la grieta.  
Figure 1.- a) Cracks in a laminate. b) Governing fatigue stress components on a fatigue crack.

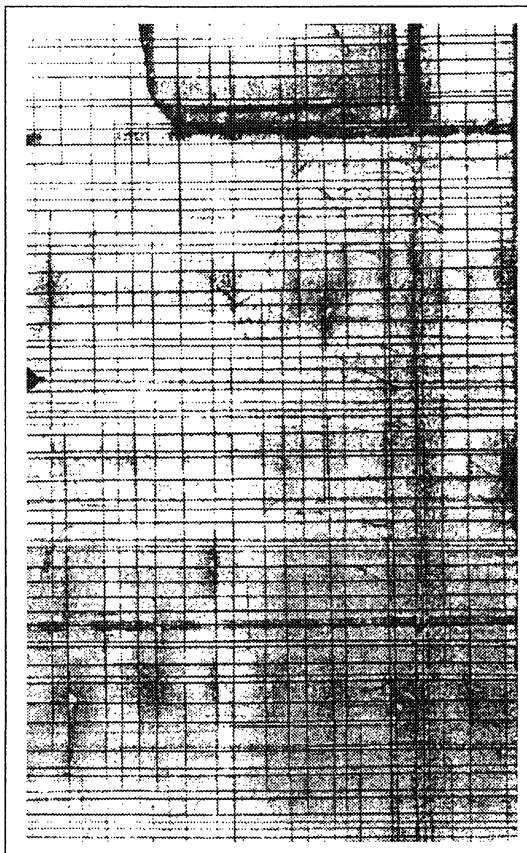


Figura 2.- Radiografía de rayos X que muestra el daño en un laminado  $[0/90]$  de vidrio-epoxi tras 400.000 ciclos de carga (Allen (7)).

*Figure 2.- X-ray radiography that shows damage on a glass-epoxy  $[0/90]$  laminate after 400.000 load cycles (Allen (7)).*

plano de la lámina en dirección paralela a las fibras y lo más perpendicular posible al eje principal de aplicación de la carga, tal como se muestra en la Figura 2.

*plane of the layer in a direction parallel to the fibres and as perpendicular as possible to the main load axis, as illustrated in Figure 2.*

El modelo propuesto en este estudio asume que las tensiones cíclicas de cortadura,  $\Delta\tau_{L,T}$ , son la causa principal del crecimiento de las grietas de fatiga en un material compuesto al nivel de la lámina individual. La tensión de cortadura es paralela a la dirección de propagación de la grieta, Figura 1b. El componente de tensión normal respecto al plano de la grieta (perpendicular a la fibra) también contribuye al crecimiento de la grieta, pero lo hace a través de la máxima tensión transversal aplicada en cada ciclo individual,  $\sigma'_T^{\max}$ . Se asume que el componente de tensión longitudinal (en la dirección de la fibra),  $\sigma'_L$ , afecta mínimamente al crecimiento total de la grieta. Según Findley (8), a partir de estudios llevados a cabo sobre metales, es necesario introducir un parámetro de interacción multiaxial,  $k$  que combine las contribuciones de cortadura cíclica y tensión transversal. De manera semejante, el proceso de fatiga multiaxial en un material compuesto con refuerzo de fibra se puede expresar como:

$$\Delta\tau_{L,T} + k\sigma'_T^{\max} = f(N_R) = \sigma' N_R^m$$

en donde  $N_R$  es el número total de ciclos hasta la rotura, y  $\sigma'$  y  $m$  son constantes del material, que han de ser determinadas mediante experimentos. La función de tensiones de fatiga crítica,  $f(N_R)$ , es de vital importancia en el estudio y evaluación de la vida de un material compuesto sometido a fatiga cíclica.

El parámetro de interacción de las tensiones multiaxiales en un material compuesto reforzado mediante fibra,  $k$ , se puede determinar mediante la consideración de la resistencia anisótropa del material y mediante experimentos de fatiga. El significado físico del parámetro en el caso de un laminado ha de ser interpretado de manera diferente que en el caso de los materiales metálicos. Cuando una lámina de material compuesto falla según un modo dominado por fallo en la matriz, el crecimiento de la grieta generalmente se confina en el plano más débil, independientemente del nivel de carga multiaxial. Por tanto, de acuerdo con esta observación, las propiedades que gobernan la resistencia del plano más débil en una lámina, es decir, las resistencias transversales y a cortadura, han de ser los factores más influyente en el parámetro de interacción.

Considérese un material compuesto unidireccional sometido a una carga cíclica en el plano, cuyo eje de aplicación forma un cierto ángulo respecto a la dirección de la fibra. La influencia de  $k$  en la función de tensiones críticas de fatiga según las coordenadas del material (Figura 3) se puede expresar como:

$$\Delta\tau_{L,T} + k\sigma'_T^{\max} = ((1-R)\cos\theta + k\sin\theta)\sin\theta\sigma_{\max} [2]$$

*The model proposed in this study assumes that fatigue cracking in a unidirectional fibre composite is governed by cyclic shear stress,  $\Delta\tau_{L,T}$ , affecting individual layers. Shear stress is parallel to the direction of crack propagation (Figure 1b). The stress component that is normal (perpendicular) to the fibre also contributes to cracking, although it does so through the maximum transverse stress applied in each load,  $\sigma'_T^{\max}$ . The longitudinal fibre stress,  $\sigma'_L$ , is assumed to have a minimal effect on matrix cracking. Findley (8), working with metals, found that a multiaxial stress interaction parameter,  $k$ , must be introduced to combine the contributions of the cyclic shear and transverse stresses in the multiaxial fatigue failure process in a fibre composite. Under this approach, the multiaxial fatigue process in a fibre-reinforced composite material can be expressed as follows:*

[1]

*where  $N_R$  is the number of cycles to failure, and  $\sigma'$  and  $m$  are experimentally determined material constants. The critical fatigue stress function,  $f(N_R)$ , is vital to the study and evaluation of cyclic fatigue life.*

*Multiaxial stress interaction parameter  $k$  can be found for fibre-reinforced composites considering the strength anisotropy of the material and the results of fatigue experiments. In unidirectional fibre composites, the physical significance of  $k$  differs from the meaning of this parameter in monolithic metals. When a composite laminate fails in a matrix-dominated mode, fatigue cracking is generally confined to the weakest plane, regardless of the level at which multiaxial loads are applied. In keeping with this observation, the properties of the material that govern the strength of the weakest plane in matrix-dominated failure, such as transverse and in-plane shear strengths, are the ones with the greatest influence on the interaction parameter.*

*Assume a unidirectional composite subjected to planar off-axis cyclic loading. The influence of  $k$  on the critical fatigue stress function (Figure 3) in terms of the coordinates of the composite may be expressed as follows:*

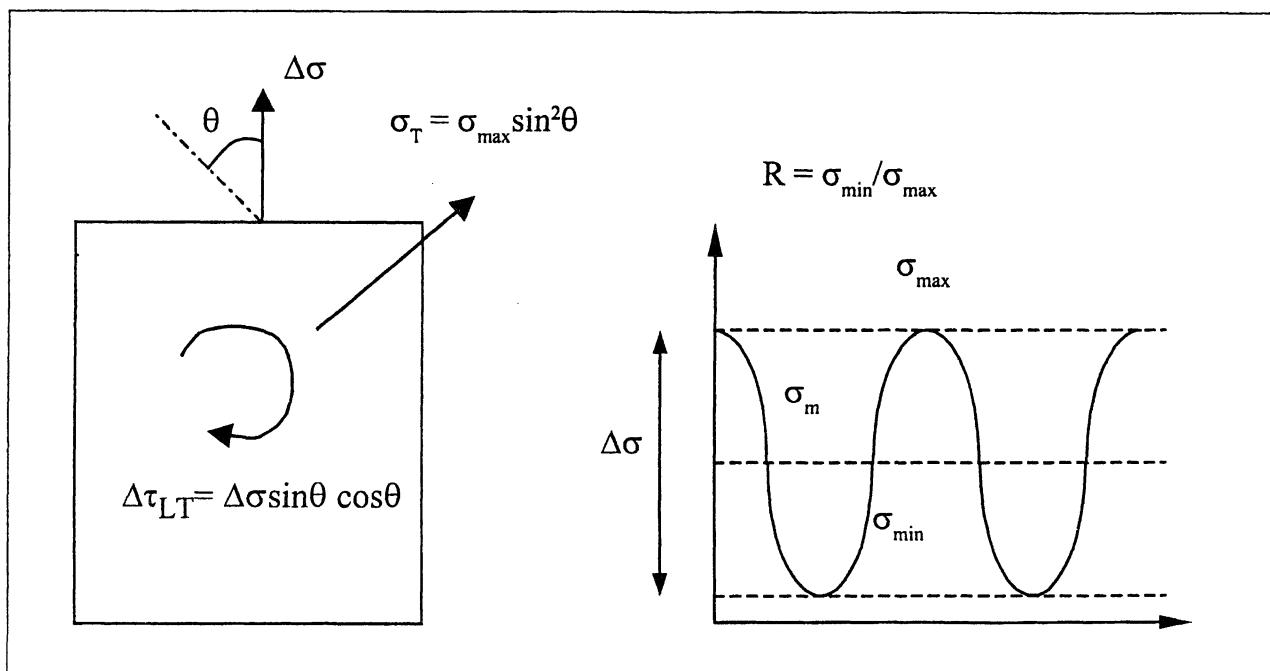


Figura 3.- Parámetros de tensión cíclica en una lámina de material compuesto unidireccional sometida a fatiga.

*Figure 3.- Cyclic stress parameters in fatigue of unidirectional composites.*

donde  $\sigma'_{\max}$  es la máxima tensión nominal aplicada durante un ciclo de fatiga expresada en coordenadas globales, y  $R$  es el ratio de esfuerzos, definido como  $\sigma'_{\min} / \sigma'_{\max}$ . La Figura 3 representa la naturaleza de la función de tensiones de fatiga, el efecto de la orientación de la fibra, y el efecto del parámetro de interacción de las tensiones multiaxiales para un caso de fatiga biaxial con  $R = 0$ .

Hasta ahora el énfasis en el desarrollo del modelo de rotura a fatiga se ha centrado en el análisis de la función de tensiones críticas de fatiga. Por conveniencia, el eje de ordenadas en la Figura 4 se ha normalizado mediante el valor del parámetro de tensión de fatiga cíclica para una orientación de  $\theta = 90^\circ$ , con objeto de comparar distintas láminas de material compuesto unidireccional con diferentes valores de  $k$ .

El comportamiento cuantitativo de la resistencia a fatiga de un material compuesto está gobernado por el coeficiente de resistencia a la fatiga  $\sigma'$  - Ec. (1). A través de la Figura 4 se pueden identificar tres regiones distintas según los diferentes modos de rotura por fatiga cíclica:

- 1) Región con predominio de rotura en la fibra.
- 2) Región con predominio de rotura por cortadura (fallo en la matriz)
- 3) Región con predominio de rotura por tensión transversal (fallo en la matriz)

where  $\sigma'_{\max}$  is the maximum nominal stress during a fatigue cycle, expressed in global co-ordinates, and  $R$  is the stress ratio, defined as  $\sigma'_{\min} / \sigma'_{\max}$ . Figure 3 illustrates the nature of the critical fatigue stress function, the effect of the off-axis angle, and the effect of the multiaxial stress interaction parameter for a biaxial fatigue case where  $R = 0$ .

Up to here fatigue failure theory development has focused on the critical fatigue stress function. For the sake of convenience, in Figure 4 the vertical axis has been normalised by assuming the critical cyclic stress parameter value corresponding to  $\theta = 90^\circ$ , to compare the unidirectional composite systems with different  $k$  values.

Quantitatively speaking, the fatigue strength of a composite is governed by the fatigue strength coefficient  $\sigma'$  (see equation 1). Three regions can be distinguished in Figure 4, each corresponding to a different cyclic fatigue failure mode:

- 1) Fibre-dominated failure regime.
- 2) Matrix-dominated shear stress failure mode.
- 3) Matrix-dominated traverse stress failure mode.

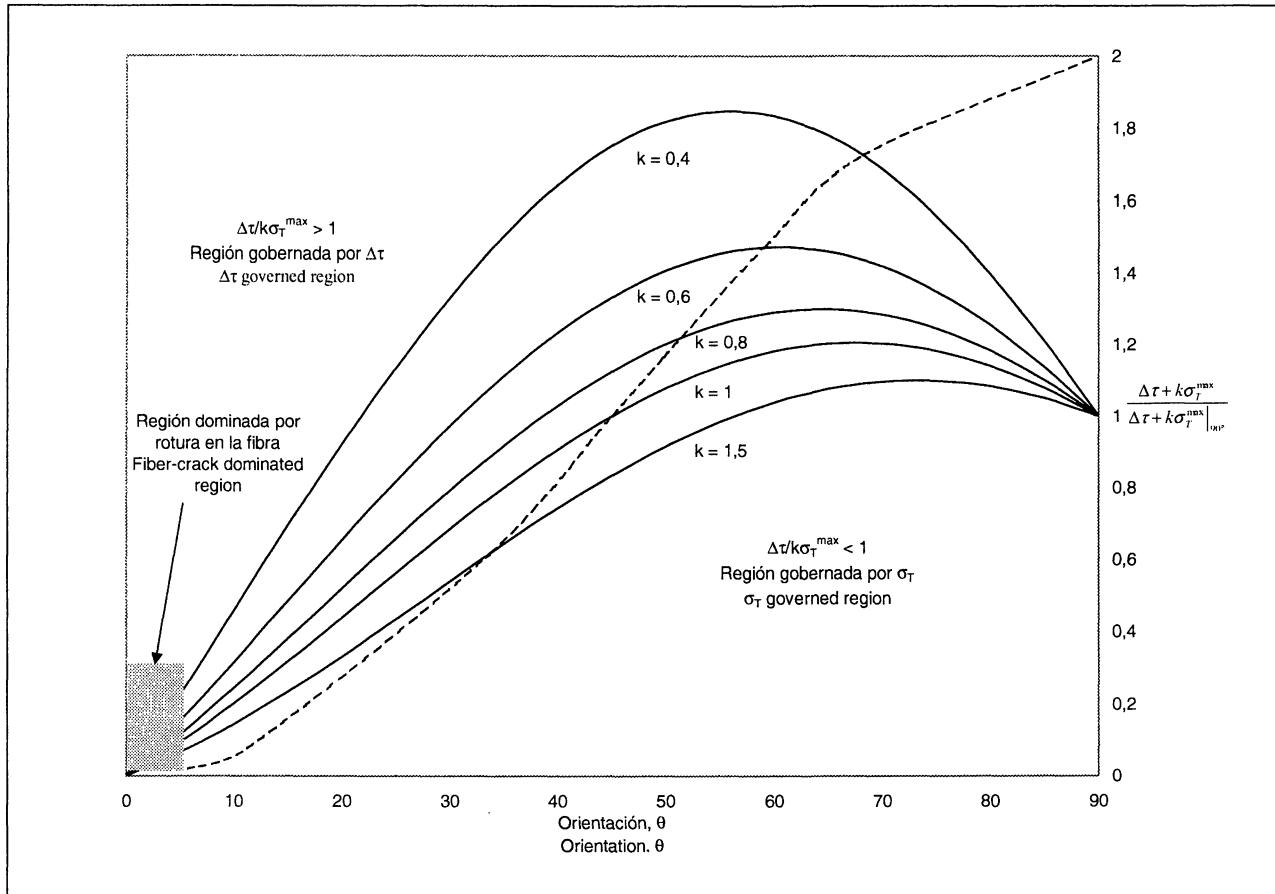


Figura 4.- Variación de la función de tensiones de fatiga para un material compuesto unidireccional con respecto a la orientación de vía fibra,  $R = 0$ .

*Figure 4.- Variation of the fatigue stress function for a unidirectional composite material respect to the fiber orientation,  $R = 0$ .*

El tamaño de la región con predominio de rotura en la fibra depende de la relación entre la deformación de rotura longitudinal y la deformación de rotura transversal del material compuesto. La frontera entre los dos modos de fallo dominados por rotura en la matriz viene determinada por la línea en donde la amplitud de la tensión de cortadura y la tensión transversal máxima contribuyen por igual a la función de tensiones críticas de fatiga. A medida que  $k$  disminuye, la región dominada por fenómenos de cortadura se extiende. Por el contrario, valores altos de  $k$  sugieren que es la tensión transversal la que gobierna el fallo en la matriz para la mayoría de casos.

El valor de  $k$  es también importante a la hora de determinar la orientación crítica de la fibra respecto al eje de carga. De la Figura 4 se desprende que, para valores altos de  $k$ , se obtienen vidas de fatiga similares con orientaciones por encima de  $\theta = 70^\circ$ , ya que la función crítica de fatiga presenta una meseta a partir de ese valor. En cambio, para valores de  $k$  pequeños, la función de tensión crítica adopta una forma acampanada, y presenta un máximo para valores de  $\theta$  en torno a los  $50^\circ$ .

*The extent of the fibre-dominated region depends on the ratio between longitudinal and transverse failure strain in the composite material. The boundary between the two matrix-controlled failure modes is defined as the line where the amplitude of cyclic shear stress and the maximum transverse stress contribute equally to the critical cyclic stress function. The size of the shear-dominated region increases with smaller  $k$  values. On the contrary, for a wide range of off-axis load cases, high  $k$  values suggest that failure is governed by transverse stress.*

*The value of  $k$  also has important implications for critical fibre orientation in off-axis cyclic fatigue. It may be deduced from Figure 4 that high figures for  $k$  yield similar fatigue lives for large off-axis angles, i.e., over  $70^\circ$ , since the critical cyclic stress function tends to flatten from that value upward. For low  $k$  values, on the contrary, the critical cyclic stress function adopts a bell shape, with the most adverse fibre orientation corresponding to an off-axis angle of  $50^\circ$ .*

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La variable de comparación más habitual en los diversos estudios experimentales de los diferentes sistemas de materiales compuestos unidireccionales es la referencia al ángulo que forma la fibra con la dirección de aplicación de la carga. Esta sección aplica la teoría de fatiga desarrollada en el apartado anterior para investigar el fallo causado por cargas cíclicas en materiales unidireccionales de vidrio-epoxi cuyas fibras forman un cierto ángulo con el eje de aplicación de la carga; los parámetros del modelo se obtienen a partir de los datos experimentales disponibles en la literatura.

Los casos que se investigan con este modelo provienen de los datos de fatiga obtenidos por Hashin y Rotem (1) sobre vidrio-epoxi con un ratio de esfuerzos  $R$  de 0,1.

Los resultados de fatiga, tal como fueron presentados por sus autores, se representan en la Figura 5. Se observó que la transición entre la zona con predominio de rotura en la fibra a la de rotura en la matriz se producía para ángulos pequeños entre las direcciones de la fibra y de la carga de manera similar al caso de carga estática.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

*One of the variables most commonly compared in experimental studies of different unidirectional composites is the angle between fibre orientation and the direction of the load applied. This section applies the theory developed in the foregoing discussion to explore failure provoked by off-axis cyclic loads in unidirectional glass-fibre/epoxy composites; the parameters used in the model were drawn from experimental data available in the literature.*

*The cases studied with this approach were reported by Hashin and Rotem (1) for off-axis fatigue of a unidirectional E-glass/epoxy with a stress ratio of  $R = 0.1$ .*

*Figure 5 shows the fatigue tests results as published by the authors, who found that for small angles between fibre orientation and load direction, the transition from the fibre- to the matrix-dominated failure mode was similar to the pattern observed for the static load case.*

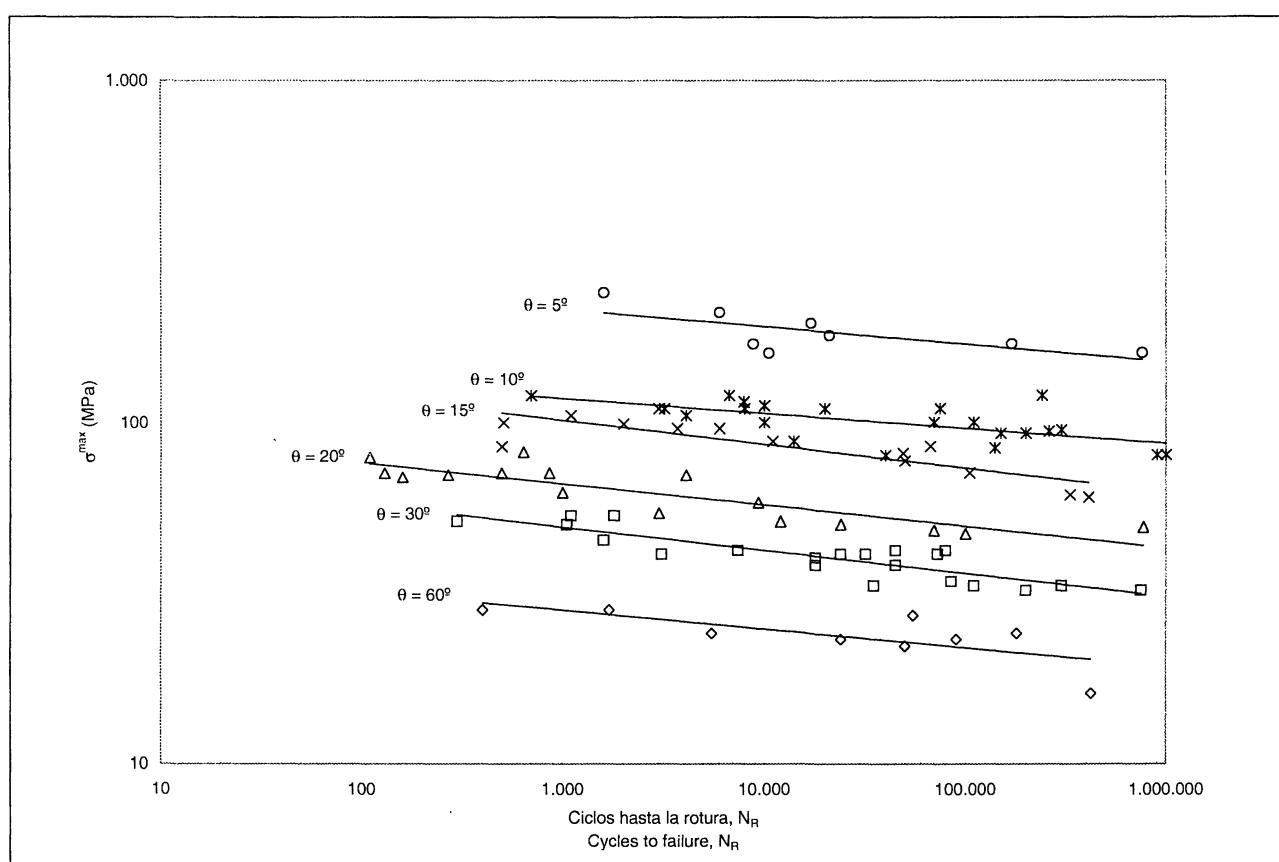


Figura 5.- Tensión máxima aplicada frente a la vida de fatiga en un material compuesto vidrio-epoxi unidireccional con distintas orientaciones,  $R = 0,1$  (Hashin y Rotem).

Figure 5.- Maximum applied stress vs. fatigue life in a glass-epoxy composite material with different fiber orientations,  $R = 0.1$  (Hashin and Rotem).

Estos mismos datos se representan en la Figura 6 según la aproximación gobernada por la función de tensión crítica de fatiga expuesta anteriormente. El ajuste más preciso de estos resultados de fatiga, que presentaban una amplia dispersión en la Figura 5 se consigue con el valor de  $k = 1$ . Este valor también es compatible con la forma de la función de tensión crítica de fatiga al estudiar los datos de Hashin y Rotem conjuntamente con la Figura 4. Para un valor de  $k = 1$ , la ecuación del modelo es:

$$\Delta\tau_{tr} + k\sigma_r^{\max} = 42,767 N_r^{-0.0662} \quad [3]$$

Los resultados experimentales para orientaciones de  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $15^\circ$  y  $10^\circ$  colapsan en la Figura 5 en una única curva maestra que responde perfectamente a la descrita por el modelo expuesto. Sólo los datos pertenecientes a la lámina orientada a  $5^\circ$  respecto a la carga presentan una ligera desviación, que puede ser debida a los fenómenos de transición entre las regiones con dominio de fallo por rotura en la fibra y las de fallo por rotura de la matriz.

The results of processing the same data with the critical stress function approach described above are given in Figure 6. The closest fit for these fatigue data, widely scattered in Figure 5, was achieved with a value of  $k = 1$ . This  $k$  value is likewise consistent with the shape of the critical stress function when the Hashin and Rotem data are viewed in conjunction with Figure 4. For  $k = 1$ , the results may be expressed as:

All the fatigue data from the experiments with off-axis loading angles of  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $15^\circ$  and  $10^\circ$  are seen to cluster around a single, orderly master curve in Figure 5. The slight deviation of the data for an off-axis angle of  $5^\circ$  may be the result of the transition from the matrix- to the fibre-dominated failure mode.

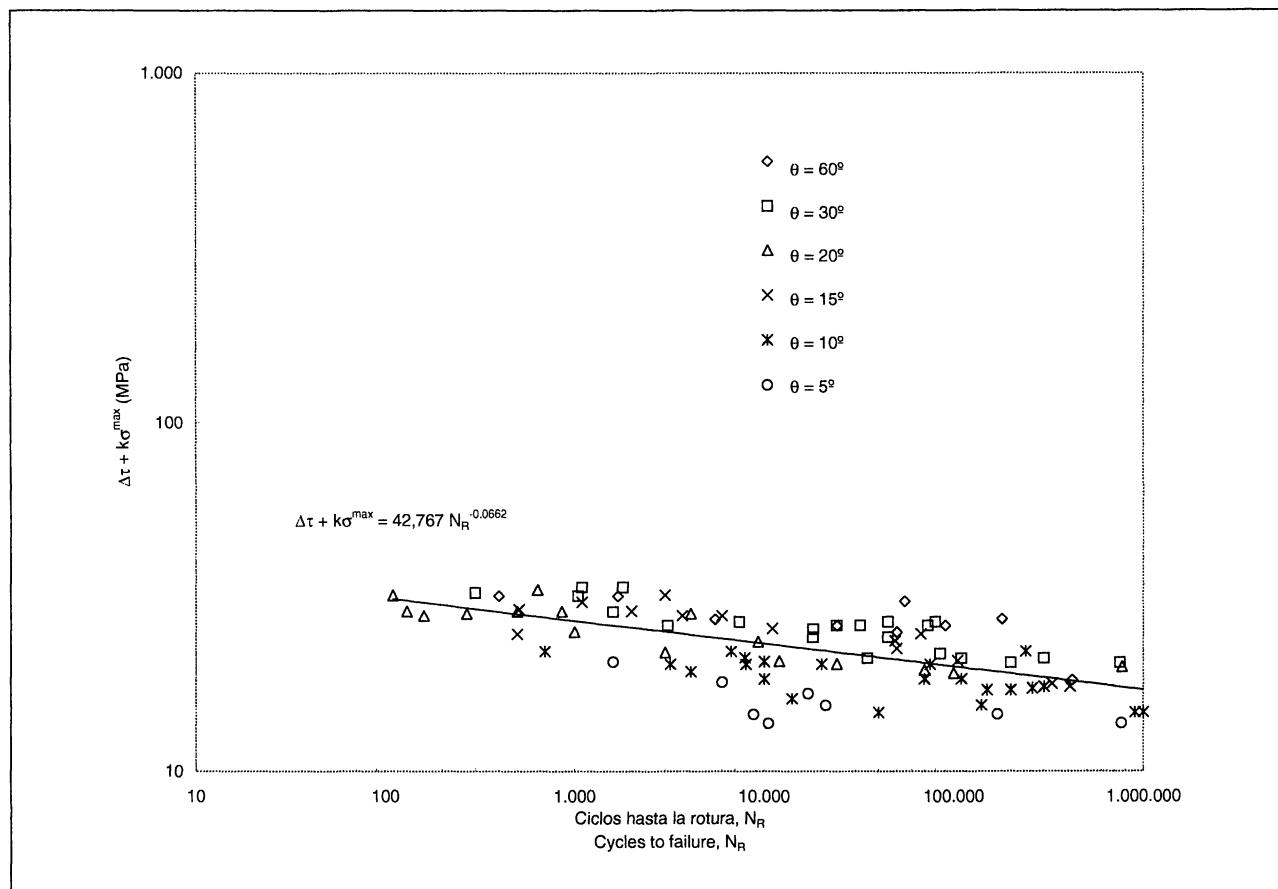


Figura 6.- Función de tensión crítica frente a la vida de fatiga en un material compuesto vidrio-epoxi unidireccional con distintas orientaciones,  $R = 0.1$ .

Figure 6.- Critical fatigue life function vs. fatigue life of unidirectional glass-epoxy composite with different fiber orientations,  $R = 0.1$ .

## 4. CONCLUSIONES

Este artículo ha estudiado el punto último de rotura en un material compuesto vidrio-epoxi con refuerzo de fibra unidireccional sometido a fatiga, teniendo en cuenta el efecto de cargas multiaxiales. Se han tenido en cuenta las componentes de tensión transversal y de cortadura en el plano como responsables últimas de la rotura por fatiga. Basándose en el modelo de fatiga y en el procedimiento analítico desarrollado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se propone un modelo del punto último del daño por fatiga basándose en los mecanismos de fatiga observados en materiales compuestos con refuerzo de fibra sometidos a cargas cíclicas, y en las componentes de tensión cíclica que gobiernan el crecimiento del daño en el material.
- Los métodos de predicción convencionales -curvas S-N- basados en los esfuerzos de fatiga nominales a escala global, no son capaces de identificar los modos de fallo individual que existen en un material compuesto unidireccional sometido a cargas multiaxiales de fatiga. El modo de fallo por fatiga en un material compuesto con refuerzo de fibra unidireccional está gobernado por las tensiones locales, y por el criterio de fallo asociado a estas tensiones. Por tanto, el método de predicción aquí propuesto se formula de acuerdo con las tensiones en cada lámina asociadas a los modos de fallo a escala local.
- El método de predicción de vida de fatiga propuesta en este trabajo se ha aplicado con éxito para estudiar las vidas de fatiga de sistemas de materiales compuestos unidireccionales. El método es capaz de tener en cuenta un parámetro tan importante como la orientación de la fibra respecto a la carga en el caso de láminas unidireccionales.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Hashin, Z., Rotem, A., "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials", *J. of Composite Materials*, Vol. 7, 1973, pp. 448-464.
- (2) Hashin, Z. "Failure criteria for unidirectional fiber Composites", *ASME J. of Applied Mechanics*, Vol. 47, 1980, pp. 329-334.
- (3) Revuelta, D., Cuartero, J., Miravete, A., Clemente, R., "A new approach to fatigue analysis in composites based on residual strength degradation", *Journal of Composite Structures*, Vol. 48, 2000, pp. 183-186.
- (4) Kim, R. Y., Donaldson, S.L., "Life prediction of glass/vynilester and glass/polyester composites under fatigue loading", *Proceedings of ICCM 10*, Madrid, 1995.
- (5) Reifsnider, K.L., *Fatigue of Composite Materials-Composite Materials Series*, Vol. 4, Elsevier Science Publishers, 1991.
- (6) Hahn, H. T., "Fatigue behavior and life prediction of composite laminates", *Composite Materials: Testing and Design, 3<sup>rd</sup> Conference*, ASTM, 1979.
- (7) Allen, D. H., W. N., "Damage evolution in Laminates", *Damage Mechanics of Composite Materials*, Ed. R. Talreja, Elsevier Science, 1994, pp. 79-116..
- (8) Findley, W. N., "A Theory for the effect of mean stress on fatigue metals under combined torsion and axial loading or bending", *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1959, pp. 301-306.

## 4. CONCLUSIONS

*This paper explores ultimate failure in a unidirectional glass-fibre reinforced epoxy composite material subjected to off-axis cyclic loading. In the studies conducted, fatigue life was considered to be governed by planar transverse-to-fibre and shear stresses. A summary of the fatigue model and analytical procedure developed, along with the conclusions drawn, follows:*

- *The cyclic fatigue damage model proposed is based on physical failure mechanisms observed in fibre composites under cyclic loading and the cyclic stress components that govern the spread of the damage throughout the material.*
- *Conventional fatigue life prediction methods -S-N curves- based on global nominal stresses may not be able to identify individual failure modes in unidirectional composite materials under cyclic off-axis loading. Since cyclic fatigue failure in fibre composite laminates is governed by ply stress and associated failure criteria, the fatigue life prediction methodology proposed is formulated in terms of local ply failure mode and associated stress.*
- *The cyclic life prediction methodos proposed in this paper was successfully used to study the fatigue failure lives of unidirectional composite materials. This approach is able to account for such important fatigue loading parameters as the off-axis angle between fibre orientation and the direction of the load applied.*

## **BIBLIOTECA DEL IETCC**

### **RECURSOS DE INFORMACIÓN PARA EL ÁREA DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN**

La Biblioteca del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (<http://www.ietcc.csic.es/biblioteca.html>) creada desde la fundación del Instituto en el año 1952, está integrada dentro de la red de bibliotecas del CSIC (<http://www.csic.es/cbic/cbic.htm>). Es una biblioteca de investigación especializada en temas de ingeniería, arquitectura, construcción, ciencias de los materiales, normativa, etc. Su fondo bibliográfico está formado por más de 19.000 volúmenes y 684 títulos de revistas nacionales y extranjeras, disponible dentro de los Catálogos Informatizados de las Bibliotecas del CSIC (<http://sauco.csic.es:4505/ALEPH>). Integra también este fondo la colección de “*Monografías del Instituto Eduardo Torroja*” con 400 títulos publicados y un fondo especializado de folletos, cartillas y manuales que recogen trabajos de investigación especializados en el área de la ingeniería, arquitectura y construcción.

Su sala cuenta con 10 puestos de lectura y dispone de 3 ordenadores para consulta de bases de datos, catálogos, revistas electrónicas y recursos de información científica en Internet

La biblioteca ofrece sus servicios de información a la comunidad científica española y profesionales del área de la ingeniería, arquitectura y construcción.

#### **Servicios de referencia e información bibliográfica:**

##### Acceso a la información electrónica:

Catálogos CIRBIC: (<http://www.csic.es/cbic/acceso.htm>)

Bases de Datos de la Red de CD-ROM del CSIC

Revistas Electrónicas

##### Acceso a la información especializada disponible en Internet:

##### *Servicio de búsquedas bibliográficas:*

Este servicio facilita la obtención de referencias bibliográficas sobre cualquier tema de interés para el usuario.

#### **Servicio de suministro de documentos:**

##### Obtención de Documentos:

Búsqueda y suministro de artículos, libros, normas, manuales, etc. Además del envío de documentos por medios convencionales (correo, fax, etc.) la biblioteca del Instituto dispone de un servicio de envío de documentos por correo electrónico.

Para más información sobre los servicios y tarifas de los mismos:

[jimendoza@ietcc.csic.es](mailto:jimendoza@ietcc.csic.es)

[Bib\\_Torroja@bib.csic.es](mailto:Bib_Torroja@bib.csic.es)

<http://www.ietcc.csic.es/biblioteca.html>