

Capítulo 7

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

7.1. Conclusiones

La tesis presentada propone una metodología para el análisis de la degradación por fatiga producida por la aplicación de cargas cíclicas en un composite laminado de fibras largas.

En primer lugar se han estudiado los mecanismos de degradación que son responsables del deterioro irreversible de las propiedades de rigidez y resistencia de los composites bajo cargas cíclicas. Se ha presentado una visión de los fenómenos de degradación que tienen lugar en un elemento estructural de polímero reforzado con fibras (FRP) describiendo de forma cualitativa los distintos modos de daño en laminados, la interacción entre ellos y su propagación. Se ha comentado con profundidad cómo los diagramas de vida a fatiga pueden representar estos mecanismos de degradación. También se muestra la visión fenomenológica del análisis del fenómeno de la fatiga con un seguimiento de las propiedades efectivas del compuesto mediante las curvas en el plano S-N, curvas de degradación de la resistencia residual y disminución de la rigidez. Con la ayuda de estos diagramas se ha interpretado cómo afectan al comportamiento global de un laminado factores tan diversos como la disposición y propiedades de sus constituyentes o las características de las cargas variables aplicadas.

A continuación, mediante una revisión de los modelos de fatiga propuestos por otros autores, se han presentado las estrategias más comunes para la predicción del tiempo de vida de un material sometido a cargas cíclicas. En esta revisión se ha dado una especial importancia al enfoque del estudio de la fatiga en composites a través de modelos de daño en la mecánica de medios continuos (MMC), comentando en detalle los principales estudios en este campo. Asimismo, se han revisado distintas estrategias de acumulación de daño para estudiar cargas cíclicas no estacionarias que permiten generalizar muchas de estas aproximaciones a casos reales de piezas en servicio.

En el presente trabajo se propone un método para la formulación de la degradación por el fenómeno de la fatiga. Se ha ideado una metodología con la cual se ha desarrollado un modelo constitutivo integrado en la MMC para la modelización de la degradación por

fatiga. El modelo permite estudiar el comportamiento del composite bajo sollicitación de tensiones cíclicas de características variables. Se ha definido una formulación generalizada para las curvas S-N y otra para las curvas de resistencia residual. Se ha elaborado un modelo de acumulación de la degradación que es sensible a las características cambiantes de las tensiones cíclicas. De esta forma se ha obtenido un método para la predicción de vida de FRP.

Se ha realizado, también, la implementación del modelo de degradación de la fatiga en un sistema de cálculo numérico de elementos finitos que permite acoplar la degradación a fatiga con cualquier modelo constitutivo del material (elástico, degradación progresiva y localizada, plasticidad, etc.). Para agilizar el proceso de cálculo, la implementación numérica se ha completado con la inclusión de una metodología que permite una linealización en el avance temporal aplicando bloques representativos de conjuntos de ciclos de carga.

Esta implementación se ha realizado en dos códigos de elementos finitos distintos. Por un lado se ha implementado en un programa comercial que ha permitido obtener una sencilla herramienta de predicción de vida de piezas de FRP aplicable durante la fase de diseño. Por otro lado se ha introducido esta metodología en el modelo constitutivo para materiales compuestos (Car *et al.*, 2000) dotándolo de capacidad de análisis de degradación por fatiga. Se trata de un *mesomodelo* que permite obtener la respuesta del material compuesto como la adición del comportamiento de sus sustancias componentes (Oller *et al.* 1996). Mediante una generalización de la teoría de mezclas, que permite tratar fenómenos como el *debonding* o la deslaminación, se compatibilizan los distintos modelos para obtener el comportamiento global. Cada constituyente puede tener formulado su propio modelo constitutivo no-lineal, bien sea un modelo elástico, de daño continuo o de plasticidad. Los modelos constitutivos tienen capacidad para tratar materiales anisótropos mediante la teoría de *mapeo del espacio de tensiones* (Oller *et al.*, 2003).

Finalmente, se han desarrollado unos ejemplos de validación de los modelos elaborados y formulados durante la tesis. Complementariamente, se han generado ejemplos de aplicación de la metodología para analizar del comportamiento de laminados y/o para predecir la vida de elementos estructurales de FRP durante la fase de diseño.

Por lo tanto, las conclusiones y aportaciones del trabajo desarrollado en la tesis se pueden resumir en:

(a) Se ha formulado e implementado un modelo de degradación para composites laminados sometidos a cargas que generen tensiones cíclicas dentro de un modelo constitutivo no-lineal.

El tratamiento de la degradación a fatiga permite la disminución de la resistencia residual en función del número de ciclos y la degradación de la rigidez del composite. La disminución de la resistencia se formula directamente a partir de evidencias experimentales. La

degradación de la rigidez se realiza mediante un acoplamiento cinético con un modelo de daño. Este enfoque permite tratar la fatiga junto a cualquier otro fenómeno no lineal (daño, plasticidad, *creep*, etc.) y asegurar que se sigan las leyes de la termodinámica, siempre y cuando el modelo al cual va acoplado las cumpla. Se ha implementado en un modelo constitutivo propio para composites que incorpora: la teoría de mezclas generalizada, el tratamiento de la anisotropía, el deslizamiento entre fibra y matriz, el micropandeo de la fibra y las grandes deformaciones.

(b) Generalización de la definición de las curvas S-N para que incorporen el efecto de la tensión media y consideren el fallo por tracción y por compresión de forma separada.

Se ha reinterpretado la información que proporcionan las curvas S-N. A partir de este trabajo se han definido curvas S-N separadas para el fallo de tracción y para el fallo de compresión. Esto hace posible que el modelo haga un buen seguimiento de todas las tipologías de tensiones cíclicas que puedan aparecer. Con ello se hace más comprensible la interpretación física de la esperanza de vida que representan.

(c) Se ha presentado una metodología para la obtención de las curvas S-N generalizadas, definidas en este trabajo, a partir de los datos experimentales.

Con una buena interpretación de los datos experimentales ha sido posible formular coherentemente las curvas S-N generalizadas. Mediante algunas hipótesis de interpolación de estos datos también es posible reducir considerablemente el programa de ensayos para caracterizar un material a fatiga.

(d) Se ha ideado un procedimiento de acumulación de la degradación a fatiga sensible a cambios en la tensión cíclica ya sea de su valor medio, de su amplitud o de su índice de reversión.

Las características de la tensión cíclica sobre un punto no se mantienen constantes, ya sea por variaciones en las cargas externas, por redistribución de esfuerzos debido a la aparición de degradación, o bien debido a otros fenómenos no-lineales del modelo. Para ello se ha ideado una metodología de acumulación de la degradación a fatiga que tenga en cuenta la evolución de la degradación en función de las características de las tensiones cíclicas.

(e) Se ha desarrollado un sistema de control del avance en la historia de cargas con adaptación automática a los cambios de las características en la tensión cíclica.

De esta forma es posible realizar análisis de fatiga en altos ciclos de carga. La aplicación de cada nuevo incremento de carga (agrupando los incrementos de carga en bloques de números de ciclos) se divide en dos etapas. Una primera etapa sirve para determinar las

características de la tensión cíclica y asegurar que éstas no varían durante todo el incremento. La segunda etapa calcula la degradación por fatiga mediante una linealización en el número de ciclos.

(f) Se ha elaborado una sencilla herramienta útil para la predicción de la vida en servicio de composites laminados.

Realizando ciertas simplificaciones que permite la metodología propuesta se ha construido una herramienta de seguimiento de la degradación a fatiga que, mediante modelos sencillos lineales, es suficientemente apta para la fase de diseño de nuevos componentes. Esta herramienta es válida para estimar nuevos diseños de piezas estructurales en condiciones de servicio en campos como la aeronáutica, automoción, energía eólica, etc. Siendo fácil su implementación en códigos de elementos finitos comerciales.

7.2. Futuras líneas de trabajo

A partir del estudio desarrollado en esta tesis han surgido nuevas ideas para futuras líneas de trabajo que permitirían mejorar y generalizar alguno de los aspectos de la metodología y del modelo propuesto. Se pueden destacar los siguientes temas que pueden dar lugar a nuevos trabajos:

(a) Desarrollo de un campaña de ensayos experimentales orientado a caracterizar correctamente el modelo constitutivo para materiales compuestos.

El *mesomodelo*, que se expone en el capítulo 5, realiza un tratamiento del composite a partir de la adición de los comportamientos de sus componentes y de las interfases entre las fases de refuerzo y la matriz. Ello supone la necesidad de realizar un tipo de experimentación muy concreta para su correcta parametrización. Este tipo de experimentación, muchas veces, no se encuentra en la bibliografía o en las bases de datos del comportamiento de los composites. Por lo tanto, sería interesante definir y realizar los experimentos concretos que proporcionarían la información que necesita el mesomodelo.

(b) Integración de la formulación y mejora de la implementación del mesomodelo para materiales compuestos.

En la actualidad no todos los aspectos formulados en el capítulo 5 están implementados en el mismo código de elementos finitos. Por lo tanto, sería interesante realizar una integración real de este tipo de formulaciones, aspecto que permiten conceptualmente. En algunos casos también sería interesante realizar alguna mejora en la formulación, por

ejemplo, incluir un modelo con daño lateral (compresión y tracción) y, también, con daño direccionado (anisotropía inducida).

(c) Implementación del modelo de degradación a fatiga propuesto en métodos de homogeneización de doble escala.

La propuesta de formulación del tratamiento de la fatiga podría ser implementada en un método de análisis de homogeneización a doble escala. De esta manera se aprovecharía mucho mejor su potencia, pudiéndose obtener resultados muchos más acordes con el comportamiento real del material. Este enfoque también permitiría depender menos de la experimentación.

(d) Inclusión de otros fenómenos de eminente importancia en el comportamiento de los composites a tiempos largos.

Junto a la fatiga producida por cargas cíclicas aparecen fenómenos asociados al comportamiento en tiempos elevados. Por lo tanto, sería interesante incluir en la formulación propuesta fenómenos como la fatiga estática, el *creep*, fenómenos higrométricos, degradación por ciclos térmicos, degradación por radiación lumínica, etc.

(e) Incorporación de la estocástica en la formulación a fatiga y la degradación del composite.

Tanto la fatiga como el fenómeno de degradación son de naturaleza estocástica. Los resultados experimentales presentan un alto grado de dispersión. Por lo tanto la extensión de la formulación a aproximaciones estadísticas permitiría realizar análisis de confiabilidad sobre los resultados y las predicciones de vida que se obtienen del modelo.

7.3. Referencias

- Car, E., Oller, S. y Oñate, E. (2000). *Tratamiento numérico de los materiales compuestos*. Vol. 57. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.
- Oller, S., E. Car y J. Lubliner. (2003). Definition of a general implicit orthotropic yield criterion. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **192**, no. 7-8: 895-912.
- Oller, S., E. Oñate, J. Miquel y S. Botello. (1996). A plastic damage constitutive model for composite materials. *Int. J. Solids and Structures* **33**, no. 17: 2501-2518

