

Capítulo 6

***CONCLUSIONES Y TRABAJOS
FUTUROS***

6.1 Resumen y conclusiones

El objetivo principal del presente proyecto ha sido caracterizar el comportamiento a fatiga en tracción – tracción de laminados de tejido de fibra de carbono / resina epoxi. Se ha estudiado dicho comportamiento para dos tipos de orientación del refuerzo fibroso del tejido: orientación del refuerzo a 0/90° y orientación del refuerzo a 45/-45°. Además se ha analizado la influencia de la frecuencia de ensayo, realizando los ensayos de cada tipo de laminado a dos frecuencias distintas.

Para alcanzar dicho objetivo ha sido necesario llevar a cabo la fabricación manual de todos los especímenes a ensayar y además hemos necesitado estudiar el comportamiento a tracción cuasi-estática de los diferentes laminados desarrollados.

Tras el desarrollo de todos los ensayos y el análisis de los resultados obtenidos se van a exponer las conclusiones que se han podido alcanzar:

Proceso de fabricación:

- El proceso de fabricación de los paneles laminados ha sido llevado a cabo de forma completamente manual. Se han seguido las recomendaciones especificadas en las normativas correspondientes y todo el desarrollo ha estado supervisado por los miembros del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla. No obstante, al tratarse de desarrollos manuales, la destreza y experiencia en el campo de la fabricación con materiales compuestos juega un papel importante en el éxito del proceso. Por lo tanto, es probable que se cometieran errores que conllevan imperfecciones en los especímenes desarrollados.

Ensayos estáticos de tracción:

- A la vista de los coeficientes de variación de los resultados obtenidos y la morfología del fallo de los especímenes podemos decir que los ensayos estáticos han sido satisfactorios.
- Como era lógico esperar, la resistencia estática a tracción (σ_{ut}) de los laminados con orientación del refuerzo 0/90° es muy superior a la correspondiente a los laminados con orientación del refuerzo a 45/-45°. Para los ensayos on-axis obtenemos unas resistencias a tracción del orden de 750 MPa, mientras que para los ensayos off-axis obtenemos unas resistencias a tracción del orden de 200 MPa. Esto nos indica la gran importancia de la orientación del refuerzo fibroso en el comportamiento a tracción de laminados de fibra de carbono.
- En los dos paneles desarrollados con orientación de la fibra 0/90° se ha observado una discrepancia considerable en los valores de resistencia estática a tracción. Esto puede ser debido a la presencia de imperfecciones en el primero de los paneles, o bien, a la insuficiencia del número de ensayos llevados a cabo. Un número mayor de ensayos

nos hubiera aportado resultados mucho más fiables. No obstante, esto no ha supuesto un problema para el posterior análisis del comportamiento a fatiga.

- En cuanto a los valores obtenidos del módulo elástico (E) ocurre algo similar. Para los especímenes con el refuerzo a 0/90° obtenemos valores de E en torno a 60 GPa, mientras que para las probetas con el refuerzo a 45/-45° el módulo E se encuentra alrededor de 12 GPa.
- Salvando las discrepancias antes mencionadas, los resultados obtenidos son acordes a los valores hallados en estudios previos con laminados de tejido de fibra de carbono / resina epoxi.

Ensayos de fatiga bajo cargas de tracción – tracción:

En primer lugar es necesario comentar que la dispersión de los resultados de los ensayos de fatiga en materiales compuestos es alta, no sólo en los experimentos llevados a cabo en el presente proyecto, sino también en los estudios previos desarrollados presentes en la literatura. Para obtener unos resultados más veraces del comportamiento a fatiga del material estudiado, es necesario un número superior de ensayos, pero la falta de recursos en cuanto a material y tiempo no lo ha permitido. No obstante podemos decir que los ensayos llevados a cabo han sido satisfactorios y nos aportan una idea del comportamiento a fatiga de laminados de tejido de fibra de carbono / resina epoxi. Las conclusiones obtenidas se enumeran a continuación.

- El parámetro con mayor influencia en el comportamiento a fatiga es el nivel de carga al que se encuentran sometidos los especímenes. Este nivel de carga es el que determina principalmente el número de ciclos hasta el fallo.
- La influencia de la orientación del refuerzo es también evidente, ya que al tratarse de ensayos de fatiga en tracción, los especímenes con el refuerzo orientado en la dirección de la carga trabajan mucho mejor, ya que es la fibra la responsable de soportar las cargas.
- La frecuencia de ensayo tiene una influencia distinta en los laminados con el refuerzo a 0/90° y en los laminados con el refuerzo a 45/-45°. Mientras que para los ensayos on-axis el incremento de frecuencia de 10 a 15 Hz no supone una disminución de la vida a fatiga de los especímenes, en los ensayos off-axis sí se aprecia una disminución del número de ciclos hasta la rotura al pasar de 2 a 8 Hz, aunque ésta no es muy significativa. Es evidente la necesidad de realizar estudios a distintas frecuencias a las ensayadas para lograr conocer la verdadera influencia de la frecuencia de ensayo en el comportamiento a fatiga.
- Tras la representación de las curvas S-N de los resultados obtenidos podemos confirmar que para los ensayos on-axis el número de ciclos hasta el fallo en relación a la tensión máxima aplicada sigue una tendencia lineal logarítmica.
- Sin embargo esta tendencia no se aprecia de forma tan clara para los ensayos off-axis, quedando las curvas S-N con una forma de S ya observada en los estudios de Kawai y otros [15].
- En cuanto a la morfología de la zona de rotura de los especímenes podemos decir que para los ensayos on-axis ésta se caracteriza por ser perpendicular a la dirección de la carga mientras que para las probetas con refuerzo a 45/-45° la zona de rotura se

encuentra a 45° con la dirección de la carga. Además podemos decir que para niveles altos de carga obtenemos una menor zona afectada, siendo la rotura más parecida a la que se produce en los ensayos estáticos. Sin embargo, para niveles bajos de carga, en los que se alcanzan elevados números de ciclos hasta la rotura se produce una mayor delaminación y la zona afectada es mayor.

- Con respecto al calentamiento sufrido por los especímenes durante los ensayos de fatiga podemos afirmar que a mayor frecuencia de ensayo se alcanzan mayores temperaturas y que estos incrementos de temperatura son más acusados en las probetas con orientación del refuerzo a $45/-45^\circ$ ya que en éstas la resina juega un papel más importante. Además, observamos que existe un mayor calentamiento de los especímenes ensayados a niveles de carga medios, en los que se alcanza un número elevado de ciclos a una tensión máxima de valor medio (ni muy bajas ni cercanas a la resistencia estática a tracción).

6.2 Trabajos futuros

En base al presente proyecto se pueden desarrollar multitud de desarrollos futuros. En primer lugar es necesario llevar a cabo un número superior de ensayos del mismo tipo a los desarrollados aquí. Además es imprescindible realizar ensayos de fatiga para este mismo material, pero con laminados con distintas orientaciones del refuerzo, es decir, orientación de la fibra a $15/105^\circ$ y $30/120^\circ$ por ejemplo.

Por otro lado, para una completa caracterización del comportamiento a fatiga de laminados de tejido de fibra de carbono / resina epoxi es necesario llevar a cabo ensayos dinámicos con distintos valores del índice de reversión (R), es decir, ensayos bajo cargas de tracción – compresión y ensayos bajo cargas de compresión – compresión.

Para analizar la verdadera influencia de la frecuencia en el comportamiento a fatiga del material ensayado es necesario llevar a cabo ensayos a distintas frecuencias a las estudiadas en el presente proyecto, tanto superiores como inferiores.

Es interesante también analizar el comportamiento a fatiga sometiendo a los especímenes a un calentamiento en un horno durante el desarrollo de los ensayos, ya que en este estudio se han llevado a cabo a temperatura ambiente.

Por otro lado, se pueden llevar a cabo estudios de caracterización a fatiga de laminados con distinta orientación del refuerzo en cada una de las láminas.

Una vez desarrollados los estudios futuros aquí mencionados se puede llevar a cabo un modelo fenomenológico para estimar la vida a fatiga de laminados de tejido de fibra de carbono / resina epoxi, teniendo en cuenta las consideraciones estadísticas necesarias y unos correctos márgenes de seguridad.

