

J. Zurbitu^{a*}, M. Cabello^b, C. Moravec^c, J. García-Martínez^c,
M. Olave^a, I. Urresti^a, F. Martínez^{a,b}

^a IK4-IKERLAN Technology Research Centre, Mechanics, Structural Reliability. Arrasate-Mondragón, Spain.

^b IK4- IKERLAN Technology Research Centre Mechanics, Robust Design. Arrasate-Mondragón, Spain.

^c Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, Structures and Mechanisms Area, Madrid, Spain.

*jzurbitu@ikerlan.es

Caracterización acelerada de CFRP para la obtención de diagramas de vida constante

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 5 de Mayo 2017

En la versión revisada 5 de Mayo 2017

Aceptado 31 de Mayo 2017

Accesible online 21 de Junio 2017

Palabras clave:

CFRP

Fatiga

Diagrama de Vida Constante

Ensayo acelerado fatiga

Existen distintas formas de obtener el comportamiento a fatiga de los materiales compuestos, como la aplicación teorías clásicas o la de modelos complejos de daño progresivo. Recientemente, se ha demostrado buena efectividad a la hora de predecir la vida a fatiga mediante diagramas de vida constante. Sin embargo, la gran cantidad de ensayos que se precisan, y el tiempo necesario para su realización, hacen de este método un proceso muy costoso en términos de recursos y tiempo.

El objetivo de este trabajo es, evaluar métodos de caracterización acelerados en conjunto con métodos estadísticos, para obtener diagramas de vida constante a fatiga aplicados a materiales compuestos de fibra de carbono, con un número reducido de ensayos y menor tiempo de caracterización.

Los resultados muestran que, combinando métodos de ensayos universales y acelerados con métodos estadísticos, es posible obtener un diagrama de vida constante para todo el rango de modos de sollicitación de tracción-tracción, tracción-compresión, y compresión-compresión, con un número reducido de ensayos. Así mismo, se observa que, los métodos de caracterización acelerados, muestran un límite de vida a fatiga similar a los convencionales.

Accelerated fatigue life diagram characterization of CFRP

ABSTRACT

Keywords:

CFRP

Fatigue

Constant Life Diagram

Accelerated fatigue test

There are several ways to obtain the fatigue life behavior of composite materials, such as the application of classical theories or complex progressive damage models. Recently, constant life diagrams have demonstrated good effectiveness in predicting the fatigue life of CFRPs. Nevertheless, the large number of tests required, and the time necessary for the characterization, makes this method very expensive in terms of time and resources.

The aim of this work is the evaluation of accelerated characterization techniques in addition with statistical methods, to obtain constant fatigue life diagrams of CFRPs, with a reduced number of tests and a shorter characterization time.

The results show that, combining universal and accelerated testing techniques with statistical methods, it is possible to obtain constant life diagram for the whole range of tension-tension, tension-compression, and compression-compression loading modes, with a reduced number of tests. Moreover, it is observed that, the accelerated characterization techniques show a fatigue life limit similar to the conventional ones.

1 Introducción

Existen en la bibliografía diferentes métodos para calcular la vida a fatiga de los materiales en función de la tensión alterna a la que están sometidos. En [1] se pueden observar resumidas las teorías clásicas (Gerber, Goodman, Soderberg) y sus diferentes variantes, Figura 1. Estas se fundamentan el cálculo de una tensión equivalente en función de la media y alterna, que es comparada con diferentes criterios teniendo en cuenta las resistencias elásticas y a rotura de los materiales. Otros modelos [2], tienen en cuenta además, la degradación del material con la acumulación de ciclos, y desarrollan en su formulación leyes de evolución de la resistencia y de la rigidez en función de las tensiones medias, alternas y número de ciclos. Modelos más evolucionados [3], desarrollan diferentes correcciones de la tensión media para mejorar la precisión del cálculo.

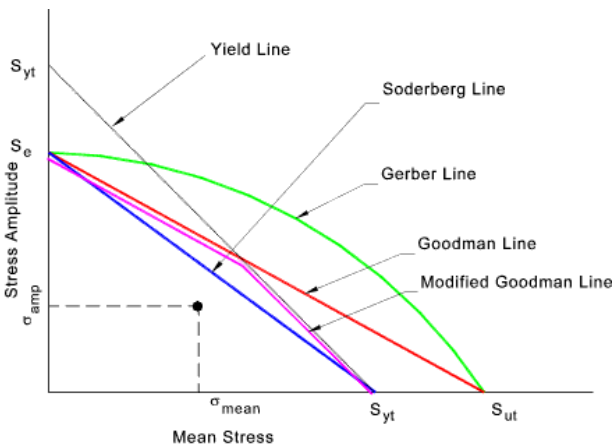


Figura 1. Teorías clásicas de criterios de fallo.

Sin embargo, en lo que se refiere a los materiales compuestos, el efecto del modo de sollicitación de tracción o compresión, y la relación de tensiones máxima y mínima a la que se somete el material, influyen de manera determinante en el cálculo a fatiga. Recientemente, se ha demostrado buena efectividad a la hora de predecir la vida de estos materiales mediante diagramas de vida constante [4], que tienen en cuenta estos factores, aunque para su obtención es necesario un gran número de ensayos, con un consumo de recursos en términos de tiempo muy elevado. Es por ello que se observa la necesidad de desarrollar métodos acelerados de caracterización para el cálculo de vida a fatiga de materiales compuestos.

En este trabajo se aborda la obtención del diagrama de vida constante de un composite de fibra de carbono, con una combinación de métodos de caracterización universales con otros acelerados; todo ello combinado con el uso de métodos estadísticos, con el fin de reducir al máximo el tiempo de obtención de estos diagramas sin comprometer su precisión.

2 Materiales

El material empleado en este trabajo, en un compuesto de fibra de carbono embebido en matriz de resina epoxy de 3,6 mm de espesor formada por 18 láminas con la siguiente orientación [45,0,-45,45,0,45,-45,0,45] 0=0/90 & 45=-45/45.

Los datos de resistencia suministrados por el fabricante se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resistencia a rotura. (Datos del fabricante).

Tipo de sollicitación	σ _u (MPa)
Tracción	464
Compresión	229

3 Metodología

Para la obtención del diagrama de vida constante, se ha seguido la siguiente metodología con los ensayos correspondientes, Figura 2:

- 1.- Obtención de la tensión de rotura a tracción mediante ensayos en maquina universal. 6 ensayos.
- 2.- Obtención de la tensión de rotura a compresión mediante ensayos en maquina universal. 6 ensayos.
- 3.- Obtención de la curva S-N a fatiga correspondiente para diferentes R's (relación entre tensión mínima y máxima de fatiga). Entre 6 y 8 ensayos para cada R.
- 4.- Tratamiento de los datos de fatiga para la obtención de tensiones de rotura con probabilidad cero de fallo siguiendo la metodología estadística de cálculo propuesta en [5].
- 5.- Construcción del diagrama de vida constante uniendo los puntos de iso-vida para las diferentes R's con las resistencias ultimas de tracción y compresión.

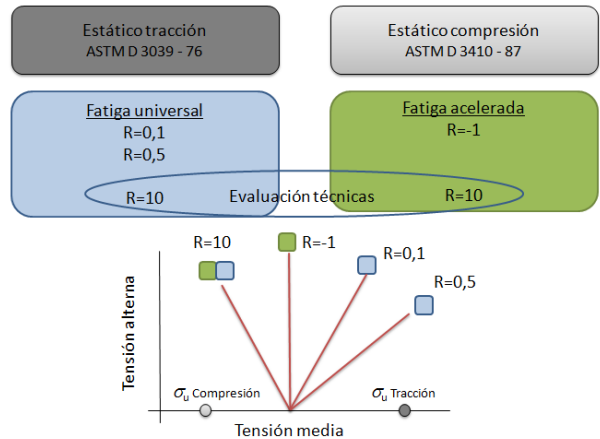


Figura 2. Esquema metodología para la obtención del diagrama de vida constante.

4 Medios de ensayo

Los ensayos de tracción y compresión estáticos han sido realizados en una maquina de ensayos universales Zwick/Rowell con capacidad de carga hasta 300KN. Los ensayos de fatiga universal indicados en la Figura 2, han sido llevados a cabo en una Máquina servo hidráulica SERVOSIS de hasta 160KN.

Para los ensayos de fatiga acelerada se empleó un desarrollo propio patentado [6] que se muestra en la Figura 3. La máquina está compuesta por dos partes, la parte dinámica el cual va



conectado al sistema de biela manivela y aplica las cargas a las probetas; y la parte estática, el cual compone la estructura de la máquina y donde se encuentran la célula de carga y el sensor de posición. La máquina es capaz de realizar ensayos tanto de F3P como F5P a alta velocidad con un desplazamiento de hasta 25 mm. La frecuencia del ensayo está limitada a 20 Hz, por calentamiento excesivo del material ensayado, aunque su principal ventaja es el gran desplazamiento aplicable a altas frecuencias, aspecto limitado en las máquinas servo-hidráulicas comerciales de fatiga.

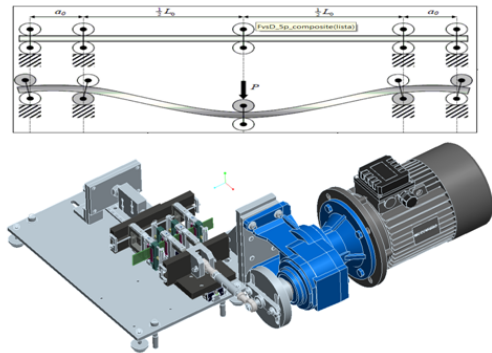


Figura 3. Máquina de ensayos de fatiga acelerada patentada [6].

5 Resultados

5.1 Ensayos estáticos (tracción/compresión)

Los resultados de resistencia a tracción y compresión, Tabla 2, han sido obtenidos como el resultado de 6 ensayos para cada tipo de sollicitación, ajustándose los resultados a una distribución normal tal que, el resultado se indica para 3 desviaciones estándar que corresponde a un intervalo de confianza del 99,7%, y que son muy similares a los ofrecidos por el fabricante, Tabla 1.

Tabla 2. Resistencia obtenida de los ensayos

Tipo de sollicitación	σ_u (MPa) Confianza 99,7%
Tracción	464
Compresión	247

Las probetas, de 25 x 250 mm, han sido ensayadas en la máquina indicada en el apartado 4, a una velocidad de deformación dentro del rango estático de 10^{-3} s^{-1} . Para minimizar la concentración de tensiones en los amarres, se colocaron end-tabs de aluminio de 2 x 50 mm en los extremos adheridos con Araldite 2011; dando lugar, como se observa en la Figura 4, a que la rotura de las probetas se produjera lejos de la zona de amarre. En los ensayos de compresión se redujo la longitud de probeta hasta una longitud libre entre end-tabs de 50 mm, 100 mm menor a las de tracción, para evitar el pandeo.

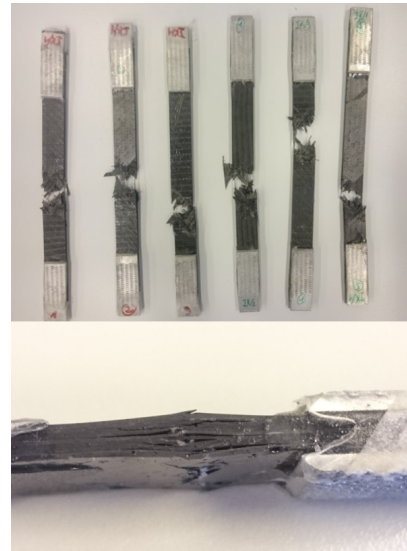


Figura 4. Probetas ensayadas a tracción (imagen superior) y compresión (imagen inferior).

5.2 Ensayos de fatiga (estándar y acelerados)

Para los ensayos de fatiga tanto acelerada como estándar, se han realizado, por cada relación de R , entre 6 y 8 ensayos a diferentes niveles de tensión. Con los resultados se ha construido una curva S-N por cada R , (ejemplo en la Figura 5) mediante la metodología estadística definida en [5], que permite, mediante el uso de distribuciones de Weibull, la obtención del número de ciclos de vida a fatiga antes de la rotura para cualquier nivel de probabilidad, cero incluido. Las ventajas de esta metodología son varias y enfocadas a la reducción del tiempo y número de ensayos necesarios. Por una parte, no es necesario realizar repeticiones de ensayos a un mismo nivel de carga, ya que el método ajusta los resultados en todo el rango de tensión y ciclos. Por otra parte, se puede limitar el número máximo de ciclos, y aunque algunos ensayos no lleguen hasta la rotura, la metodología es capaz de extrapolar los resultados de esos ensayos hasta la rotura.

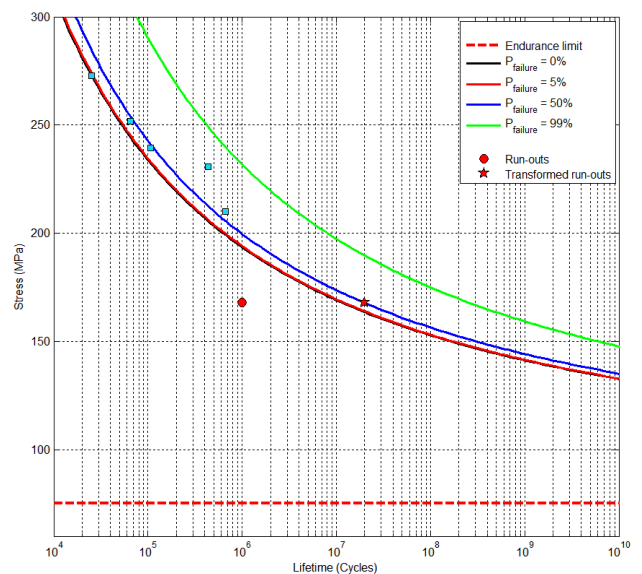


Figura 5: Curva S-N de tensión alterna obtenida de los ensayos de fatiga acelerada para $R=-1$.

5.3 Diagrama de vida constante

Con los datos de tensión de rotura a tracción y compresión, así como con las 4 curvas S-N obtenidas a fatiga para diferentes R 's, se puede obtener el diagrama de vida constante mostrado en la Figura 6. Este diagrama muestra curvas de iso vida para diferentes números de ciclos para cualquier combinación de tensión media, alterna y nivel de probabilidad de fallo. De esta manera es posible conocer para cualquier carga de fatiga, si se supera el criterio de fallo, y el nivel de daño para aplicar reglas como la de Miner dividiendo en número de ciclos de carga entre el número de ciclos de rotura del diagrama.

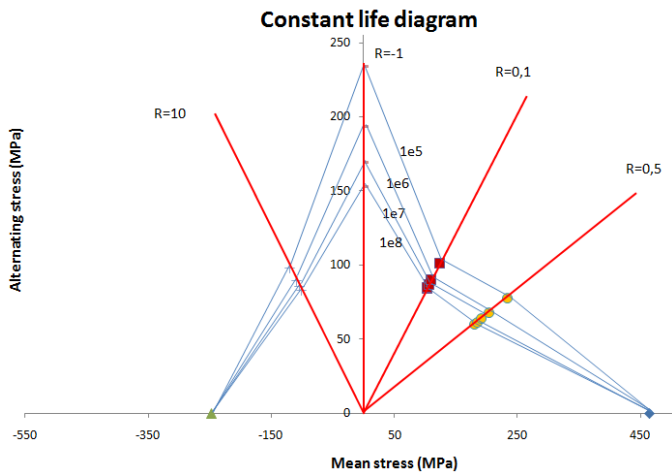


Figura 6: Diagrama de vida constante a fatiga para probabilidad cero de fallo.

5.4 Fatiga acelerada vs Estándar

Los ensayos de fatiga estándar han sido realizados en configuración tracción-tracción en máquina servohidráulica, mientras que los acelerados han sido realizados en configuración F5P en maquinaria propia patentada tal y como se describe en el apartado 4.

La principal ventaja de la metodología acelerada, es la posibilidad de reducir el tiempo de ensayo, ya que se pueden conseguir grandes desplazamientos a altas frecuencias, limitación inherente a los métodos de ensayo servohidráulicos, ya que con la tecnología actual la amplitud de ensayo se reduce al aumentar la frecuencia del mismo, impidiendo así llegar a deformaciones de rotura para altas frecuencias. Mediante la metodología acelerada, es posible alcanzar la combinación de altas frecuencias y grandes desplazamientos muchas veces necesarios en probetas de composite.

Sin embargo, la configuración de ensayo de ambos métodos no es exactamente la misma, y se observan diferencias, Figura 7, en las tensiones de rotura dependiendo del método. A pesar de ello, ambos métodos obtienen el mismo valor de límite de fatiga, 74,2 MPa para el método estándar y 74,5 para el acelerado. Esta diferencia a menores ciclos, se debe a que en la configuración acelerada la probeta está sometida a flexión, y el cálculo de tensiones recogido en la Figura 7

corresponde a la tensión máxima que es la de la capa más lejana de la fibra neutra. Al avanzar el ensayo, las capas rompen secuencialmente hacia el interior, reduciéndose la tensión real en la probeta por reducirse el momento de inercia de la misma. Es por ello que, para construir diagramas de vida constante con métodos acelerados, deben emplearse valores cercanos al límite a fatiga si se quiere estar por el lado de la seguridad. Por lo tanto, en el diagrama de vida constante de la Figura 6, la curva de iso-vida más alta (10^8 ciclos), nos permite estar por el lado de la seguridad, mientras que para valores más bajos de vida, la zona de $R=-1$, (que es la única curva de fatiga acelerada empleada en la construcción del diagrama) puede estar ofreciendo valores sobreestimados en tensión.

De cualquier manera, se observa que, los métodos de fatiga acelerada, permiten construir diagramas de vida constante fiables para el diseño de vida a fatiga a alto número de ciclos, en un tiempo menor que los métodos estándar. Por otra parte también se observa que la utilización de los métodos clásicos de cálculo de fatiga en composites, puede sobreestimar el cálculo de vida sobre todo en relaciones de tensión donde la tensión media y alterna son similares, ($R=0,1$ y $R=10$), pudiendo dar origen a fallos de diseño por rotura a fatiga.

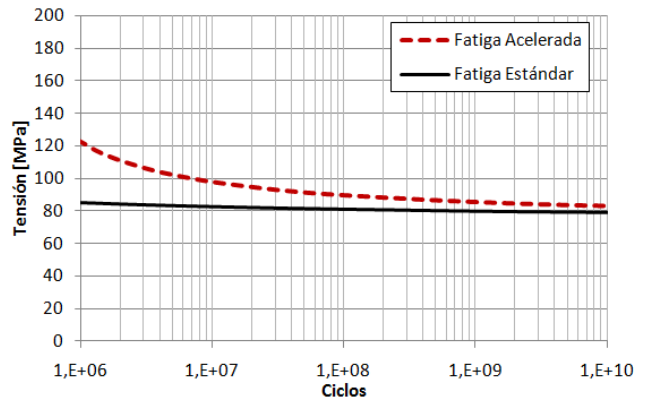


Figura 7: Comparativa de curva S-N con metodología estándar y acelerada.

6 Conclusiones

- Se ha obtenido el diagrama completo de vida constante a fatiga de un material compuesto de fibra de carbono mediante métodos de caracterización estándar y acelerados.
- Los métodos de caracterización acelerados, son válidos para obtener valores límites de vida a fatiga para cualquier tensión alterna y media, así como cualquier valor de probabilidad de fallo.
- Los métodos de caracterización acelerados, sobreestiman la vida a fatiga para bajos ciclos.
- Los métodos de caracterización acelerada empleados permiten reducir el tiempo de caracterización sin perder fiabilidad.

7 Referencias

[1] Schütz, W. A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2):263-300 (1996).



- [2] Shokrieh, M.M; Lessard,L.B. Progressive fatigue damage modeling of composite materials Part II: Material characterization and model verification. *Journal of Composite Materials* **34** (13), 1081-1116. (2000)
- [3] Dowling, N.E. Mean stress effects in strain–life fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **32**: 1004–1019. (2009)
- [4] Thawre, M.M., Paretkar, R.K., Peshwe, D.R., Sundaram, R., Manjunatha, C.M. Construction of constant fatigue life diagram for a carbon fiber composite. *Transactions of the Indian Institute of Metal*, **64**, pp. 301-303, (2011).
- [5] Castillo,E; Fernandez Cantelli, A.Libro: Metodología estadística unificada para modelar el daño a fatiga. Ed. *Real Academia de la Ingeniería*. (2009)
- [6] Asensio, M.; Perez de Goldarazena, N.; WO2014096467 (A1) 2014-06-26. Support device for specimens subjected to fatigue tests with multiple-point bending, suitable for being fixed to a fatigue test Machine. (2014)

