

ESTUDIO EXPERIMENTAL A FATIGA DE LAMINADOS UNIDIRECCIONALES A 90°

S. Sánchez-Carmona¹, E. Correa¹, A. Barroso¹, F. París¹

¹ Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos 41092 Sevilla

RESUMEN

La vida a fatiga de laminados unidireccionales a 90° (UD-90) ha sido estudiada ante distintas condiciones de carga cíclica Tracción-Tracción (R=0.1). En primer lugar, el efecto de la porosidad se ha evaluado usando dos laminados UD-90 diferentes, curándolos a diferentes presiones en autoclave. En segundo lugar, la importancia del acabado superficial en laminados UD-90 ha sido estudiada. Y, por último, el efecto de la frecuencia se ha analizado también a través de curvas S-N. Los resultados de vida a fatiga de cada caso mediante curvas S-N han sido considerados como punto de partida para la investigación actual de la predicción del comienzo del daño a fatiga en la evaluación de distintos laminados *cross-ply* [0_m/90_n]_s ante carga cíclica. Dichos estudios futuros irán ligados al análisis del comportamiento a fatiga de láminas ultra delgadas en la capa de 90° de los laminados *cross-ply* con el fin de identificar el efecto escala.

PALABRAS CLAVE: Vida a fatiga, Grieta transversal, Materiales compuestos, Porosidad, Efectos de frecuencia, Laminados unidireccionales

ABSTRACT

Fatigue life of unidirectional 90° laminates (UD-90) at different conditions under Tension-Tension loading (R=0.1) are studied. Firstly, the effect of the porosity is evaluated using two different UD-90 laminates cured at different pressures in an autoclave. Secondly, the importance of the surface finishing in UD-90 laminates is studied. And finally, the effect of the frequency is analysed by means of the S-N curves. The results of fatigue life of the different case studies (S-N curves) are considered as the starting point of the current research for the prediction of the onset of transverse cracks in the assessment of different cross-ply laminates under cycling loading. These future studies are going to be developed to analyse the fatigue behaviour of ultrathin plies in the 90° ply of cross-ply laminates with the aim of identifying the scale effect.

KEYWORDS: Fatigue life, Transverse cracking, Composites, Voids, Frequency effects, Unidirectional laminates

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga de los materiales compuestos actualmente es un área de investigación en desarrollo continuo, a diferencia de la fatiga en metales, la cual está estudiada en mayor profundidad y cuyas técnicas de análisis y predicción están mucho más desarrolladas.

Como es conocido, existen varias formas de presentar la ecuación de una curva S-N, la cual puede ser lineal en sistema de coordenadas log-log o semi-log [1]. Una de las más usadas (y que se empleará en el desarrollo de este trabajo), es la siguiente ley lineal en sistema semi-log:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_R} = k - m \log N \quad (1)$$

donde σ_{max} es el máximo nivel tensional de la curva cíclica sinusoidal, σ_R es la resistencia última a tracción

del material compuesto (en este trabajo se ha utilizado la resistencia transversal última a tracción del material, Y_T), N es el número total de ciclos en su vida a fatiga, y k y m son parámetros constantes del material, los cuales se obtienen mediante métodos de regresión. Además, es interesante desde un punto de vista estadístico el análisis de los resultados experimentales a fatiga [2]. Muchos son los autores que realizan estudios estadísticos para cualquier tipo de modelado predictivo a fatiga, tanto en modelos fenomenológicos ([3]–[5]) como en modelos de daño progresivo ([6]–[9]).

Para una precisa evaluación experimental del comportamiento a fatiga de materiales compuestos, tanto parámetros de ensayo como de fabricación tienen que ser considerados adecuadamente [2]. Uno de los parámetros significativos en la evaluación de ensayos cíclicos es la

frecuencia de aplicación de la carga [10]. Posteriormente otros autores ([1], [11], [12]) han analizado sus efectos en la vida a fatiga de distintos laminados de material compuesto. También son muchos los parámetros de fabricación a tener en cuenta durante el conformado de materiales compuestos para alcanzar propiedades mecánicas adecuadas y, por consiguiente, aceptables de cara a su comportamiento a fatiga. Uno de los factores críticos es la presencia de defectos en materiales compuestos. Un ejemplo claro es el notable efecto perjudicial de la porosidad en cuanto a la disminución acusada de las propiedades mecánicas a fatiga [13].

Actualmente, el efecto escala en materiales compuestos sometidos a carga estática es un tema de gran actualidad, como se observa en la reciente publicación [14]. Cabe por tanto plantearse si dicho efecto existe en el caso de carga cíclicas y qué implicaciones conlleva. Por ello, laminados *cross-ply* $[0_m/90_n]_s$ serán analizados en busca de dicho objetivo. Con tal fin, tal y como [15] explica, las propiedades a fatiga de laminados UD-90 pueden ser utilizadas para predecir el comienzo de grietas transversales a fatiga. Debido a ello, el objetivo principal de este trabajo se basa en el estudio de la vida a fatiga de distintos laminados UD-90 bajo distintas condiciones de fabricación y ensayo para evaluar las diferencias observadas.

2. EXPERIMENTACIÓN

2.1. Casos de estudio

El análisis del comportamiento a fatiga de laminados UD-90 se ha realizado mediante 3 casos de estudios. El primero ha tenido como objetivo evaluar el efecto de la porosidad en su vida a fatiga tras curar 2 paneles idénticos en autoclave a 2 presiones distintas, 3 y 7 bares, ambas recomendadas por el fabricante, aunque para aplicaciones diferentes. El segundo caso ha analizado la importancia del acabado de la superficie externa en laminados UD-90. Y el tercero ha evaluado el efecto de la frecuencia en la curva S-N de todos los laminados analizados.

2.2. Definición de las probetas

Los laminados UD-90 se han fabricado con prepreg de cinta unidireccional CYCOM 970/T300 de 190gsm suministrada por Solvay. En su ficha técnica [16] se indica que dicho material debe ser curado a 7bar, pero puede ser también curado a 3bar en el caso de usarlo como pieles de un panel sándwich. Con el fin de comprobar si dicha presión de curado conlleva cierta defectología en el panel fabricado, como podría ser porosidad, se han fabricado 2 tipos de laminados UD-90 distintos, uno a 3bar (3bC) y otro a 7bar (7bC).

El curado de ambos laminados se ha realizado en autoclave mediante bolsa de vacío. Con el objetivo de analizar la importancia del acabado en la superficie externa de los laminados UD-90, el curado de los

laminados 7bC se ha realizado en una misma bolsa de vacío, colocando ciertos paneles con contra-molde y otros sin él (Figura 1). Al utilizar contra-moldes, las superficies de ambas caras de los paneles quedan totalmente lisas, mientras que, al no utilizarlos, una de las caras queda con cierta rugosidad debido al *airwave* que se coloca como capa superior antes de cerrar la bolsa de vacío. Dicha idea se visualiza en los acabados mostrados en Figura 2.

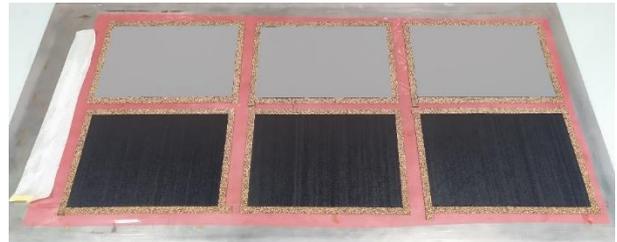


Figura 1. Mesa de curado para laminados 7bC con y sin contra-molde, superior e inferior respectivamente.



Figura 2. Acabados superficiales obtenidos con contra-molde (superior) y sin contra-molde (inferior) en la cara superior de los laminados.

A partir de este momento, los paneles sin contra-molde se designan como rugosos y los que llevan contra-molde como lisos. En la leyenda de las curvas S-N, las probetas obtenidas de los paneles rugosos se designan con R y las obtenidas de los lisos con L.

Tras la fabricación de los distintos laminados, se han pegado tacos de vidrio tanto por delante como por detrás de éstos para reforzar las zonas de agarre de las mordazas durante ensayo, evitando el fallo prematuro durante los mismos. La última etapa para la obtención de las probetas ha sido su mecanizado en un equipo de corte con disco de diamante, dando lugar a las probetas mostradas en Figura 3. Las dimensiones usadas han sido $w=25\text{mm}$, $L_s=180\text{mm}$ y $t=2,15\text{mm}$, además de $L_t=50\text{mm}$, siguiendo las indicaciones de la norma [17].

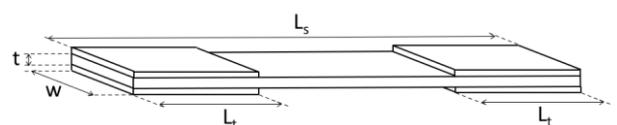


Figura 3. Esquema de probeta con dimensiones.

De manera paralela y con el objetivo de garantizar que el grado de curado de ambos tipos de laminados ha sido adecuado, se han realizado 2 ensayos de DMA siguiendo las indicaciones de la norma [18]. Los resultados obtenidos de temperatura de transición vítrea, T_g , han sido 181°C para 3bC y 185°C para 7bC, siendo la diferencia de 4°C no significativa.

Ciertas probetas aleatorias de los laminados 3bC y 7bC fueron preparadas metalográficamente mediante una secuencia específica de lijas y paños de pulido. La observación microscópica ha sido necesaria para identificar si ambos laminados mostraban porosidad en su superficie libre de bordes. Mientras que 7bC no ha mostrado poros en su superficie, 3bC ha mostrado cierta porosidad, como se puede ver en Figura 4.

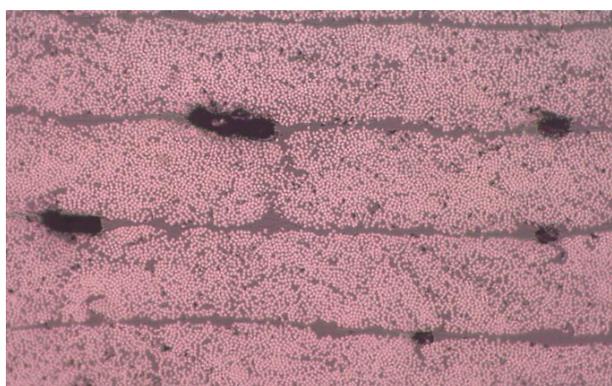


Figura 4. Porosidad en laminado UD-90 3bC.

El efecto perjudicial de la porosidad en la vida a fatiga es bastante acusado y, por ello, la cantidad de poros ha sido medida detalladamente mediante un análisis automático de imagen, siguiendo la pauta técnica [19]. Los resultados han mostrado que únicamente existe un 0.3% de porosidad tras el curado a la presión más baja empleada.

2.3. Definición de ensayos

Diferentes ensayos se han realizado con el fin de evaluar la vida a fatiga de los laminados UD-90. Por un lado, se han usado ensayos estáticos para obtener el módulo de elasticidad transversal (E_2) y la resistencia transversal a tracción (Y_T) de ambos laminados. Y, por otro lado, ensayos cíclicos tracción-tracción (T-T) se han realizado para obtener las curvas S-N de cada caso de estudio.

Los ensayos estáticos se han realizado en una máquina electromecánica Instron 4482 mediante control en desplazamiento a una velocidad de 0.5mm/min. Durante dichos ensayos, se ha usado un extensómetro 2630-112 / 84 para medir las deformaciones necesarias para el cálculo de E_2 .

Los ensayos a fatiga se han realizado en una máquina hidráulica Instron 8801 a temperatura ambiente mediante control en carga a través de una función sinusoidal, cuya ratio de carga (R) ha sido 0.1. Dicha R se define como el cociente de la tensión mínima aplicada dividida por la

tensión máxima aplicada. Con el fin de evaluar el efecto de la frecuencia, se han realizado ensayos cíclicos a ambos tipos de laminados con distintas frecuencias, comprendidas entre 10 y 20 Hz. Además, cada tipo de laminado se ha evaluado a distintos niveles de carga, definidos en tanto por uno como el cociente entre la tensión máxima a fatiga entre Y_T de cada laminado. Durante los ensayos cíclicos, un termopar K se ha adherido a la superficie de las probetas con cinta de alta temperatura para comprobar si se han producido incrementos térmicos significativos durante los ensayos. Siguiendo las recomendaciones de la norma [20], el máximo incremento térmico permitido se ha marcado como 10°C, siendo el valor a partir del que ciertos materiales han mostrado degradación significativa de sus propiedades.

2.4. Caracterización

La rigidez, E_2 , y la resistencia, Y_T , medidas para cada laminado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades transversales de rigidez y resistencia a tracción de cada laminado.

Propiedad	3bC			7bC		
	Media	DST	CV (%)	Media	DST	CV (%)
Y_T (MPa)	69.07	±4.88	7.07	73.16	±4.92	6.73
E_2 (GPa)	7.29	±0.07	0.97	7.26	±0.21	2.88

2.5. Ensayos cíclicos

En la primera campaña experimental a fatiga, probetas de 3bC se han ciclado a 2 frecuencias distintas, 10 y 15 Hz, y bajo 3 niveles de carga distintos, 0.8, 0.7 y 0.65 de Y_T . Todas ellas han sufrido un incremento máximo de temperatura de 5°C, cumpliendo el valor límite tomado. Las curvas S-N obtenidas a partir de dichos ensayos para cada una de las frecuencias se muestran en Figura 5.

En probetas UD-90 se espera que la rotura ocurra cuando la primera grieta transversal se produzca. Y así ha ocurrido para cada una de las roturas ocasionadas. Aunque se podría esperar que la grieta transversal apareciera cerca de los tacos por la concentración que allí se produce, tres cuartos del total de las roturas se han producido en el entorno de la zona central de las probetas, como se indica en Tabla 2. Las distintas zonas de rotura especificadas en dicha tabla se detallan en Figura 6.

Tabla 2. Porcentajes de aparición de las fracturas en función de las distintas zonas de las probetas de 3bC.

Zona rotura (mm)	Aparición (%)
Superior cercana a taco (1)	21.1
Superior (2)	15.8
Centro (2)	36.8
Inferior (2)	21.1
Inferior cercana a taco (1)	5.3

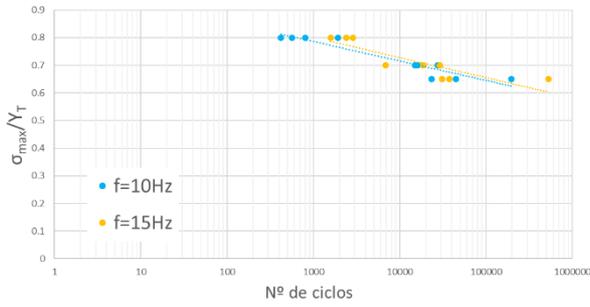


Figura 5. 1ª campaña experimental - Curvas S-N (semi-log) de laminados UD-90 3bC a frecuencias 10 y 15Hz.

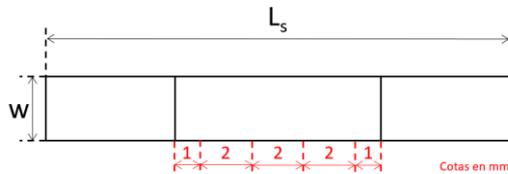


Figura 6. Esquema de las posibles zonas de rotura en probetas UD-90 ensayadas a fatiga.

En la segunda campaña experimental cíclica, probetas de 7bC han sido ensayadas a 2 frecuencias distintas, 15 y 20 Hz, bajo 3 niveles de carga distintos (0.8, 0.65 y 0.5). En este caso, todas las probetas ensayadas han mostrado un incremento máximo de temperatura de 7°C, cumpliendo también con el valor límite definido. Las curvas S-N para cada una de las frecuencias y cada uno de los acabados superficiales fabricados se muestran en la Figura 7. La flecha con la etiqueta *run-out* indica que hay probetas que no han roto tras alcanzar 10^7 ciclos, momento en el cual sus ensayos se han parado. Esta misma indicación de *run-out* es usada posteriormente en otras gráficas S-N con este mismo significado.

Tabla 3. Porcentajes de aparición de las fracturas en función de las distintas zonas de las probetas de 7bC.

Zona rotura (mm)	Aparición (%)
Superior cercana a taco (1)	27.5
Superior (2)	24.8
Centro (2)	4.2
Inferior (2)	26.8
Inferior cercana a taco (1)	16.7

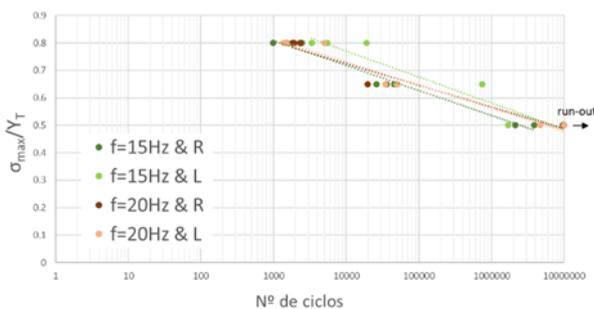


Figura 7. 2ª campaña experimental - Curvas S-N (semi-log) de laminados UD-90 7bC a distintas frecuencias (15 y 20 Hz) y distintos acabados superficiales (R y L).

En esta campaña la aparición de las fracturas también ha ocurrido variadamente en las zonas indicadas en Figura 6, tal y como se detalla en la Tabla 3.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cada caso de estudio va a analizarse independientemente en los siguientes apartados. Antes de ello, es interesante obtener las líneas de tendencia y sus coeficientes de determinación (R^2) para cada una de las curvas S-N mostradas en la Figura 5 y la Figura 7. Aunque R^2 proporciona una somera estimación de la bondad del ajuste, dicha variable estadística se ha obtenido únicamente para dar una indicación de la variabilidad de los resultados. Los parámetros k y m de la ecuación (1) y R^2 de cada una de las curvas S-N indicadas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Estadística de datos de las curvas S-N para ambas campañas experimentales.

Caso de estudio	k	m	R^2
3bC 10Hz	0.9972	0.031	0.8773
3bC 15Hz	1.0175	0.031	0.7438
7bC 15Hz Rugoso	1.0817	0.040	0.9803
7bC 15Hz Liso	1.1512	0.041	0.8986
7bC 20Hz Rugoso	1.0428	0.034	0.9531
7bC 20Hz Liso	1.0660	0.036	0.9622

Como se puede observar, los valores de R^2 de los casos 3bC son menores que los de los casos 7bC. Aunque el caso “7bC 15Hz Liso” está más cercano al 3bC, el resto tienen valores de R^2 bastante aceptables teniendo en cuenta la cantidad de probetas ensayadas. En cualquier caso, hay que analizar estos resultados teniendo en cuenta la alta dispersión que se produce en ensayos de laminados UD-90.

3.1. Efecto de la porosidad

Como se ha indicado anteriormente, y a pesar de la impresión que transmitía la primera exploración micrográfica de las muestras, la cantidad de poros en 3bC es muy reducida. Debido a ello la vida a fatiga de ambos laminados, 3bC y 7bC, es muy similar como se aprecia en la comparativa de resultados experimentales obtenidos a una frecuencia de 15Hz, Figura 8. En cualquier caso, en dicha figura se observa una ligera disminución de la pendiente de la curva S-N para el caso del laminado 3bC lo que se asocia a dicha porosidad del 0.3% obtenida.

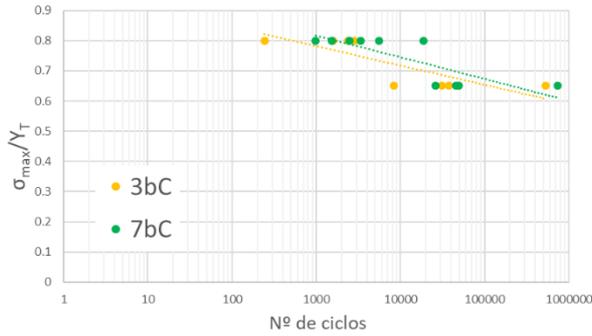


Figura 8. Comparativa de curvas S-N de laminados 3bC y 7bC a 15Hz.

3.2. Efecto del acabado superficial

Las observaciones microscópicas de las probetas UD-90 obtenidas de los laminados rugosos parecen mostrar que las roturas se producen en ciertas zonas con irregularidades, que pueden conllevar cierta concentración de tensiones, debido a la rugosidad obtenida sin contra molde (Figura 9).

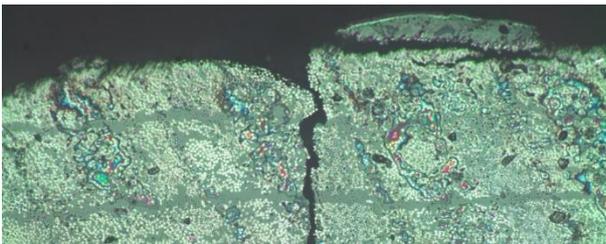


Figura 9. Roturas de probetas UD-90 obtenidas de laminado 7bC rugoso que ocurren en zonas irregulares.

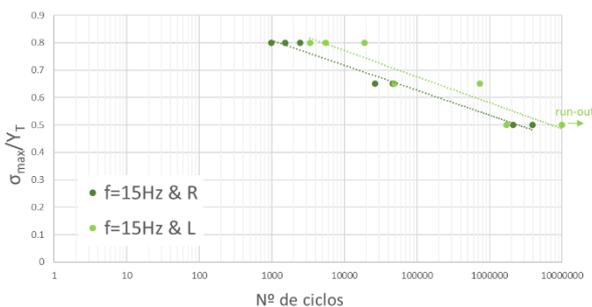


Figura 10. Comparativa de curvas S-N entre laminados 7bC rugoso (R) y liso (L) a frecuencia 15Hz.

Los resultados de la vida a fatiga de la 2ª campaña experimental se detallan a continuación separando las curvas S-N en función de la frecuencia ensayada. Así, observando la Figura 10 y la Figura 11, se puede detectar si el efecto de un acabado superficial rugoso en una de las superficies de la probeta influye en los resultados experimentales obtenidos.

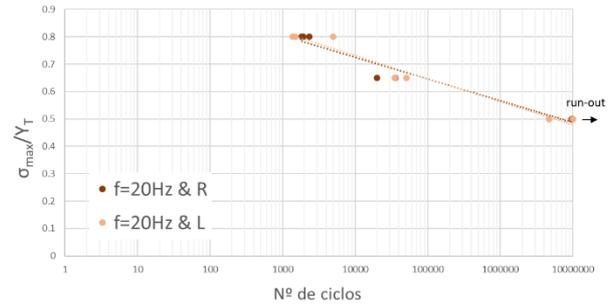


Figura 11. Comparativa de curvas S-N entre laminados 7bC rugoso (R) y liso (L) a frecuencia 20Hz.

Es cierto que la Figura 10 parece mostrar que existe mejora en la vida a fatiga de este laminado si ambas superficies de las probetas son lisas; sin embargo, observando la Figura 11 se puede apreciar cómo ambas líneas de tendencia se superponen. Teniendo en cuenta la dispersión de los resultados experimentales a fatiga en laminados unidireccionales y que la diferencia entre las líneas de tendencia de la Figura 10 es pequeña, rugosidades pronunciadas de la superficie provocada por el *airwave* pueden descartarse de ser consideradas como origen de la grieta transversal que produce la rotura del laminado UD-90. Por tanto, la distinción entre laminado 7bC rugoso y liso puede ser descartada.

En base a la conclusión anterior en el siguiente apartado los datos experimentales representados para 7bC serán considerados sólo en función de la frecuencia a la cual se han ensayado cíclicamente.

3.3. Efecto de la frecuencia

En cada una de las campañas experimentales se han realizado los ensayos a fatiga a distintas frecuencias con el objetivo de analizar cuál es la mayor frecuencia a la que los laminados UD-90 se pueden ensayar experimentalmente para agilizar los ensayos, sin alcanzar un incremento térmico significativo que implique cambios de comportamiento del material ante efectos viscosos derivados. Como se ha comentado anteriormente, ninguna de las frecuencias usadas ha provocado incrementos térmicos superiores a 7°C. Por tanto, al no superar el valor límite definido de 10°C, todas las curvas S-N comentadas hasta el momento pueden ser tomadas como válidas.

Por un lado, los resultados experimentales de 3bC, Figura 5, muestran tendencias de comportamiento similares a ambas frecuencias ensayadas (10 y 15 Hz). Es interesante recalcar que la dispersión experimental obtenida para 15Hz a 0.65Y_T ha provocado una disminución del valor de R²; este hecho nos corrobora que dicho parámetro estadístico puede dar una indicación de la bondad de los resultados con la cantidad de probetas ensayadas siguiendo las recomendaciones recogidas en [2].

Y, por otro lado, la vida a fatiga de 7bC obtenida tras la 2ª campaña de ensayos se ha representado en la Figura 12 diferenciando únicamente los resultados en función de la frecuencia usada (15 y 20 Hz). Observando dichas curvas S-N se concluye que ambas frecuencias pueden ser usadas para evaluar la vida a fatiga de laminados UD-90 al tener líneas de tendencias muy similares.

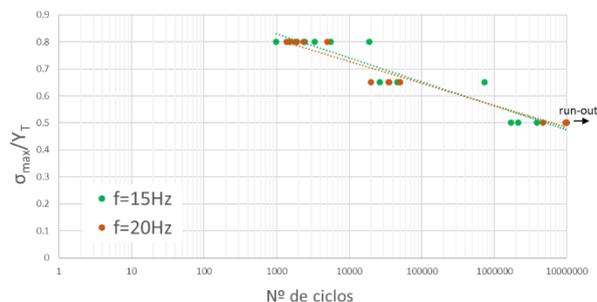


Figura 12. 2ª campaña experimental - Curvas S-N (semi-log) de laminados UD-90 7bC a distintas frecuencias (15 y 20 Hz).

4. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este trabajo ha sido obtener la vida a fatiga de distintos laminados UD-90 bajo distintas condiciones de fabricación y ensayo para evaluar las diferencias observadas. Los resultados recabados serán aprovechados en futuros estudios para el análisis y la predicción del comportamiento cíclico de láminas ultra delgadas en la capa de 90° de laminados cross-ply $[0_m/90_n]_s$ con el fin de identificar la importancia del efecto escala ante cargas cíclicas.

Para cada una de las curvas S-N obtenidas experimentalmente se ha calculado una línea de tendencia lineal, ecuación (1), en sistema de coordenadas semi-log. Los resultados de los parámetros k y m se recogen en la Tabla 4 junto con el valor de su coeficiente de determinación para cada campaña experimental. Mediante dicha estadística básica, se ha analizado la variabilidad de los resultados en función de cada caso de estudio.

Teniendo en cuenta los resultados, se pueden asumir ciertas consideraciones. En primer lugar, la cantidad de poros es tan pequeña tras curar en autoclave a 3bar que su efecto en la vida a fatiga de los laminados UD-90 3bC es despreciable. Ello implica que la fabricación de estos laminados a 3 bares es aceptable en caso de ser usado en aplicaciones cíclicas. En segundo lugar, se ha comprobado que la fabricación mediante bolsa de vacío puede ser realizada indistintamente con relación al uso de contra-molde debido a que la vida a fatiga no se ha visto considerablemente afectada tras el uso de este. Y, por último, se ha corroborado que los laminados UD-90 pueden ser ensayados hasta frecuencias de 20Hz a temperatura ambiente sin sufrir alteraciones en su vida a fatiga. Por tanto, dichos ensayos pueden ser acelerados

sin perder fiabilidad y precisión, economizando tanto el tiempo de ensayo como el material auxiliar utilizado para ellos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado gracias a un contrato PIF de la convocatoria VIPPIT-2018-II.2 otorgado por la Universidad de Sevilla y al proyecto de investigación PY18-3360, otorgado por la Junta de Andalucía en el marco de ayudas a proyectos I+D+i PAIDI2020.

REFERENCIAS

- [1] H. S. Chen and S. F. Hwang, "Accelerated fatigue properties of unidirectional carbon/epoxy composite materials," *Polym. Compos.*, vol. 27, no. 2, pp. 138–146, 2006, doi: 10.1002/pc.20181.
- [2] B. Harris, *Fatigue in composites*. Woodhead Publishing, 2003.
- [3] J. Chiachio, M. Chiachio, S. Sankararaman, A. Saxena, and K. Goebel, "A robust modeling approach for fatigue damage in composites based on bayesian model class selection," 2014.
- [4] L. Takacs, L. Kovacs, and T. Olajos, "Numerical tool with mean-stress correction for fatigue life estimation of composite plates," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 111, no. October 2019, p. 104456, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104456.
- [5] F. Taheri-Behrooz, M. M. Shokrieh, and L. B. Lessard, "Residual stiffness in cross-ply laminates subjected to cyclic loading," *Compos. Struct.*, vol. 85, no. 3, pp. 205–212, 2008, doi: 10.1016/j.compstruct.2007.10.025.
- [6] H. Ben Kahla, Z. Ayadi, F. Edgren, A. Pupurs, and J. Varna, "Statistical model for initiation governed intralaminar cracking in composite laminates during tensile quasi-static and cyclic tests," *Int. J. Fatigue*, vol. 116, no. January, pp. 1–12, 2018, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.05.030.
- [7] G. Just, I. Koch, M. Thieme, and M. Gude, "Inter fibre cracking behaviour of CFRP under very high cycle fatigue loading: Experimental and analytical multi-scale approach," in *20th International Conferences on Composite Materials*, 2015, no. July, pp. 19–24.
- [8] J. M. Berthelot, A. El Mahi, and J. F. Le Corre, "Development of transverse cracking in cross-ply laminates during fatigue tests," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 12, pp. 1711–1721, 2001, doi: 10.1016/S0266-3538(01)00068-9.
- [9] P. A. Carraro and M. Quaresimin, "Fatigue damage and stiffness evolution in composite laminates: A damage-based framework," *Procedia Eng.*, vol. 213, no. 2017, pp. 17–24, 2018, doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.003.
- [10] G. C. Tsai, J. F. Doyle, and C. T. Sun, "Frequency Effects on the Fatigue Life and Damage of Graphite/Epoxy Composites," *J. Compos. Mater.*, vol. 21, no. 1, pp. 2–13, Jul. 1987, doi:

10.1177/002199838702100101.

- [11] J. C. Marin, J. Justo, F. París, and J. Cañas, “The effect of frequency on tension-tension fatigue behavior of unidirectional and woven fabric graphite-epoxy composites,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 26, no. 17, pp. 1430–1436, 2019, doi: 10.1080/15376494.2018.1432814.
- [12] X. R. Xiao, “Modeling of load frequency effect on fatigue life of thermoplastic composites,” *J. Compos. Mater.*, vol. 33, no. 12, pp. 1141–1158, Jul. 1999, doi: 10.1177/002199839903301205.
- [13] S. Sisodia, E. K. Gamstedt, F. Edgren, and J. Varna, “Effects of voids on quasi-static and tension fatigue behaviour of carbon-fibre composite laminates,” *J. Compos. Mater.*, vol. 49, no. 17, pp. 2137–2148, 2015, doi: 10.1177/0021998314541993.
- [14] F. París, M. L. Velasco, and E. Correa, “The scale effect in composites: An explanation physically based on the different mechanisms of damage involved in failure,” *Compos. Struct.*, vol. 257, p. 113089, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113089.
- [15] A. Hosoi, S. Sakuma, Y. Fujita, and H. Kawada, “Prediction of initiation of transverse cracks in cross-ply CFRP laminates under fatigue loading by fatigue properties of unidirectional CFRP in 90° direction,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 68, pp. 398–405, 2015, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.10.022.
- [16] Technical Data Sheet from SOLVAY, “Cycom ® 970 PREPREG.” pp. 1–4.
- [17] “ASTM D3039/D3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1520/D3039.
- [18] “ASTM D7028-07: Standard Test Method for Glass Transition Temperature (DMA Tg) of Polymer Matrix Composites by Dynamic Mechanical Analysis (DMA),” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–14, 2012, doi: 10.1520/D7028-07E01.2.
- [19] “TMS PT 2701: Determinación del contenido de poros en plásticos reforzados con fibras usando Análisis Automático de Imágenes.”
- [20] “ASTM D3479/D3479M: Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 96, no. August, p. 6, 2012, doi: 10.1520/D3479.