



Obtención de curvas S-N mediante termografía infrarroja en laminados CFRP con defectos de ondulación fuera del plano

José Vicente Calvo, Norberto Feito, Eugenio Giner

Instituto Universitario de Ingeniería Mecánica y Biomecánica-I2MB, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales, Universitat Politècnica de València, jocalor@upv.es, norfeisa@upv.es, eginerm@mcm.upv.es

RESUMEN

La termografía infrarroja (IT) se presenta como una herramienta eficaz, rápida y económica para la caracterización de la vida a fatiga de laminados de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP). Este estudio se centra en la obtención de curvas S-N mediante técnicas termográficas en laminados con y sin defectos de ondulación fuera del plano, un problema que surge en materiales compuestos debido a imperfecciones durante el proceso de fabricación. También puede aparecer al adaptar el laminado a geometrías angulosas.

A través de ensayos de tracción cíclica, se monitorizó la temperatura superficial de las muestras para estimar el límite de fatiga. Los resultados obtenidos mediante termografía mostraron una alta concordancia con las curvas S-N tradicionales, con errores inferiores al 2% para laminados sin defectos y del 13% en presencia de defectos. Se utilizaron tres modelos diferentes para la estimación de la curva S-N: el modelo termográfico original de Risitano, el modelo adaptado para CFRP de Montesano y el modelo que parte de la degradación de propiedades de Huang, siendo estos dos últimos los que mejores resultados muestran para materiales CFRP. Además, se comprobó que los defectos de ondulación reducen significativamente las propiedades mecánicas del material, disminuyendo hasta un 16% la resistencia última y hasta un 40% el límite de fatiga.

Esta metodología basada en IT permite una caracterización rápida y sencilla del comportamiento a fatiga de laminados CFRP, con una notable reducción en el tiempo y coste asociados a los métodos convencionales. Este enfoque no solo facilita la detección de defectos locales en materiales en servicio, sino que también proporciona una herramienta práctica y precisa para mejorar la seguridad y el diseño de estructuras críticas en aplicaciones aeroespaciales, aerogeneradores, etc.

1. Introducción

Los laminados de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial y energética debido a su combinación de alta resistencia específica, rigidez, baja densidad y capacidad para soportar condiciones ambientales adversas. Sin embargo, defectos generados durante la fabricación, como la desalineación de fibras o la ondulación de las mismas fuera del plano, pueden comprometer significativamente su integridad estructural y reducir su vida útil [1-2]. Estos defectos son particularmente comunes en componentes con geometrías angulares o complejas y tienen un impacto crítico en sus propiedades mecánicas y durabilidad [3-5].

La fabricación de materiales compuestos sin defectos sigue siendo un desafío actual debido a las distorsiones introducidas durante el proceso, que provocan variaciones en la geometría del laminado y originan defectos como vacíos, ondulaciones de la fibra y porosidad [6]. Factores como las características del molde, las propiedades del material y las condiciones del proceso influyen directamente en su aparición [7]. Por ejemplo, el desajuste de las fibras en secciones curvas favorece la formación de ondulaciones en estas regiones. Incluso con las técnicas avanzadas de fabricación, como la colocación automática de fibra (AFP), se pueden introducir defectos debido a las trayectorias imperfectas de las fibras, lo que genera una consolidación no uniforme del laminado [8-9]. Además, las diferencias en la expansión térmica entre la fibra y la matriz pueden inducir tensiones residuales que contribuyen a la ondulación [10].

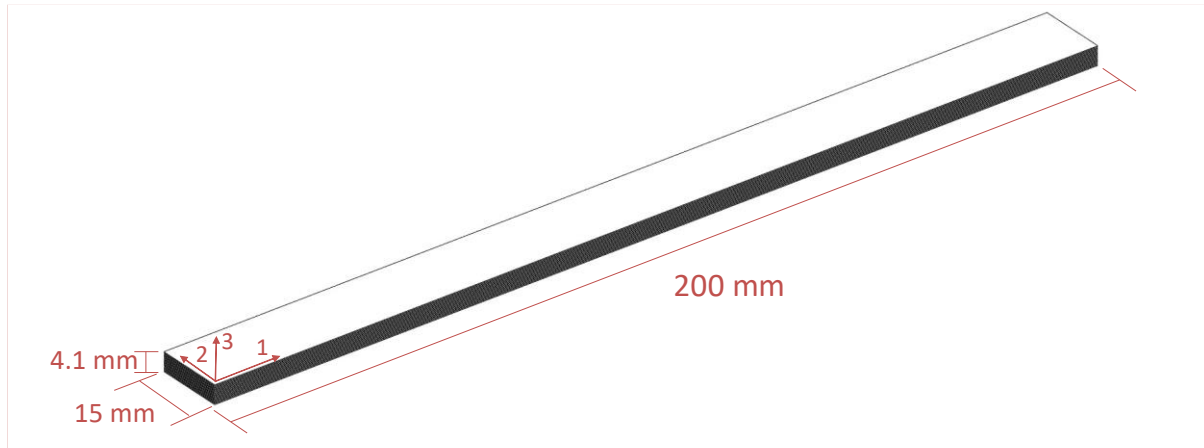
Las ondulaciones fuera del plano reducen significativamente la resistencia y la vida a fatiga de los laminados CFRP. Estudios previos han demostrado que estos defectos actúan como concentradores de tensiones locales, afectando a la rigidez y a la resistencia máxima del material [11-12]. En particular, la vida a fatiga de probetas con ondulaciones puede ser hasta un orden de magnitud menor que la de probetas sin defectos bajo las mismas condiciones de carga [13-14]. Esto subraya la importancia de detectar y caracterizar estos defectos de manera eficiente. Sin embargo, los modelos de elementos finitos (FEM), aunque útiles para el análisis detallado, resultan computacionalmente costosos cuando se aplican a escala de componente [15]. En este contexto, las técnicas no destructivas, como la termografía infrarroja, han demostrado ser herramientas valiosas para la detección y cuantificación de defectos en laminados CFRP [16]. Diversos estudios han evidenciado la correlación entre la temperatura superficial y la evolución del daño acumulado en laminados sometidos a cargas cíclicas de tracción [17].

Este estudio investiga el uso de la termografía infrarroja para evaluar laminados CFRP con múltiples defectos de ondulación fuera del plano a diferentes profundidades, un escenario poco explorado en la literatura. La técnica se emplea no solo para detectar y localizar estos defectos, sino también para predecir el límite de fatiga a partir de las variaciones de temperatura registradas durante ensayos cíclicos de tracción. Para ello, se aplican tres metodologías basadas en la relación entre la disipación de energía y el nivel de tensión, siguiendo los enfoques de Huang [18], Risitano [19-20] y Montesano [21]. El objetivo de este trabajo es evaluar la efectividad de la termografía infrarroja como herramienta para la caracterización rápida y precisa de la fatiga en laminados CFRP con defectos y compararla con métodos tradicionales. Además, se busca validar diferentes metodologías para estimar el límite de fatiga y las curvas S-N en materiales defectuosos. Los resultados obtenidos destacan el potencial de esta técnica para mejorar la integridad estructural de componentes críticos, reduciendo significativamente los costes y el tiempo de las pruebas.

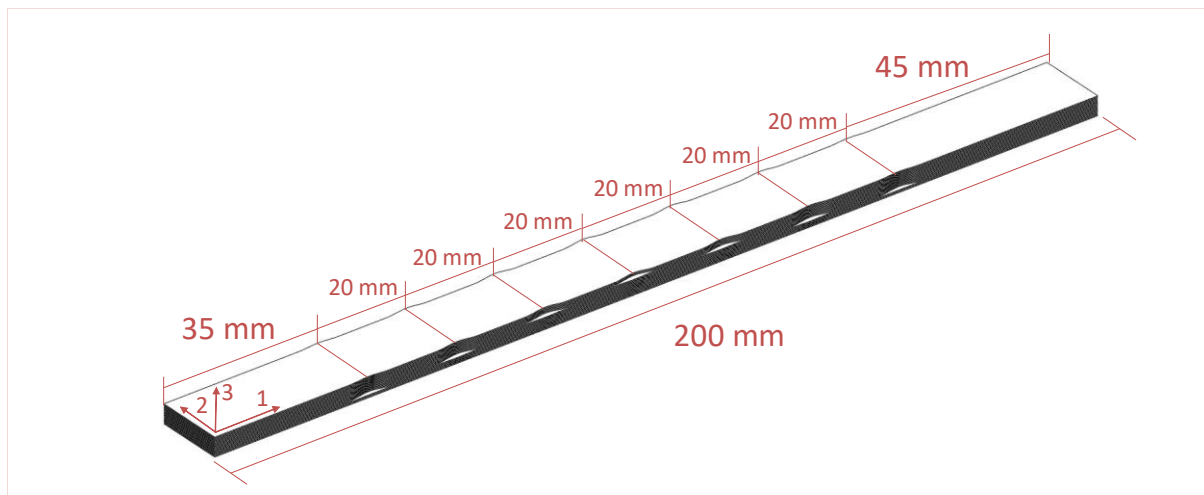
2. Materiales

La fabricación de las probetas fue realizada por la empresa Titania S.L. (Puerto de Santa María, España). Los laminados de CFRP constan de 22 capas de preimpregnado unidireccional proporcionadas por Hexcel Corporation (Stamford, USA). Cada capa contiene una fracción de volumen de fibra de carbono del 59.2 % del tipo IMA-12K. Este laminado, representativo de la industria aeroespacial, ha sido apilado siguiendo la secuencia [45/0/-45/90/0/90/0/90/-45/0/45]s. Las dimensiones de cada espécimen son de 200 x 15 x 4.1 mm, tal como se muestra en la Figura 1 (a).

Se prepararon dos lotes distintos de probetas: un lote sin defectos, y otro con inserciones del mismo material colocadas en dirección transversal para inducir múltiples ondulaciones fuera del plano generadas durante el proceso de fabricación. En este lote con defectos, se introdujeron un total de 7 inserciones, espaciadas 20 mm entre sí, a lo largo de la dirección de carga (dirección 1), con la primera inserción posicionada a 35 mm de un extremo, tal como se ilustra en la Figura 1 (b). La posición de las inserciones a lo largo del espesor varía en altura, pero están ubicadas simétricamente con respecto a la onda central. La inserción central se colocó debajo de las dos primeras capas, las siguientes debajo de 7 capas, a continuación, debajo de 13 capas y las inserciones finales debajo de 18 capas.



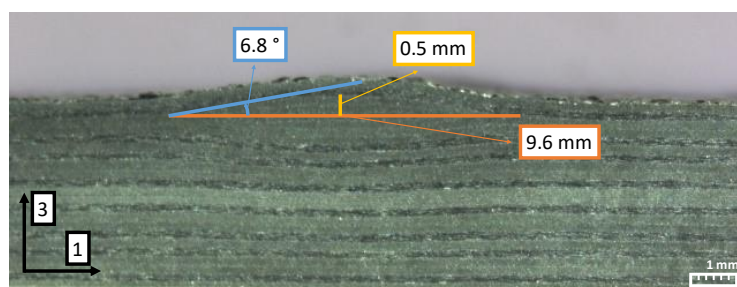
(a) Geometría de las probetas sin defectos



(b) Geometría de las probetas con defectos

Figura 1: Geometría de las probetas utilizadas en los ensayos.

Todas las ondulaciones generadas fueron caracterizadas geométricamente, resultando en una longitud promedio de 9.6 ± 1 mm, una altura máxima de 0.5 ± 0.04 mm y una inclinación de $6.8 \pm 1.3^\circ$. La Figura 3 muestra una imagen de un defecto de ondulación central, capturada con una lupa óptica, indicando los tres parámetros geométricos mencionados.

**Figura 2:** Caracterización geométrica de un defecto de ondulación.

3. Metodología experimental

Los ensayos fueron llevados a cabo utilizando una máquina hidráulica INSTRON 8801 con una célula de carga de 100 kN. Las probetas de cada lote fueron divididas en tres grupos:

- El primer grupo se dedicó a ensayos cuasiestáticos para obtener la carga de tracción última del laminado.
- El segundo grupo se sometió a ensayos de fatiga para obtener la curva S-N.
- El último grupo se utilizó para la estimación del límite de fatiga mediante metodologías basadas en termografía.

Este último grupo fue sometido a pruebas de fatiga en bloques de 7,000 ciclos, incrementando la carga entre bloques y permitiendo que el espécimen se enfriara entre ellos. Todas las pruebas de fatiga fueron realizadas a tracción con $R = 0$ y una frecuencia de 5 Hz.

Para capturar las imágenes térmicas se utilizó una cámara FOTRIC 348A (Dallas, USA). Durante los ensayos, se colocó una probeta de referencia junto al espécimen cargado. Esta probeta se mantuvo libre (sin carga), de modo que capturara la evolución de la temperatura ambiente en el laminado. Esta información se utilizó posteriormente para eliminar la influencia de la variación de la temperatura ambiente en el espécimen ensayado. El montaje experimental se ilustra en la Figura 3. Las imágenes térmicas se procesaron con el software AnalyzIR.



Figura 3: Montaje experimental.

El procedimiento utilizado con el último grupo sigue la metodología de Huang [18]. Esta metodología se basa en la relación entre la disipación de energía y el nivel de carga de la probeta. El objetivo es identificar el umbral en el que la disipación de energía indica que el espécimen ha entrado en un régimen de carga donde se inicia el daño, lo que lleva a una eventual rotura por fatiga. Este umbral, comúnmente conocido como límite de fatiga, se define típicamente en 2,000,000 de ciclos. Por debajo de este nivel de carga, se considera que el espécimen tiene una vida infinita, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 4.

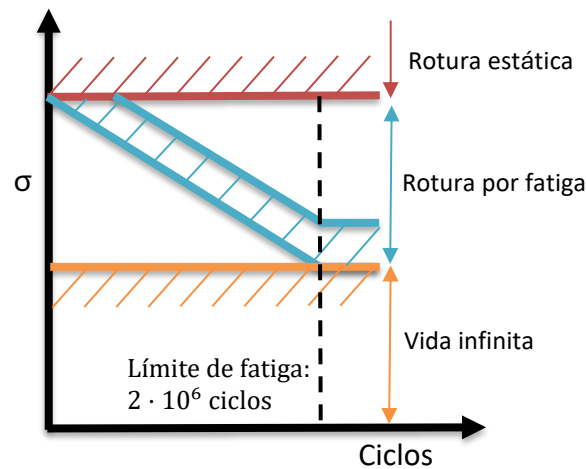


Figura 4: Diagrama de vida a fatiga S-N.

La ecuación de conducción de calor local puede usarse para vincular la energía disipada con la temperatura, siguiendo la Ecuación (1):

$$\rho \cdot C \cdot \dot{T} - \text{div}(k \cdot \nabla T) = d_i + s_{\text{the}} + s_{\text{ic}} + r_e \quad (1)$$

donde T es la temperatura, ρ es la densidad de masa, C es la capacidad calorífica y k es el coeficiente de conducción de calor. Se consideran constantes e independientes los valores de densidad, capacidad calorífica y coeficiente de conducción del material. En el lado izquierdo de la ecuación, el primer término es la tasa de almacenamiento de calor debido al cambio de temperatura; el segundo es la pérdida de calor por conducción. El lado derecho de la ecuación representa las fuentes de calor: d_i , s_{the} , s_{ic} y r_e son la fuente de disipación intrínseca, la fuente termoelástica, la fuente de calor inducida por el acoplamiento entre variables internas (debido a cambios en la microestructura) y por la temperatura, y el suministro de calor externo, respectivamente. Sin embargo, las fuentes termoelásticas y de acoplamiento interno pueden despreciarse bajo carga uniaxial uniforme. El calor externo también puede eliminarse utilizando una probeta de referencia colocada cerca para realizar un seguimiento de

cualquier cambio de temperatura ambiente y restarlo. Por lo tanto, con estas simplificaciones, la temperatura aumentará hasta un cierto valor donde el almacenamiento de calor y la pérdida de calor alcanzan un equilibrio con la disipación de energía intrínseca, si esta última permanece sin cambios.

El proceso de ensayo de una probeta involucra tres fases distintas que conducen a la fractura final:

- Etapa 1: La temperatura aumenta desde la temperatura ambiente.
- Etapa 2: La temperatura permanece estable durante esta fase, que habitualmente es la etapa más larga. Esto indica que la disipación de energía intrínseca permanece constante en esta etapa, lo que significa una tasa estable de acumulación de daños durante esta fase.
- Etapa 3: Se experimenta un fuerte aumento de temperatura justo antes de la rotura final.

Diferentes tensiones de carga aplicadas resultan en diferentes temperaturas estables en la etapa 2, permitiendo una relación entre la temperatura estable y la tensión aplicada. Cada uno de estos valores de temperatura pueden graficarse en función de la carga (Figura 5), y dos regresiones lineales definen esta relación. El punto de intersección de estas dos líneas permite estimar el límite de fatiga. En este trabajo, se aplica la técnica basada en R^2 para localizar esta intersección. Esta técnica implica realizar todas las combinaciones posibles con los datos obtenidos para obtener dos líneas que se crucen a través de una regresión lineal. Se calcula el R^2 de cada combinación, y se selecciona aquella con los valores de R^2 más altos para la estimación del límite de fatiga. En este proceso, ya que se sustrae la temperatura ambiente, se trabaja con el incremento de temperatura estable ΔT .

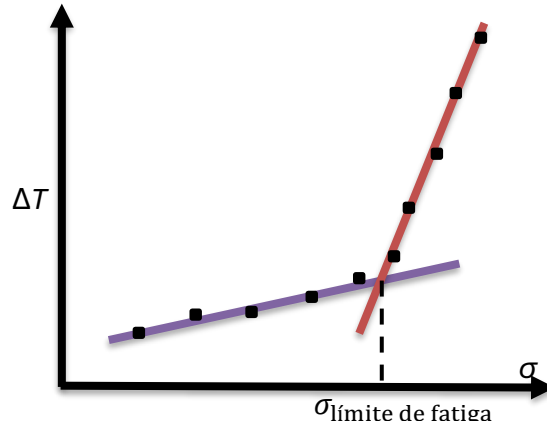


Figura 5: Estimación del límite de fatiga a partir de los cambios de temperatura en la etapa 2 para distintas cargas de ensayo.

A partir de esta relación, el ΔT puede definirse como una función de la tensión aplicada a través de funciones lineales por partes (Ecuación 2):

$$\Delta T = f(\sigma) = \begin{cases} m_1 \cdot \sigma + b_1 & (\sigma < \sigma_{\text{fatigue limit}}) \\ m_2 \cdot \sigma + b_2 & (\sigma \geq \sigma_{\text{fatigue limit}}) \end{cases} \quad (2)$$

donde m_1 , m_2 , b_1 y b_2 son cuatro constantes determinadas por la regresión lineal de los datos térmicos.

Para estimar la curva $S-N$, se considera que la energía total disipada es constante e independiente de la carga aplicada. Esta energía puede ser estimada directamente proporcional al área bajo la curva $\Delta T-N$. Como la etapa 2 es predominante en la prueba, el cálculo del área puede simplificarse como el producto de la temperatura estabilizada en la etapa 2 multiplicada por el número de ciclos antes de la rotura N_f (Ecuación 3):

$$\Delta T \cdot N_f = \text{constant} = \Phi \quad (3)$$

Montesano llegó a una conclusión similar para laminados de CFRP, pero obtuvo una mejor estimación con una ligera modificación [21]. Los datos termográficos en CFRP no mostraron una relación lineal entre ΔT y N_f , sino con el ΔT y el $\log(N_f)$. El modelo propuesto por este autor es el que muestra la Ecuación 4:

$$\Delta T \cdot \log(N_f) = \text{constant} = \Phi \quad (4)$$

Finalmente, Huang utilizó un parámetro de daño para correlacionar la degradación de las propiedades mecánicas del laminado con la temperatura (Ecuación 5) [18]. La degradación normalizada de la rigidez $k(N)$ se asocia con el aumento de temperatura estable de la siguiente manera:

$$k(N) = 1 - p \cdot \Delta T \cdot N^{1/q} \quad (q \geq 1) \quad (5)$$

donde p y q son constantes calibradas empíricamente. Reorganizando la Ecuación 5, y estimando que la degradación en el último ciclo es constante e independiente de la carga aplicada, se llega a la Ecuación 6:

$$\Delta T \cdot N_f^{1/q} = \frac{1 - k(N_f)}{p} = \text{constant} = \Phi \quad (6)$$

Esta ecuación tiene una forma similar a las de Risitano (Ecuación 3) y Montesano (Ecuación 4), y a través de la relación entre ΔT y σ en la Ecuación 2 es posible estimar las curvas S-N utilizando esta metodología.

4. Resultados

4.1. Pruebas estáticas

Los resultados de las pruebas estáticas muestran un comportamiento elástico lineal del material hasta rotura (Figura 6). Se ensayaron tres probetas sin defectos (A) y tres con defectos (B). La carga de tracción última (UTS) obtenida fue de 68.1 ± 0.1 kN para las probetas sin defectos y 57.2 ± 2 kN para las probetas con defectos, lo que representa una reducción del 16% en la resistencia debido a la presencia de defectos. En términos de tensión última, los valores fueron 1,135 MPa para los laminados sin defectos y 953.3 MPa para los laminados con defectos.

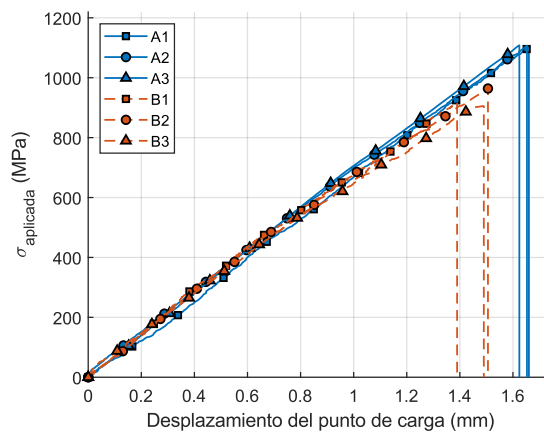


Figura 6: Carga vs. desplazamiento de los ensayos estáticos.

En ambas geometrías, se observó delaminación a lo largo de la probeta. Sin embargo, en los laminados con defectos, la rotura de las capas se distribuyó a lo largo del laminado, mientras que en las probetas sin defectos la fractura se concentró en los extremos. Esto se debe a que los defectos actúan como concentradores de tensión. Además, en las probetas con defectos, la rotura final presentó un patrón escalonado debido a la ondulación en diferentes alturas, mientras que en los laminados sin defectos la fractura se localizó en los extremos donde se fijan las mordazas.

4.2. Pruebas de fatiga: Estimación del límite de fatiga usando curvas S-N

En este caso, se realizaron pruebas de fatiga para obtener las curvas S-N de probetas con y sin defectos (Figura 7). Se ensayaron cinco probetas sin defectos y seis con defectos. El límite de fatiga se definió como la tensión a la que el laminado soporta 2,000,000 de ciclos sin alcanzar la rotura.

- Para las probetas sin defectos, el límite de fatiga es de 742.1 ± 32.2 MPa, correspondiente a una carga de 44.5 ± 1.9 kN, que es el 65% del UTS.
- Para los laminados con defectos, el límite de fatiga es de 457.2 ± 85.9 MPa, correspondiente a una carga de 27.4 ± 5.2 kN, que es el 48% del UTS.

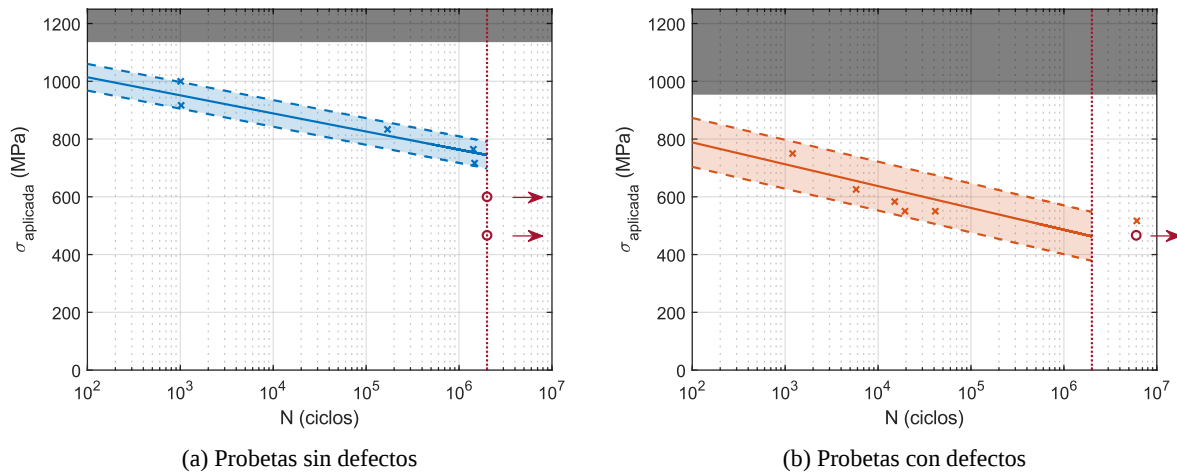


Figura 7: Curvas S-N para probetas con y sin defectos.

Los resultados mostraron que la presencia de defectos redujo el límite de fatiga en casi 40% en comparación con las probetas sin defectos. Además, la dispersión de los resultados en las probetas con defectos fue casi tres veces mayor. Durante los ensayos, se observaron grietas y delaminaciones cerca de las áreas de ondulación, que actuaron como concentradores de tensión. Al igual que en las pruebas estáticas, las probetas sin defectos presentaron delaminación a lo largo del laminado y fractura cerca de los extremos, mientras que las probetas con defectos mostraron una fractura escalonada debido a la distribución de las ondulaciones fuera del plano.

4.3. Pruebas de fatiga: Estimación del límite de fatiga usando termografía

En el tercer punto, se realizaron ensayos con termografía en dos probetas sin defectos y dos con defectos. Las pruebas de fatiga se llevaron a cabo en bloques de 7,000 ciclos, aumentando la carga entre bloques y permitiendo que la probeta se enfriara entre los diferentes niveles de carga. Se observó que el aumento de temperatura (ΔT) se estabilizó después de 3,500 ciclos (Figura 8). Para cargas bajas, el ΔT fue mayor en las probetas con defectos debido a la concentración de tensión en las ondulaciones.

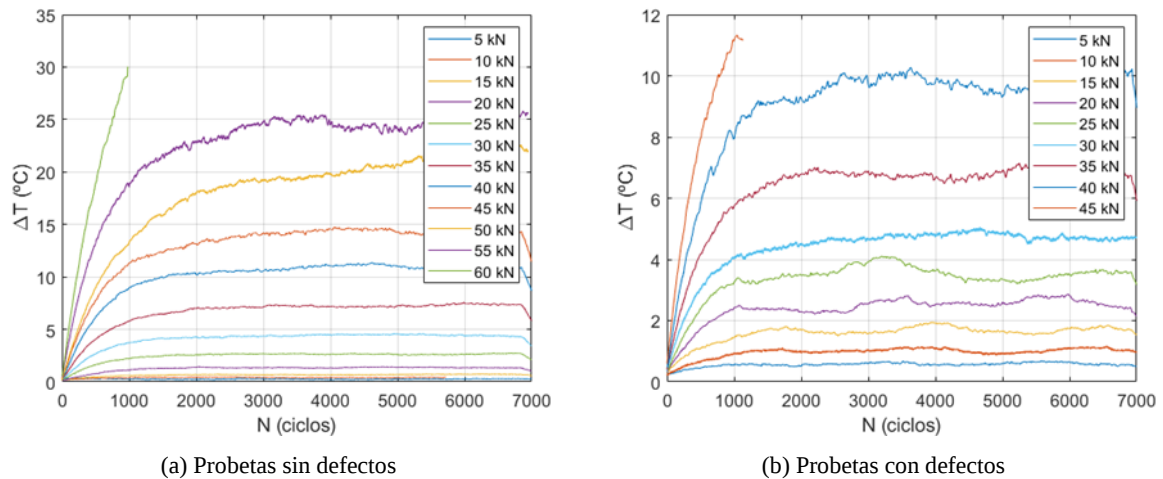


Figura 8: Evolución de ΔT en función del número de ciclos.

Al graficar ΔT en la región estabilizada frente a la carga aplicada, se estimó el límite de fatiga como el punto de intersección de las dos regresiones siguiendo la metodología del R^2 explicada anteriormente (Figura 9). Los resultados obtenidos fueron:

- Límite de fatiga estimado en laminados sin defectos: 728.2 MPa.
- Límite de fatiga estimado en laminados con defectos: 400.3 MPa.

La comparación con los valores obtenidos mediante las curvas S-N mostró un error del 1.9% para las probetas sin defectos y del 12.5% para las probetas con defectos.

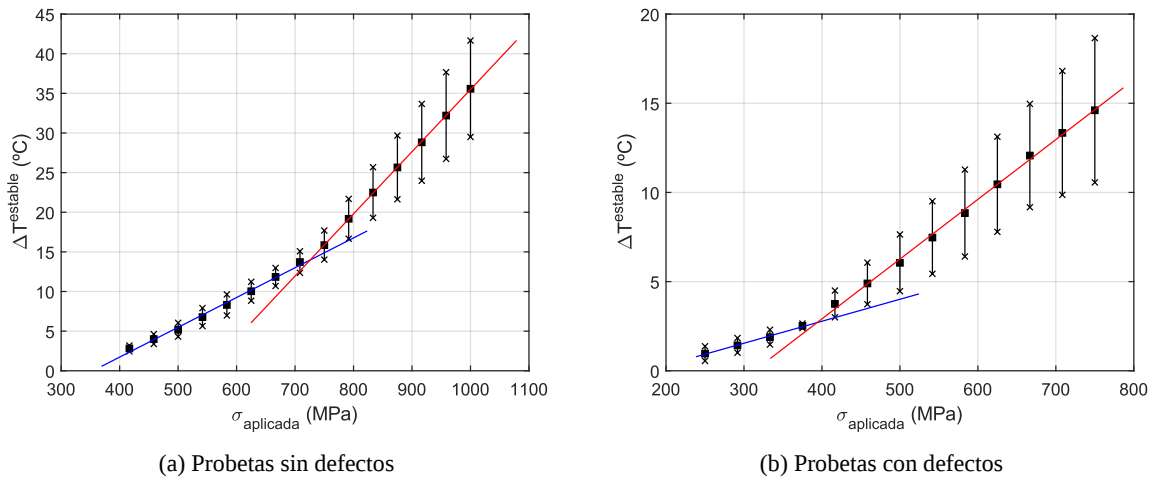


Figura 9: Relación entre ΔT y la carga aplicada para la estimación del límite de fatiga.

4.4. Pruebas de fatiga: Estimación de curvas S-N usando termografía

Finalmente, se calibraron los parámetros de la Ecuación 2 para probetas con y sin defectos. A partir de los datos de las pruebas de fatiga, se calcularon las constantes de las Ecuaciones 3 (Risitano), 4 (Montesano) y 6 (Huang) utilizando los datos de las pruebas de fatiga (Figura 10).

Los resultados mostraron que el método de Risitano fue el menos preciso, mientras que el método logarítmico de Montesano presentó un mejor ajuste. Esto confirma lo propuesto por Montesano en su artículo aplicando estas metodologías en CFRP y descarta la opción de usar la metodología de Risitano directamente en este material.

Los modelos de Huang y Montesano mostraron tendencias similares, pero el modelo de Huang se ajustó mejor en la región de bajos ciclos, aunque no es determinante ya que esta región está dominada por la rotura estática. Por otra parte, el modelo de Montesano requiere menos parámetros para su calibración con respecto al de Huang. Las curvas S-N obtenidas mediante termografía mostraron un buen ajuste para probetas con y sin defectos, demostrando la viabilidad de esta metodología.

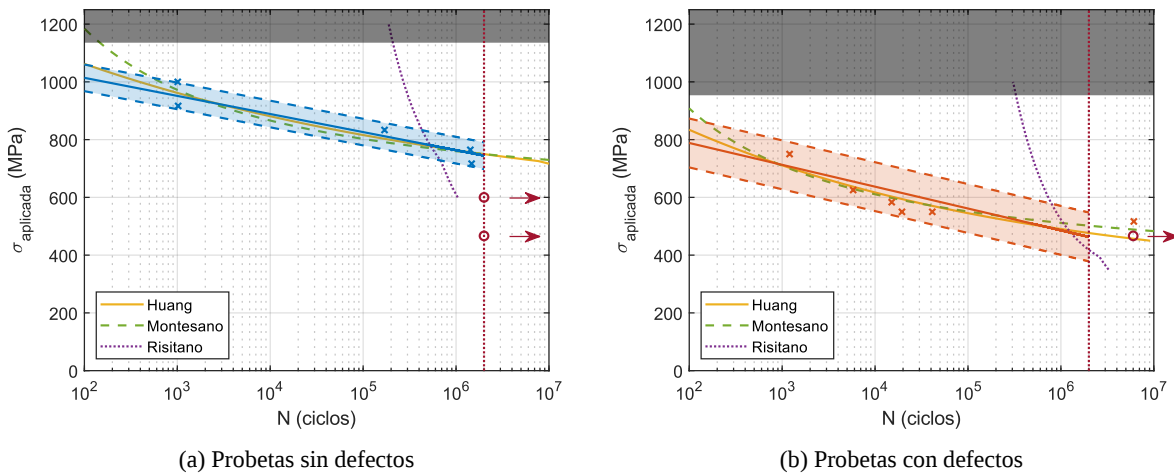


Figura 10: Curvas S-N obtenidas con métodos termográficos.

4.5. Pruebas de fatiga: Localización de defectos

Las imágenes térmicas demostraron ser una herramienta eficaz para localizar defectos en los laminados (Figura 11). Se observó que la temperatura en las áreas afectadas por los defectos era aproximadamente 2°C más alta que la temperatura promedio entre los defectos. Sin embargo, este aumento de temperatura puede pasar desapercibido a cargas bajas y la detección de defectos es más difícil en las zonas cercanas a los puntos de aplicación de la carga.

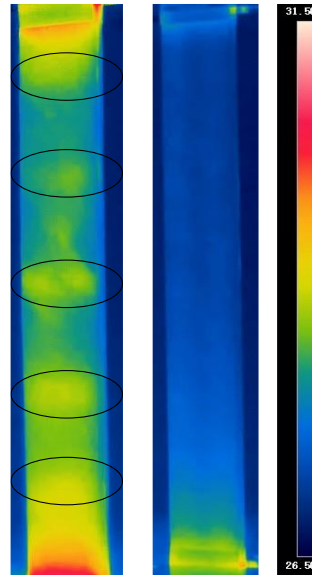


Figura 11: Identificación de defectos mediante imágenes térmicas (izquierda: con defectos, derecha: sin defectos).

5. Conclusiones

En este estudio se investigó el uso de la termografía infrarroja para predecir el límite de fatiga de materiales compuestos CFRP con múltiples defectos de ondulación. Las conclusiones principales son las siguientes:

- Se confirmó que los defectos de ondulación generados durante la fabricación de laminados CFRP reducen significativamente la resistencia a la tracción del material (hasta un 16%) y disminuyen considerablemente su vida a fatiga (hasta un 40%). Esto resalta la necesidad de detectar y caracterizar este tipo de defectos.
- Los métodos termográficos pueden ser utilizados para establecer metodologías que permitan predecir el límite de fatiga de laminados CFRP, tanto en presencia de defectos como sin ellos. Esto reduce significativamente el coste y el tiempo requerido en las pruebas tradicionales para obtener las curvas *S-N* del material. En este trabajo, los errores en este método no excedieron el 12.5% en el caso más desfavorable, lo cual se considera aceptable.
- Las metodologías desarrolladas hasta la fecha permiten una caracterización rápida y sencilla de la fatiga de los laminados, proporcionando una indicación de la curva *S-N*. Esto reduce significativamente el tiempo de ensayos requerido para la caracterización de la curva *S-N*. Estos métodos ofrecen flexibilidad y precisión. También permiten caracterizar el comportamiento a fatiga de los laminados con defectos.
- La aplicación de la termografía infrarroja a un componente en servicio permite la localización de un defecto local. El defecto debe estar ubicado lejos del área de aplicación de la carga, ya que esta área se verá afectada por un mayor aumento de temperatura, lo que puede dificultar la correcta localización de la ondulación.

El estudio ha demostrado que los defectos de ondulación disminuyen la resistencia del material y su vida a fatiga y que la termografía puede ser una herramienta efectiva para detectar estos defectos, predecir el límite de fatiga y caracterizar el comportamiento a fatiga de los laminados CFRP, reduciendo los tiempos y costes de las pruebas tradicionales.

6. Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2023-151610OB-C22, financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ y “FEDER Una manera de hacer Europa”. Ayuda PRE2018-086277 financiada por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y por “FSE Invierte en tu futuro”.

7. Referencias

- [1] K. Potter, B. Khan, M. Wisnom, T. Bell, and J. Stevens, “Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **39** (9), 1343–1354 (2008)

- [2] P. Kulkarni, K. D. Mali, and S. Singh, "An overview of the formation of fibre waviness and its effect on the mechanical performance of fibre reinforced polymer composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **137**, 106013 (2020)
- [3] R. K. Pandey and C. T. Sun, "Mechanisms of wrinkle formation during the processing of composite laminates," *Composites Science and Technology*, **59** (3), 405–417 (1999)
- [4] K. D. Potter, M. Campbell, C. Langer, and M. R. Wisnom, "The generation of geometrical deformations due to tool/part interaction in the manufacture of composite components," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **36** (2), 301–308 (2005)
- [5] P. Hallander, M. Akermo, C. Mattei, M. Petersson, and T. Nyman, "An experimental study of mechanisms behind wrinkle development during forming of composite laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **50**, 54–64 (2013)
- [6] M. H. Hassan, A. R. Othman, and S. Kamaruddin, "A review on the manufacturing defects of complex-shaped laminate in aircraft composite structures," *Int J Adv Manuf Technol*, **91** (9), 4081–4094 (2017)
- [7] M. W. Lerman, D. S. Cairns, and J. W. Nelson, "Investigation of the Effect of In-Plane Fiber Waviness in Composite Materials through Multiple Scales of Testing and Finite Element Modeling," Sandia National Lab. (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); Sandia National Lab. (SNL-CA), Livermore, CA (United States), SAND-2017-0118 (2015)
- [8] A. Beakou, M. Cano, J.-B. Le Cam, and V. Verney, "Modelling slit tape buckling during automated prepreg manufacturing: A local approach," *Composite Structures*, **93** (10), 2628–2635 (2011)
- [9] J. P.-H. Belnoue *et al.*, "Understanding and predicting defect formation in automated fibre placement prepreg laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **102**, 196–206 (2017)
- [10] K. Potter, "Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture," *ICCM International Conferences on Composite Materials* (2009)
- [11] S. Mukhopadhyay, O. J. Nixon-Pearson, and S. R. Hallett, "An experimental and numerical study on fatigue damage development in laminates containing embedded wrinkle defects," *International Journal of Fatigue*, **107**, 1–12 (2018)
- [12] S. Mukhopadhyay, M. I. Jones, and S. R. Hallett, "Tensile failure of laminates containing an embedded wrinkle; numerical and experimental study," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **77**, 219–228 (2015)
- [13] M. May and S. R. Hallett, "A combined model for initiation and propagation of damage under fatigue loading for cohesive interface elements," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **41** (12), 1787–1796 (2010)
- [14] Y. Nikishkov, A. Makeev, and G. Seon, "Progressive fatigue damage simulation method for composites," *International Journal of Fatigue*, **48**, 266–279 (2013)
- [15] J. V. Calvo, A. R. Quiñonero-Moya, N. Feito, M. H. Miguélez, and E. Giner, "Influence of distributed out-of-plane waviness defects on the mechanical behavior of CFRP laminates," *Composite Structures*, **323**, 117498 (2023)
- [16] N. Feito, J. V. Calvo, R. Belda, and E. Giner, "An Experimental and Numerical Investigation to Characterize an Aerospace Composite Material with Open-Hole Using Non-Destructive Techniques," *Sensors*, **20** (15), 4148 (2020)
- [17] L. Toubal, M. Karama, and B. Lorrain, "Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading," *International Journal of Fatigue*, **28** (12), 1867–1872 (2006)
- [18] J. Huang, M. L. Pastor, C. Garnier, and X. J. Gong, "A new model for fatigue life prediction based on infrared thermography and degradation process for CFRP composite laminates," *International Journal of Fatigue*, **120**, 87–95 (2019)
- [19] G. La Rosa and A. Risitano, "Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components," *International Journal of Fatigue*, **22** (1), 65–73 (2000)
- [20] G. Fargione, A. Geraci, G. La Rosa, and A. Risitano, "Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method," *International Journal of Fatigue*, **24** (1), 11–19 (2002)
- [21] J. Montesano, Z. Fawaz, and H. Bougherara, "Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite," *Composite Structures*, **97**, 76–83 (2013)