

ANÁLISIS DE FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FATIGA EN MATERIAL TERMOPLÁSTICO REFORZADO: APLICACIÓN DE TERMOGRÁFICA

M. Canales¹, C. Gómez¹, M. Laspalas¹, A. Cajal¹, J.L. Núñez¹

¹Laboratorio de Materiales y Seguridad Funcional del Área de Investigación, Desarrollo y Servicios Tecnológicos, Instituto Tecnológico de Aragón, C/ María de Luna 8, 50018 Zaragoza, España
E-mail: mcanales@ita.es

RESUMEN

La detección del límite de fatiga mediante técnicas no destructivas como la Termografía por Infrarrojo ha sido estudiada desde décadas en materiales metálicos con resultados satisfactorios. Mientras que en el caso de material metálico, la correlación entre los resultados de límite de fatiga obtenido a partir de técnicas tradicionales (curvas S-N) y los resultados obtenidos a partir de termografía ha sido estudiada exhaustivamente, en el caso de material termoplástico no, debido a propiedades inherentes a estos materiales como la viscoelasticidad. En este sentido, el presente estudio analiza la influencia de diversos factores en el valor del límite de fatiga sobre probetas planas de un termoplástico: orientación de fibra, frecuencia de ensayo, geometría y grado de concentradores de tensiones. Estos factores no sólo afectarán a los gradientes de tensión sino también a las temperaturas generadas. En cualquiera de los cuatro parámetros planteados, además de analizar su influencia en el valor del límite de fatiga obtenido, también se analizó la variación de los mapas térmicos superficiales observados en cada caso a partir de la termografía.

ABSTRACT

The fatigue limit detection by means of non-destructive techniques like Infrared Thermography has been studied in metallic materials since decades obtaining good results. While the correlation between results obtained from traditional techniques (curves S-N) and the results from thermography in the metallic material case has been carefully analysed, the thermoplastic material no due to the inherent viscoelastic properties of these materials. This study analyses the influence on the fatigue limit of several factors in sheet specimens: fiber orientation, test frequency, geometry and the level of stress concentrators. These factors not only will influence on the stress gradients, but also in the reached temperatures. In the any planned factors, the variation in the surface thermal maps observed from thermography was analysed beside their influence on the fatigue limit obtained.

PALABRAS CLAVE: Termografía, Termoplástico, Fatiga.

1. INTRODUCCIÓN

La termografía es una técnica de medida de no contacto que permite determinar rangos de temperatura o mapas térmicos en zonas superficiales como consecuencia de la aplicación de incrementos de tensiones, según distintas formas de mecanismos de fractura. Desde 1921, se han aplicado técnicas térmicas tales como termopares colocados en la superficie del material para detectar cambios en la temperatura. Durante las últimas décadas del siglo XX y al inicio del siglo XXI, varios autores han utilizado las técnicas termográficas para predecir la vida a fatiga (uniaxial) por medio de diferentes metodologías. Luong [1] en 1998 propuso la técnica de termografía por infrarrojo para evaluar el límite de fatiga en metales y Risitano [2] en el 2000 estableció una metodología para la determinación rápida del límite de fatiga en materiales y componentes industriales.

En trabajos anteriores se ha aplicado esta técnica en material metálico, concretamente en un acero estructural S355 J2G3 [3] y en material termoplástico, un PET reforzado con fibra de vidrio corta al 35% en peso [4]. Si bien el límite de fatiga en aceros se determina tradicionalmente a partir de la asíntota en las curvas S-N, en el caso de los plásticos esta definición no es tan clara, ya que no se observa dicha tendencia [5]. Curvas de caracterización a fatiga en material plástico de características similares a los materiales objeto de este estudio presentan tendencias diferenciadas según el tipo de material y modo de aplicación de la carga, pudiendo observarse desde tendencias lineales hasta curvas sin estabilización en ciclos del orden 10^6 (Tracción) ó 10^7 (Flexión). Por lo tanto, el parámetro que se va a analizar en este trabajo es la tensión a partir de la cual se produce daño en el material debido al proceso de fatiga en tracción y que, de ahora en adelante se denominará, límite de fatiga o resistencia a fatiga. Este fenómeno se

manifiesta por un aumento drástico de la temperatura superficial del material cuando éste es sometido a una amplitud de tensión próxima al denominado límite de fatiga [1,2].

Los resultados procedentes del estudio en el material termoplástico anteriormente mencionado condujeron a una serie de conclusiones. En valores de amplitud de tensión (o tensión máxima) próximas al límite de fatiga del material se produce un incremento de temperatura brusco respecto a niveles inferiores. Este fenómeno informa de la próxima pérdida de rigidez de la probeta detectada como la pérdida de amplitud de desplazamiento en un ensayo cíclico de amplitud de carga constante, criterio que define el fallo por fatiga controlando en carga. El calentamiento en la superficie de la probeta está relacionado con los ciclos de histéresis resultantes de la sollicitación cíclica así como de la frecuencia de ensayo [6,7,8].

En el presente estudio se van a analizar una serie de factores que determinan el comportamiento a fatiga y viscoelástico del material PET reforzado con fibra de vidrio corta al 35% en peso. Los factores son la orientación de fibra según la dirección de aplicación de la carga, la frecuencia de ensayo, la geometría de probeta (aumento de la sección transversal) que afectará a la disipación de calor generado durante el ciclado y, por último, la presencia de concentradores de tensiones (agujero con diferentes diámetros en la zona central de la probeta) que afectará a los gradientes de tensión y perfiles de temperatura generados. En cualquiera de los cuatro parámetros planteados, no sólo se analiza su influencia en el valor del límite de fatiga considerado, sino también en la variación de los mapas térmicos superficiales observados en cada caso a partir de la termografía.

Inicialmente se describirán el material y las condiciones de ensayo utilizados en cada uno de los factores de estudio. Posteriormente, se analizarán los resultados obtenidos con el objetivo de establecer relaciones de dichos factores con el límite de fatiga del material termoplástico planteado.

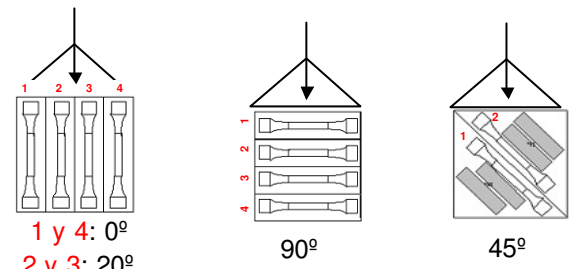
2. MATERIAL DE ENSAYO

Se va a analizar un material base, el polietileno tereftalato (PET) reforzado con fibra corta de vidrio en un 35% en peso, procedente del proveedor Arnite AV 2 370/B natural. Las probetas se mecanizaron a partir de placas de 80x80x2 mm inyectadas según norma UNE-EN ISO 527 (ver figura 1).

Los factores a analizar son los siguientes (ver tabla 1 y 2):

- orientación de fibra (0°, 20°, 45° y 90°),
- frecuencia de ensayo (0.5, 5 y 20 Hz),
- geometría de probeta, G y 2G,
- presencia de concentrador de tensión (diámetro de agujero en la zona central: 1, 2, 3 y 4 mm).

GEOMETRÍA 1: G



GEOMETRÍA 2: 2G

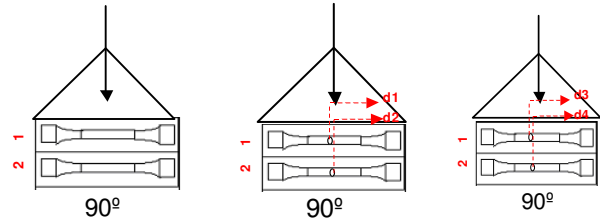


Figura 1. Posición de las probetas mecanizadas a partir de placas de 80x80x2 mm. Orientación respecto del punto de inyección.

Tabla 1. Ensayos según geometría 1: G.

Probeta	Orientación de fibra	Secuencia de amplitud de tensión (MPa)	f (Hz)
71-1	0°	De 16.90 a 48.00	20
73-1	90°	De 8.47 a 33.89	20
71-2	20°	De 12.70 a 44.57	20
74-1	45°	De 12.00 a 40.11	20
73-2	90°	De 8.47 a 33.89	0.5
74-2	45°	De 12.00 a 40.11	0.5
71-4	0°	De 16.90 a 51.00	0.5
71-3	20°	De 12.70 a 44.57	0.5
73-3	90°	De 8.47 a 40.11	5
72-1	0°	De 16.90 a 50.00	5
72-2	20°	De 12.70 a 46.00	5
75-1	45°	De 12.00 a 40.11	5

Tabla 2. Ensayos según geometría 2: 2G. φ es el diámetro del agujero de la zona central.

Probeta	Orientación de fibra	Secuencia de amplitud de tensión (MPa)	φ (mm)	f (Hz)
76-1	90°	De 16.54 a 66.15	0	20
77-1	90°	De 16.54 a 66.15	0	20
76-2	90°	De 16.54 a 66.15	0	20
78-1	90°	De 16.54 a 66.15	1	20
78-2	90°	De 16.54 a 49.61	2	20
79-2	90°	De 16.54 a 49.61	3	20
79-1	90°	De 16.54 a 41.34	4	20
77-2	90°	De 16.54 a 78.30	0	5

3. CONDICIONES DE ENSAYO

Para determinar el límite de fatiga por termografía se realiza un ensayo cíclico sinusoidal de tensión constante (nivel) a diferentes niveles de tensión, fijado un número de ciclos (5000) por cada nivel, aplicado de forma secuencial de menor a mayor en una sola probeta [1,2,3,4]. El ensayo se monitoriza mediante una cámara termográfica que registra la evolución de las temperaturas alcanzadas por la probeta. Transcurridos los 5000 ciclos, se para el ensayo y se refrigera la probeta antes de aplicar el segundo nivel mediante aire a presión. El límite de fatiga se obtiene de la representación de los incrementos de temperatura (ΔT), obtenidos una vez alcanzado el régimen estacionario, o la tasa de incremento de temperatura por ciclo ($\Delta T/\Delta N$) observados para cada nivel de tensión respecto a dichos niveles de tensión [1,2,3,4].

El ensayo de fatiga axial bajo niveles de amplitud de carga constante y ratio de 0.1 [9,10] (definiéndose el este ratio como la relación entre la carga mínima y la amplitud de carga) se realizó sobre una única probeta por tipo de material, a excepción del caso de orientación de fibra 90° y 20 Hz sin concentrador de tensión, en el que se observó una buena repetibilidad, 48.88 MPa de límite de fatiga promedio con una desviación estándar < 2% para 3 repeticiones. En este tipo de ensayos no es necesario una probeta por nivel de ensayo sino que, la misma probeta se somete a los distintos niveles de tensión de forma secuencial en orden ascendente y a la misma frecuencia de ensayo.

La selección de dichos niveles de tensión (ver tabla 1 y 2) se realizó según los resultados de amplitud de carga y/o tensión seleccionados en ensayos de fatiga S-N realizados en probetas de igual características [4].

Los ensayos se realizaron sobre una máquina universal de ensayos de alta frecuencia, INSTRON 8872 de 25 kN. La captura de imágenes se realizó con una cámara termográfica FLIR Systems modelo P660 cuyo control se llevó a cabo mediante el software de control RESEARCHER con el objetivo de monitorizar el ensayo (ver figura 2). Los valores de los parámetros que hay que fijar en la cámara para visualizar la probeta durante el ensayo, como la emisividad del objeto, ϵ , que en nuestro caso, por ser material plástico mate no requiere ninguna imprimación para maximizar dicho valor (ideal = 1.0), la temperatura reflejada que coincide con la temperatura atmosférica del medio circundante, la humedad relativa y la distancia que separa el objetivo de la cámara a la probeta, se anotaron para cada uno de los ensayos realizados. Mientras que la distancia y la emisividad se mantuvieron constantes, los valores de temperatura y humedad relativa oscilaron entre $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y $45 \pm 5\%$ HR respectivamente dependiendo del momento del ensayo.

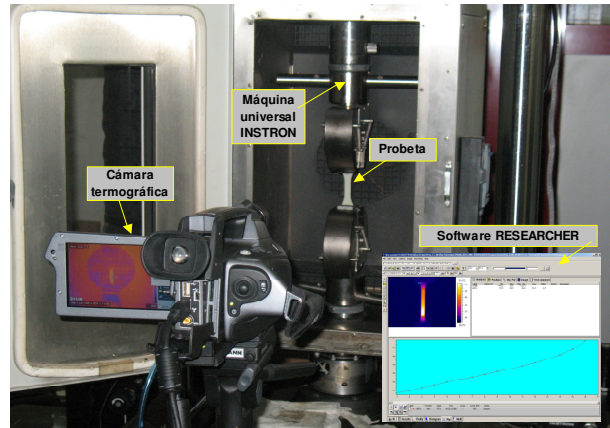


Figura 2. Montaje de ensayo y monitorización de temperatura con cámara P660 Flir Systems.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez calculados los incrementos de temperatura para cada uno de los niveles de amplitud de tensión (MPa), la metodología para determinar el límite de fatiga del material consiste en representar la tasa de incremento de temperatura respecto de la variación de ciclos, $\Delta T/\Delta N$ ($^\circ\text{C}/\text{ciclos}$) frente a los niveles de tensión cíclica ensayados. También se podría calcular a partir de la variación de temperatura, ΔT ($^\circ\text{C}$) [1,3,4]. La intersección entre ambas pendientes, definidas por el cambio drástico observado en el gráfico determinará el valor del límite de fatiga (MPa). La figura 3 muestra un ejemplo del cálculo del límite de fatiga (43.25 MPa) en una probeta ensayada a 20 Hz cuya orientación de fibra es de 0° sin concentrador de tensiones.

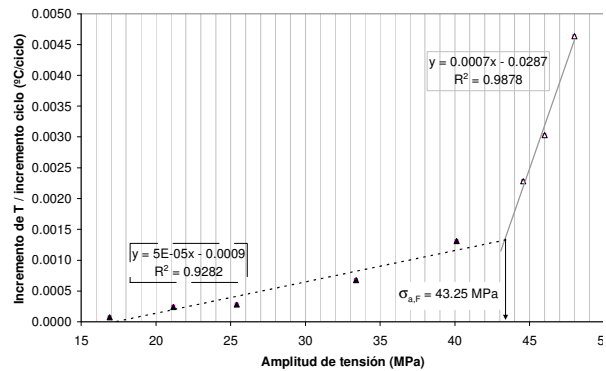


Figura 3. Cálculo del límite de fatiga según 0° de orientación de fibra a 20 Hz sin concentrador de tensiones.

4.1. Influencia de la orientación de fibra y frecuencia de ensayo

Las probetas de geometría 1 (sin concentradores de tensiones) se han mecanizado en distinta dirección respecto al punto de inyección de la placa para introducir el efecto de la orientación de las fibras [10-13] (0°, 20°, 45° y 90°). Para cada orientación se ha analizado el factor de la frecuencia (0.5, 5 y 20 Hz),

obteniéndose la representación gráfica siguiente (ver figura 4):

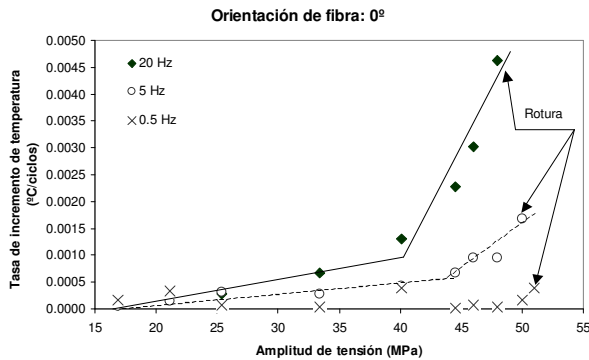


Figura 4. Análisis de la influencia de la orientación de fibra sin concentradores de tensiones.

Como se puede observar en la figura 4, el primer aspecto relevante es el hecho de la no detección del límite de fatiga en el caso de la mínima frecuencia de ensayo considerada (0.5 Hz) ya que no se observa el salto cualitativo en el incremento de temperatura que permite definir este valor. Esto puede ser debido al hecho de que 5000 ciclos no sean suficientes para detectar incrementos de temperatura importantes en el rango de amplitud de tensión considerado. La influencia de la frecuencia podría asemejarse a la influencia de la temperatura en este tipo de material viscoelástico, ya que los valores de la resistencia a fatiga disminuyen igualmente cuando la temperatura del medio que les rodea aumenta [10, 11, 13, 14].

Independientemente de la frecuencia de ensayo, las probetas que mayor límite de fatiga presentan son las que tienen las fibras orientadas longitudinalmente (~ 43 MPa) y las de menor valor, las probetas orientadas transversalmente (~ 25 MPa), resultados acordes con los obtenidos según técnicas tradicionales y literatura consultada [10,11,12].

4.2. Influencia de la geometría, G

Para determinar la influencia de la geometría en la detección del límite de fatiga por termografía, se ensayan probetas de mayor sección (2G) a partir de placas de 2 mm inyectadas con el mismo material según orientación de fibra transversal (90°). La selección de esta orientación se debe a las limitaciones de la propia geometría de la placa.

En la figura 5 se representa el límite de fatiga obtenido en las probetas de orientación de fibra transversal para las dos geometrías de estudio. Según lo observado, el límite de fatiga aumenta en un 48 % al aumentar la sección de las probetas.

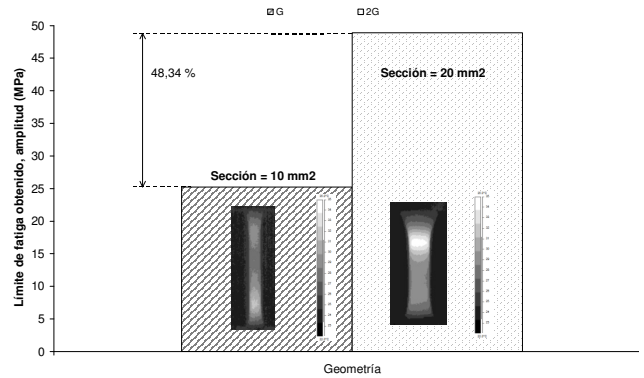


Figura 5. Influencia de la geometría en el límite de fatiga obtenido a 5 Hz según 90° de orientación..

Al igual que en el caso anterior, en esta geometría también se estudia el efecto de la frecuencia de ensayo (ver figura 6), a igual orientación de fibra (90°). Se observa cómo la variación de frecuencia de 5 a 20 Hz supone una variación en el límite de fatiga del orden del 7% de forma análoga a lo que se observaba en la probeta de geometría 1. La diferencia es que, mientras que en la geometría 1 dicha variación se traduce en un aumento del valor del límite al aumentar la frecuencia, en el caso de la geometría 2, se observa lo contrario pudiendo ser debido a la propia incertidumbre del ensayo.

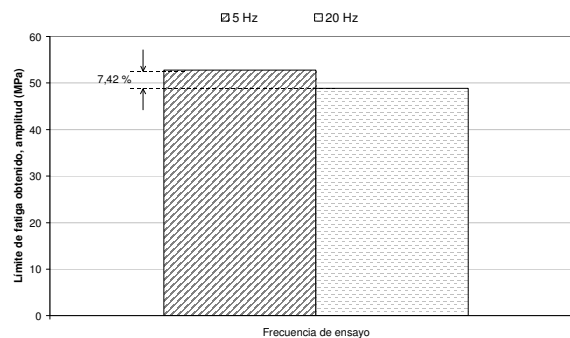
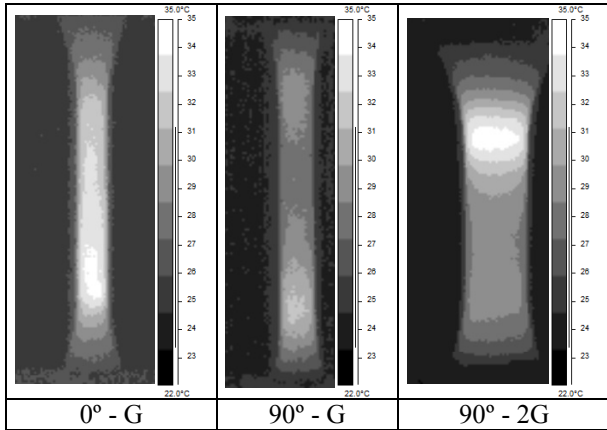


Figura 6. Influencia de la frecuencia en el límite de fatiga obtenido según geometría 2 y 90° de orientación.

Tanto en la figura 5 como en la tabla 3, se observa un cambio en el mapa de temperaturas de la probeta. En los dos casos (orientación transversal) la zona más caliente y por lo tanto, la zona de mayor daño se localiza cercana a uno de los extremos de la probeta, no en la zona central como en el caso de la orientación longitudinal. Esto puede ser debido a la distribución de las fibras debido al proceso de inyección de las placas. Sin embargo, la geometría influye en la distribución de temperaturas de la probeta; mientras que en el primer caso prácticamente toda la probeta se encuentra a la misma temperatura, cuando se duplica la sección se observa una zona considerablemente más caliente que en el resto de la superficie de probeta, localizada en uno de los extremos.

Tabla 3. Imagen termográfica según orientación de fibra (0° y 90°) y geometría de probeta (G y 2G) en la amplitud máxima de tensión ensayada.



A la vista de los resultados experimentales, la geometría de la probeta influye en la detección del límite de fatiga por técnicas termográficas. Hay que resaltar el hecho de que el diseño correspondiente a la geometría 2 no sigue las recomendaciones de la norma ISO 527 debido a las limitaciones de la propia placa de inyección a partir de la cual se extrajeron las probetas.

En términos generales, una mayor geometría de probeta en este material hace que la disipación interna del calor generado por el ciclado sea menor, por lo tanto, disminuye la capacidad de transferencia de calor y consecuentemente, el aumento significativo de temperatura bajo las mismas condiciones de carga y ciclos.

4.3. Influencia de concentradores de tensiones

Para analizar la influencia de la existencia de concentradores de tensión en el valor del límite de fatiga por termografía, se mecaniza una entalla consistente en un agujero de diámetro variable (entre 1 y 4 mm) situado en el centro de la zona calibrada de la probeta según geometría 2 (90°). Como se observa en la figura 8, el límite de fatiga prácticamente no se ve afectado cuando existe un defecto en la probeta, aunque se detecta una disminución drástica de los incrementos de temperatura observados en el momento en el que aparece la entalla.

La figura 9 presenta los mapas térmicos observados a lo largo de los ensayos en el nivel máximo de amplitud de tensión justo antes de la rotura. Se observa cómo la probeta alcanza menor temperatura conforme aumenta el diámetro del concentrador de tensión. En todos los casos, la zona de rotura de la probeta está localizada en la zona de entalla iniciándose la grieta a ambos lados de la misma en dirección transversal a la dirección de la aplicación de la carga [15]. Los incrementos de temperatura observados en los mapas térmicos decrecen conforme aumenta el tamaño de entalla, ya que favorece

la disipación de calor del material y no permite el calentamiento en la zona calibrada.

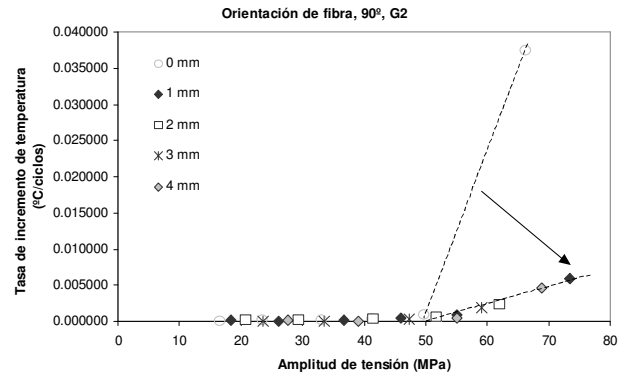


Figura 8. Influencia de la entalla en el límite de fatiga según 90° de orientación de fibra y geometría 2.

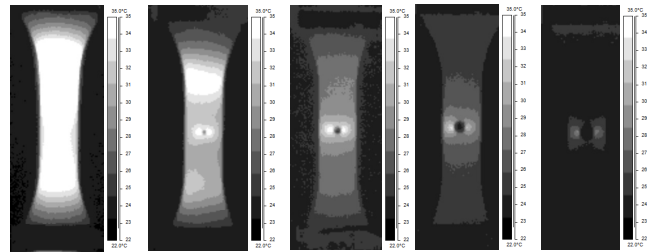


Figura 9. Influencia de la entalla en el mapa térmico observado según 90° de orientación de fibra y geometría 2.

5. CONCLUSIONES

Las principales influencias en el denominado límite de fatiga obtenido en el termoplástico PET reforzado con fibra de vidrio corta al 35% en peso son las siguientes: la orientación de fibra conduce a que, los mayores valores de límite de fatiga se obtienen en probetas con igual o similar orientación a la dirección de aplicación de la carga alternante [10-13], disminuyendo conforme aumenta el grado de orientación. En cuanto a la frecuencia, las variaciones son pequeñas si bien la tendencia observada es que, al aumentar este factor, disminuye la resistencia a fatiga.

La influencia de la geometría (fijada la orientación “90°” y la frecuencia “20 Hz”) al duplicar la sección de probeta está relacionada con las ecuaciones básicas de transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El término de conducción depende del gradiente térmico y de la conductividad térmica. Manteniendo constante el material y el espesor, según sea la distancia del punto inicial de calentamiento a la superficie de la probeta, la disipación del calor generado variará, provocando que el material mantenga sus propiedades mecánicas o bien se relaje (ablandamiento) disminuyendo su resistencia. Para geometrías de mayor sección, al aumentar la frecuencia de ensayo el límite de fatiga disminuye, aunque no en gran medida (~ 7 %) ya que el material no sufre tanto reblandecimiento al

disponer de mayor cantidad de material que minimiza la transferencia de calor.

La influencia de concentradores de tensiones se estudió en el caso de probetas de geometría 2, sobre las que se mecanizaron agujeros de diferente diámetro en la zona calibrada. El aumento progresivo de dicho diámetro provoca una disminución en los incrementos de temperatura observados, pero no en el valor del límite de fatiga.

Los trabajos futuros están encaminados hacia el estudio morfológico de las superficies de fractura, así como el estudio de la energía de ciclo asociada a los incrementos de temperatura observados.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se enmarca dentro del Programa Estratégico de Materiales que está desarrollado el Área de Investigación, Desarrollo y Servicios Tecnológicos del ITA, y ha sido financiada parcialmente por el MCyT, dentro del proyecto MULFATER - “*Aplicación de técnicas termográficas y estadísticas a la estimación de vida a fatiga de componentes sometidos a estados de carga multiaxial: enfoque inicio de grieta*” (DPI2007-66903-C02-02).

REFERENCIAS

- [1] Minh Phong Luong. *Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique*, Mechanics of Materials 28 (1998), 155-163.
- [2] G. La Rosa, A. Risitanno. *Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components*, International Journal of Fatigue 22 (2000), 65-73.
- [3] C. Gómez, M. Canales, S. Calvo, J.L. Núñez. *Detección de daño en acero estructural sometido a diferentes estados de carga mediante termografía por infrarrojos*. Congreso GEF 2008, Sigüenza.
- [4] M. Canales, C. Gómez, S. Calvo, M. Laspalas, J.L. Núñez. *Detección de daño en material plástico sometido a fatiga axial mediante termografía por infrarrojos*. Congreso Nacional de Materiales 2008, San Sebastián.
- [5] Nanying Jia, Val A. Kagan, “Effects of time and temperature conditions on the tensile – tensile fatigue behavior of short fiber reinforced polyamides”, AlliedSignal Inc., Morristown, New Jersey.
- [6] R. Steinberger, T.I. Valadas Leitão, E. Ladstätter, G. Pinter, W. Billinger, R.W. Lang. *Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing*. International Journal of Fatigue, 28 (2006): p. 1340-1347.

- [7] Alessandro Pegoretti, Theonis Riccò. *Fatigue crack propagation in polypropylene reinforced with short glass fibres*, University of Trento, Italy.
- [8] J. J. Horst, J. L. Spoormaker. *Fatigue fracture mechanism and fractography of short-glassfibre-reinforced polyamide 6*, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [9] Igor Palley, Nanying Jia, Val A. Kagan, “Plastics Part Design: low cycle fatigue strength of glass – fiber reinforced polyethylene terephthalate (PET)”, Honeywell plastics, Morristown, NJ 07962 – 1021, USA.
- [10] A. Bernasconi, P. Davoli, A. Basile, A. Filippi, “Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6”, International Journal of Fatigue 29, 2007. p. 199-208.
- [11] K. Noda, A. Takahara, T. Kajiyama “Fatigue failure mechanisms of short glass-fiber reinforced nylon 66 based on nonlinear dynamic viscoelastic measurement” Polymer 42 (2001) 5803 - 5811.
- [12] A. Zago, G. S. Springer “Constant Amplitude Fatigue of Short Glass and Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics” Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2001; 20; 564
- [13] M. Kawai, S. Yajima, A. Hachinohe, Y. Takano “Off-Axis Fatigue Behavior Unidirectional Carbon Fiber-Reinforced Composites at Room and High Temperatures ” Journal of Composite Materials, Vol. 35, No. 07/2001, 545-576.
- [14] A. Jayantha, A. Epaarachchi, P. A. Clausen “An empirical model for fatigue behavior prediction of glass fibre-reinforced plastic composites for various stress ratios and test frequencies ” Composites: Part A 34 (2003) 313- 326.
- [15] A. Zago, G. S. Springer “Fatigue Lives of Short Glass Fiber Reinforced Thermoplastics Parts” Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2001; 20; 606.