

DETERMINACIÓN DEL CRECIMIENTO DE FISURA MEDIANTE TÉCNICAS TERMOGRÁFICAS DE INFRARROJOS

I. Carrascal, R. Lacalle, J.A. Casado y J.A. Álvarez

Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Avenida de los Castros s/n 39005 Santander

Resumen. Buena parte de los ensayos relacionados con la Mecánica de la Fractura requieren del control continuo del tamaño de una grieta. Habitualmente este control se ha venido realizando por métodos basados en diferencias de potencial eléctrico o mediante correlaciones del tamaño de fisura con la flexibilidad de la probeta.

Basándose en el incremento de temperatura que experimenta el fondo de una fisura por acción de la concentración de tensiones, es posible, mediante el empleo de técnicas termográficas de infrarrojos, cuantificar el avance de una grieta. De esta forma, en el presente trabajo se ha caracterizado el comportamiento a fatiga de una poliamida, determinando la velocidad de crecimiento de fisura con la ayuda de instrumentos termográficos, contrastando los valores obtenidos siguiendo esta metodología con los resultantes de emplear las técnicas de medida convencionales.

Abstract. A large number of Fracture Mechanics tests require the continuous control of crack length. This control has usually been performed using methods based on electric potential differences or by means of correlations between crack length and the compliance of the specimen.

Bearing in mind that the crack tip undergoes a temperature rise due to stress concentration, it is possible, using infrared thermographic techniques, to quantify the crack growth. Thus, in this paper, the fatigue behaviour of a polyamide has been characterised by determining the crack growth rate with the aid of thermographic tools, and finally the values obtained by means of this methodology have been compared with those resulting from the use of conventional measurement techniques.

1. INTRODUCCIÓN

Para seguir la evolución del crecimiento de una fisura en un proceso de fatiga lo habitual es emplear métodos indirectos basados en el estudio de la variación de la flexibilidad o de potencial eléctrico. La medida directa por medios ópticos plantea la dificultad de establecer cual es realmente la situación del fondo de fisura.

En este trabajo se plantea la posibilidad de medir el tamaño de fisura de forma directa, pero no a través de la radiación visible, detectada por nuestros ojos, sino a través de radiaciones infrarrojas emitidas por el fondo de fisura en su calentamiento a lo largo del proceso de fatiga.

La principal fuente de radiación infrarroja es el calor o radiación térmica. Cualquier objeto que tenga una temperatura por encima del cero absoluto, 0 K ó -273.15 °C, emite una radiación en la zona de infrarrojos del espectro electromagnético. Cuanto más caliente esté el objeto, mayor cantidad de radiación infrarroja emitirá.

Esta energía proveniente de un objeto se puede enfocar por un conjunto de lentes sobre un detector de infrarrojos. Éste envía la información a un sensor electrónico que convierte los datos recibidos en una imagen que puede ser vista en un monitor estándar. Esta técnica se denomina termografía por infrarrojos y se define como el arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica, que además permite leer los valores de las temperaturas de la imagen.

La termografía ha sido una herramienta empleada en la detección de defectos generados en procesos de fatiga, así como, en la determinación del grado de daño acumulado en los mismos [1-4].

A partir de la termografía infrarroja y la variación de temperaturas existente en el contorno del fondo de fisura se desarrolla en este trabajo un modelo que permite seguir la evolución del tamaño de fisura en el tiempo empleando una técnica a distancia, no destructiva y sin ningún contacto con la muestra ensayada.

Aprovechando el modelo desarrollado se ha caracterizado el comportamiento a fatiga de una poliamida, determinando la velocidad de crecimiento de fisura con la ayuda de instrumentos termográficos, contrastando los valores obtenidos siguiendo esta metodología con los resultantes de emplear las técnicas de medida convencionales.

2. EVOLUCIÓN TÉRMICA ASOCIADA AL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN POLÍMERO

El incremento térmico sufrido por un polímero como consecuencia de un proceso de fatiga se ha estudiado desde el punto de vista termodinámico. Para ello se han establecido varios modelos de calentamiento térmico en base al balance entre la generación de energía de histéresis durante el proceso dinámico y el calor disipado a los alrededores, cuando un polímero es sometido a fatiga [5]. La ecuación general que presenta la diferencia de temperatura entre el ambiente y la muestra se expresa como:

$$\Delta T = f\left(\dot{Q}, \frac{V}{S}\right) \quad (1)$$

Esta ecuación pone de manifiesto que dicha diferencia se incrementa con el volumen de la muestra (V) y se reduce, principalmente, con la superficie de la probeta (S).

El factor \dot{Q} representa la velocidad de disipación de energía de histéresis en forma de calor por ciclo y por unidad de volumen durante su vida en fatiga y viene dado según la relación [6]:

$$\dot{Q} = \pi \cdot D''(v, T) \cdot \sigma_0^2 \quad (2)$$

siendo $D''(v, T)$ la parte imaginaria de la acomodación compleja, D^* , definida a través de la siguiente expresión:

$$D^* = \frac{1}{E^*} = \frac{1}{E} \cdot e^{-i\delta} = D \cdot e^{-i\delta} = D \cdot \cos \delta - iD \cdot \text{sen} \delta = D' - iD'' \quad (3)$$

La expresión (3) expresada en función de E' y E'' queda:

$$D^* = \frac{1}{E^2} (E' \cdot \cos \delta - iE' \cdot \text{sen} \delta) = \frac{E' - iE''}{E^2} \quad (4)$$

Donde E^* es el módulo de elasticidad complejo y δ el ángulo de desfase entre la señal de tensión y la deformación. Observando la expresión anterior se comprueba que D'' , y por lo tanto \dot{Q} , resulta proporcional a E'' , que a su vez es proporcional a la energía disipada en forma de calor.

Estudios experimentales desarrollados [7] muestran un buen grado de acuerdo con el modelo de calentamiento termodinámico previamente establecido, y corroboran la fuerte sensibilidad al aumento de temperatura en el material con la frecuencia y la tensión máxima aplicada sobre el mismo.

Si prevalecen las condiciones adiabáticas, esto es, todo el calor generado en el polímero se manifiesta como incremento de temperatura en el mismo y no se transfiere nada al entorno, entonces la velocidad de cambio de temperatura en el material viene dada por la expresión:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot C_p} = \frac{\pi \cdot v \cdot D''(\omega) \cdot \sigma_0^2}{\rho \cdot C_p} \quad (5)$$

siendo ρ y C_p la densidad y el calor específico por unidad de masa del material, respectivamente.

En el caso más general, algo de calor se transfiere a los alrededores. Si T y T_0 son las temperaturas instantáneas de la probeta y del ambiente, respectivamente, la ecuación anterior puede modificarse para considerar la pérdida de calor a través de la superficie S , obteniéndose una expresión de la forma:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\pi \cdot v \cdot D''(\omega) \cdot \sigma_0^2}{\rho \cdot C_p} - \frac{H \cdot S}{\rho \cdot C_p \cdot V} \cdot (T - T_0) \quad (6)$$

donde S representa el área de la superficie, V el volumen de la probeta ensayada y H el coeficiente de transferencia de calor al entorno desde la superficie de la muestra.

Como se puede comprobar tanto en la expresión (5) como en la (6), el incremento de temperatura sufrido por un polímero en un proceso de fatiga es función de la tensión elevada al cuadrado, por tanto, ante la presencia de un defecto, como puede ser una fisura, donde se producen concentraciones de tensión, este incremento se verá intensificado respecto a su contorno y podrá ser identificado por una cámara termográfica.

3. MATERIAL DE ENSAYO

El material seleccionado para este trabajo ha sido una Poliamida 6 con un módulo de elasticidad de 2,7 GPa. Se mecanizó una probeta CT de 11.2 mm de espesor [8], cuyas dimensiones y aspecto se reflejan en las Figuras 1 y 2, respectivamente.

Sobre la probeta se realizó una entalla de 2 mm, aproximadamente, por medio de una cuchilla sujeta al cabezal móvil de la máquina de ensayo. Posteriormente, la probeta se sometió a un proceso de prefisuración.

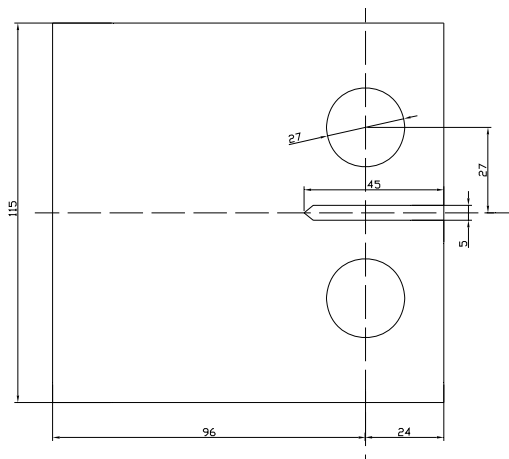


Fig. 1. Dimensiones de la probeta CT (B = 11.2 mm)

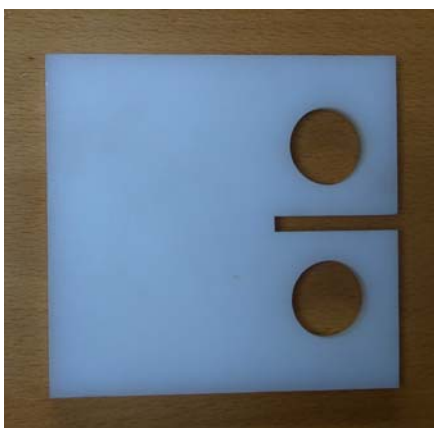


Fig. 2. Aspecto de la probeta CT

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. Equipamiento

Para la realización del ensayo de fatiga se empleó una máquina universal de ensayos servohidráulica con una capacidad de ± 100 kN, mientras que para la medida de la apertura de la probeta se empleó un extensómetro COD de ± 6 mm de recorrido.

Las medidas de temperatura se realizaron con una cámara termográfica por infrarrojos IRISYS (InfraRed Integrated Systems) Universal thermal Imager, Type IR 1011 con una resolución de 128x128 puntos, junto con el software propio IRISYS 1011 Imager software.

La medida de la fisura final tras la rotura se realizó por medio de una máquina de medir por coordenadas tridimensional dotada de un sistema óptico de medida.

El dispositivo de ensayo es el que se refleja en la Figura 3, donde se aprecia la colocación de la cámara termográfica para el seguimiento de la evolución de la fisura.

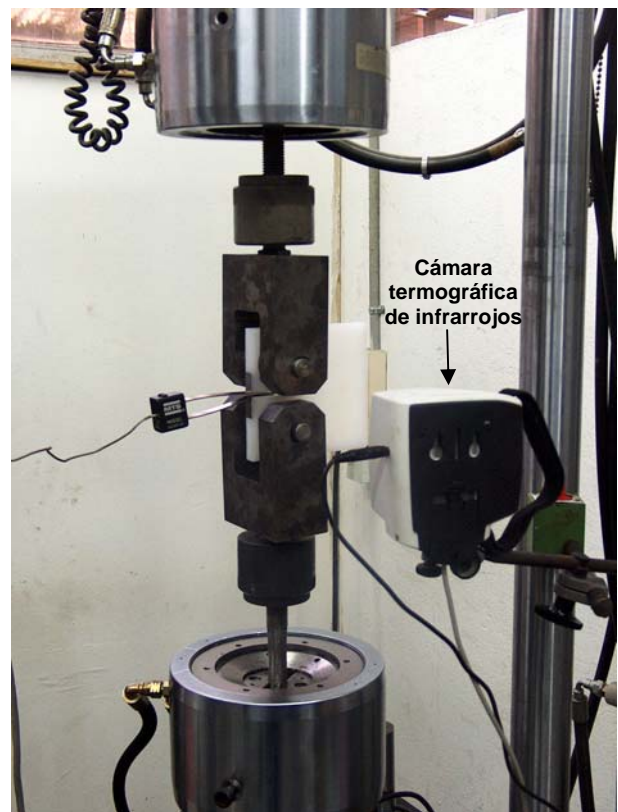


Fig. 3. Dispositivo de ensayo

4.2. Calibración

El software propio de la cámara termográfica permite monitorizar en tiempo real la temperatura de 10 puntos de la matriz de 128x128. Estos puntos seleccionados serán denominados “sondas” y se identificarán como S1 a S9.

Para conocer la distancia exacta entre las distintas sondas empleadas se realizó una operación previa de calibración consistente en la medida de una pieza de geometría conocida. Para ello se introdujo una pieza cerámica cuadrada de 38.6 mm de largo en una estufa a 100 °C y posteriormente se visualizó a través de la cámara termográfica manteniéndola a la misma distancia que la probeta durante el ensayo.

El resultado se refleja en la Figura 4 y en ella se puede observar que a lo largo del patrón se pueden colocar 13 sondas por lo el tamaño de cada una de ellas será de 3.2x3.2 mm².

4.3. Medida

Se distribuyen uniformemente sobre la zona de estudio las sondas, de forma que la distancia relativa entre ellas sea un parámetro conocido. Las sondas se colocan en el camino más probable a seguir por la fisura en su avance.

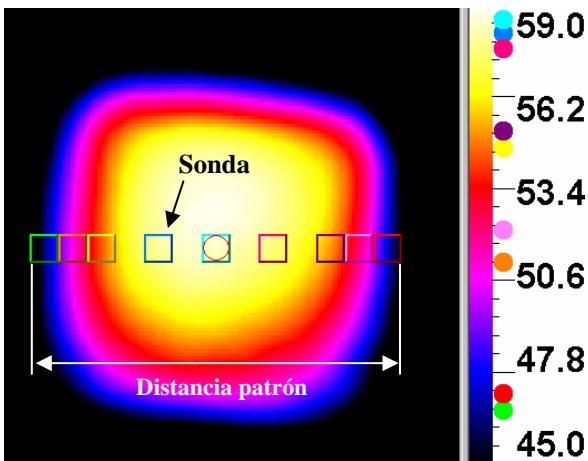


Fig. 4 Calibración de la cámara

Inicialmente se realiza una fatiga para conseguir una fisura con un tamaño en torno a los 30 mm. Como se partía de una fisura inicial de 21.22 mm, la probeta se fatigó durante 80.000 ciclos hasta incrementar su longitud en 10 mm aproximadamente.

A partir de este momento la cámara termográfica se enfocó sobre el fondo de fisura, zona con mayor temperatura de la probeta. Se hace coincidir el fondo de fisura con la sonda situada más a la izquierda, para de esta forma, aprovechar al máximo el campo disponible. Como puede verse en la Figura 5 el gradiente de temperatura existente entre el fondo de fisura y la parte más fría de la probeta se sitúa en torno a 5 °C.

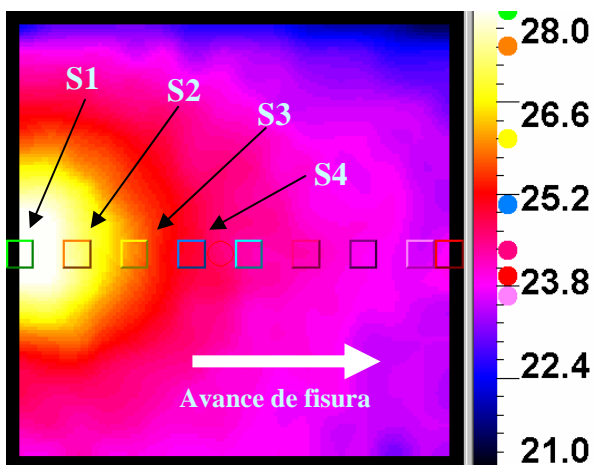


Fig. 5 Localización inicial del fondo de fisura

A medida que transcurre el ensayo la fisura va creciendo, el fondo de fisura va avanzando y eso se traduce para la imagen termográfica en que la zona de mayor temperatura se va desplazando hacia la derecha (Figura 6).

La representación en tiempo real de la temperatura registrada por cada una de las sondas es una curva creciente mientras el fondo de fisura se dirige hacia la sonda, que alcanza su valor máximo cuando el fondo de fisura alcanza la sonda. La curva se vuelve decreciente

una vez que la sonda ha sido atravesada y el fondo de fisura se aleja de ella, enfriándose la zona donde estaba situada.

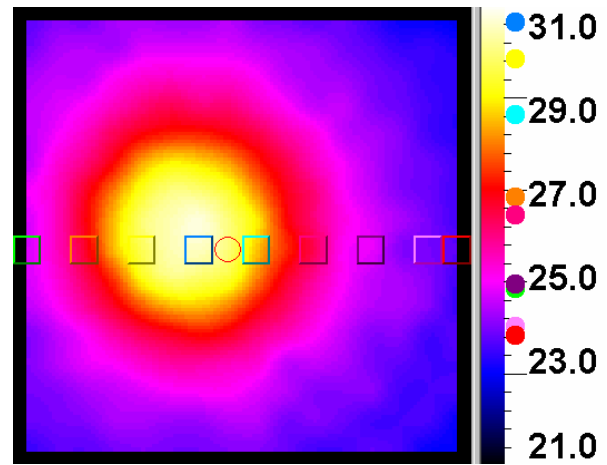


Fig. 6 Localización intermedia del fondo de fisura

Una vez finalizado el ensayo se conoce en qué ciclo el fondo de fisura alcanzó las diferentes sondas colocadas a tal efecto, pero se desconoce la longitud de fisura para cada situación, ya que la calibración realizada no supone una localización global de la fisura sobre la probeta. Para traducir el paso del fondo de fisura por cada una de las sondas se realiza una última operación a posteriori sobre la probeta rota, la medición del tamaño de fisura junto antes de la rotura, a_f . Esta longitud se obtiene como media de 6 medidas uniformemente distribuidas a lo largo de toda el espesor de la probeta y tomadas por medio de una máquina tridimensional de medir por coordenadas por visión sin contacto (Figura 7). El resultado obtenido en este caso fue de $a_f = 57.12\text{mm}$.

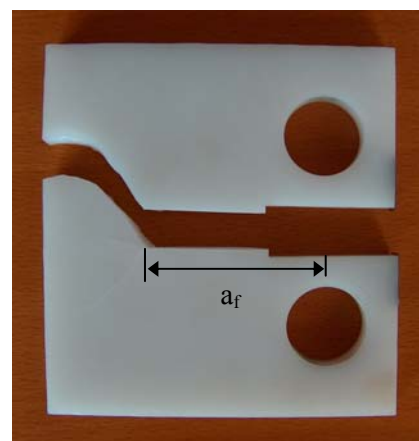


Fig. 7 Aspecto de la probeta tras la rotura

Conocido el valor final de la fisura, la sonda en la que se encontraba la fisura en el momento del fallo, la distancia entre las diferentes sondas y el ciclo en el que se encontraba el fondo de fisura en cada sonda, se realiza un proceso inverso para asignar un tamaño de fisura a cada número de ciclo empezando por la última de las sondas atravesadas y terminado en la primera.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el gráfico de la Figura 8 se representa la evolución de la flexibilidad de la probeta durante el ensayo, diferenciando los primeros 80.000 ciclos como prefisuración y a partir de ese momento el comienzo de la medida de la temperatura del fondo de fisura para definir la evolución del crecimiento de fisura en función del número de ciclos.

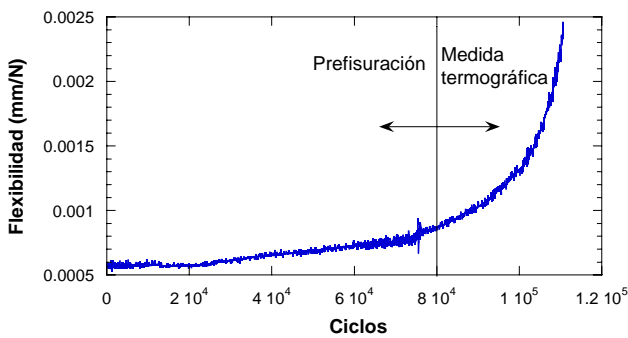


Fig. 8 Evolución de la flexibilidad de la probeta en función del número de ciclos

A partir de la evolución de la flexibilidad se puede estimar el crecimiento de fisura aplicando la siguiente expresión [8]:

$$\frac{a}{W} = C_0 + C_1 u_x + C_2 u_x^2 + C_3 u_x^3 + C_4 u_x^4 + C_5 u_x^5 \quad (7)$$

donde: $x/W = -0.250$; $C_0 = 1.0010$; $C_1 = -4.6695$; $C_2 = 18.460$; $C_3 = -236.82$; $C_4 = 1214.9$; $C_5 = -2143.6$ y u_x viene dado por la expresión:

$$u_x = \left\{ \left[\frac{EvB}{P} \right] + 1 \right\}^{-1} \quad (8)$$

siendo v/P la flexibilidad.

En la Figura 9 se representa el crecimiento de fisura obtenido indirectamente a partir de la flexibilidad de la probeta.

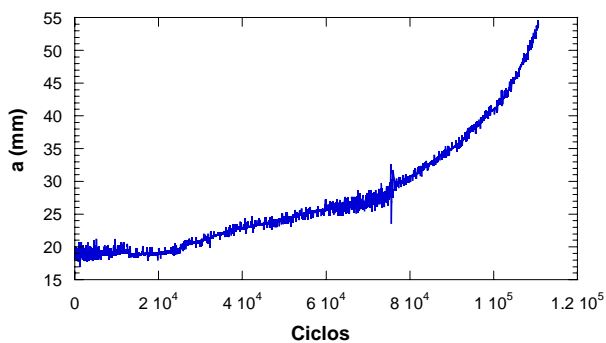


Fig. 9 Evolución de la fisura de la probeta estimada a partir de la flexibilidad en función del número de ciclos

Los datos de temperatura obtenidos por termografía se representan en la Figura 10 para cada una de las sondas

colocadas. Se puede comprobar que la temperatura muestra el comportamiento explicado anteriormente, es creciente mientras el frente de fisura se acerca a la sonda, alcanza el máximo justo en el instante en el que el fondo de fisura está situado sobre la sonda y se vuelve decreciente a medida que el frente se aleja de la sonda.

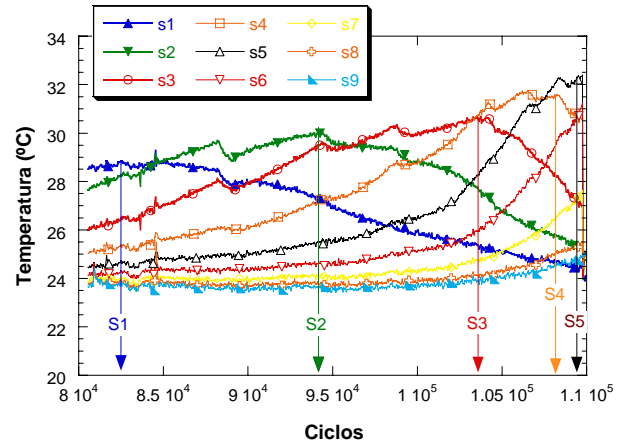


Fig. 10 Temperatura de las sondas en función del número de ciclos

En dicha figura se desarrolla la metodología para identificar el número de ciclo en que el fondo de fisura atraviesa cada una de las sondas que se encuentra a su paso, es decir, se selecciona el ciclo correspondiente al máximo valor de temperatura. En la Tabla 1 se indican los valores de los ciclos en los que se produce la intersección con cada una de las sondas.

Tabla 1. Ciclos de paso por cada sonda

Sonda	S1	S2	S3	S4	S5
Ciclo	82500	94300	103700	108200	109700

Los pequeños saltos que se pueden observar en las curvas de temperatura obedecen a la disminución de la carga durante el ensayo para evitar un crecimiento demasiado rápido de la fisura.

Debido a estas variaciones de carga para la sonda S4 no se ha seleccionado el máximo valor de temperatura como intersección con el fondo de fisura, porque como se puede observar tras ese máximo hay un descenso, debido a una disminución de la carga, pero a continuación la curva sigue siendo creciente.

A la sonda sobre la que se produce la rotura se le asocia el valor de fisura a_f y como se conoce la distancia entre las sondas, se va calculando el tamaño de fisura correspondiente a cada sonda descontando su distancia con la última de las sondas. Como se conoce el número de ciclos de paso del frente de fisura por cada sonda se puede obtener la variación del tamaño de fisura frente al número de ciclos (Figura 11)

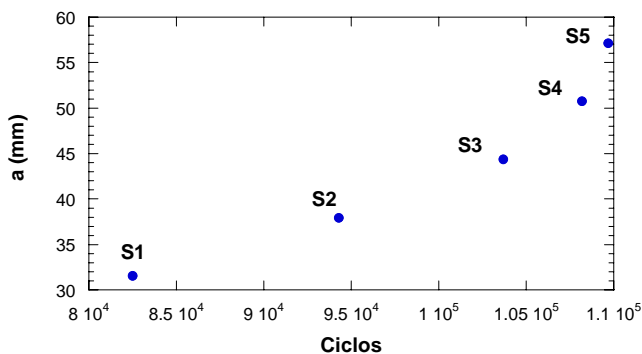


Fig. 11 Evolución de la fisura obtenida a partir de termografía con el número de ciclos

Obtenida esta última evolución, en la Figura 11 se compara el crecimiento de fisura obtenido empleando los dos métodos, flexibilidad y termografía, comprobando la analogía de resultados existente.

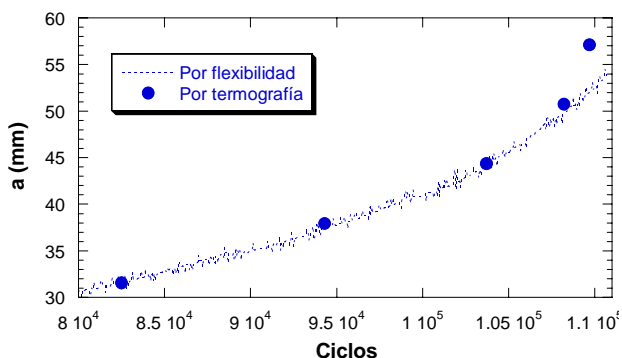


Fig. 11 Comparación de los dos métodos

Por último, en el gráfico de la Figura 12 se representan, para los datos obtenidos por los dos métodos, la evolución de la fisura con el número de ciclos (da/dN) frente al rango del factor de intensidad de tensiones (ΔK), obtenido a partir de la expresión [8]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} G \quad (9)$$

donde $\alpha = a/W$ y

$$G = 0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4 \quad (10)$$

Debido a la escasez de datos disponibles a partir de la técnica termográfica, para obtener un mayor número de puntos con objeto de definir la curva $da/dN-\Delta K$ con mayor precisión, se realizó una interpolación a partir de un ajuste exponencial sobre los datos disponibles.

Como se puede observar en la Figura 12, las curvas obtenidas por ambos métodos son prácticamente coincidentes. Este paralelismo se refleja también en los siguientes ajustes realizados sobre las curvas:

$$\text{Flexibilidad} \rightarrow \frac{da}{dN} = 1.70 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta K_1^{4.85} \quad (11)$$

$$\text{Termografía} \rightarrow \frac{da}{dN} = 1.73 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta K_1^{4.89} \quad (12)$$

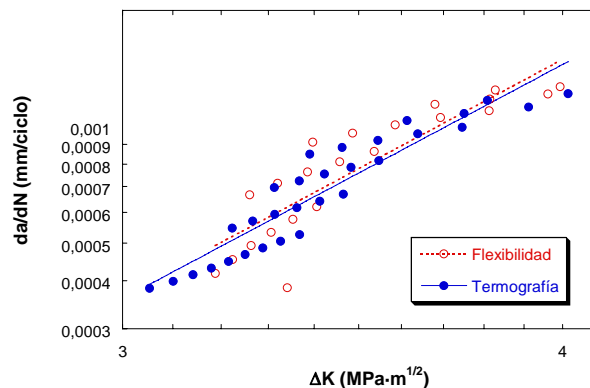


Fig. 12 Curvas $da/dN-\Delta K$ para los dos métodos

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una metodología experimental para medir la evolución de la fisura en un ensayo de fatiga sobre Poliamida 6 empleando un procedimiento que no precisa del contacto con la muestra como es la termografía infrarroja. Los resultados obtenidos han sido contrastados y confirmados con los obtenidos a través de métodos de cálculo tradicionales

6. REFERENCIAS

- [1] Jilken, L.; Brattemo, P.A. "Thermographic detection of fatigue crack growth in glassfiber reinforced plastics" Proceedings of the Symposium on Nondestructive Evaluation. Pg 311-319. 1985.
- [2] Luong, M. "Fatigue evaluation of metals using infrared thermography". Proceeding of SPIE (The International Society for Optical Engineering). V 4317. Pg 297-302. 2001
- [3] Yang, B.; Liaw, P. K.; Wang, G.; Peter, W.H. "Thermal-Imaging Technologies for Detecting Damage during High-Cycle Fatigue". Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. V 35 A. N 1, Pg 15-23. January, 2004.
- [4] Charles, J.A.; Appl, F.J.; Francis, J. E. "Thermographic determination of fatigue damage". Journal of Engineering Materials and Technology. V 100. N 2. Pg 200-203. Apr. 1978.
- [5] Casado, J.A. "Comportamiento en fatiga de poliamidas reforzadas con fibra de vidrio". Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. Abril 2001
- [6] Ferry, J. D. "Viscoelastic properties of polymers". 3rd. ed. Wiley, New York, 1980.
- [7] Hertzberg, R. W. & Manson, J. A. "Fatigue of Engineering Plastics". Academic Press. New York, 1980.
- [8] ASTM E 647-00. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates.