



Artículo de investigación



# Relación entre el crecimiento y la temperatura en la punta de la grieta por fatiga en acero AISI 1018

## *Relationship between growth and temperature at the tip of the fatigue crack in AISI 1018 steel*

Darío Antonio García Lavariega<sup>1</sup> , Arturo Abúndez Pliego<sup>1</sup> , Christian Jesús García López<sup>2</sup> , Jan Mayén Chaires<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Int. interior Internado Palmira, CP. 62490, Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional CIITEC-IPN, Cerrada de Cecati S/N Col. Sta. Catarina, CP. 78395, Azcapotzalco, CDMX, México.

<sup>3</sup>CONACYT-CIATEQ A.C., Zona Industrial, Eje 126 No. 225, CP. 78395, San Luis Potosí, SLP, México.

**Autor de correspondencia:** Darío Antonio García Lavariega, Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira, CP. 62490, Cuernavaca, Morelos, México. E-mail: [m20ce049@cenidet.tecnm.mx](mailto:m20ce049@cenidet.tecnm.mx). ORCID: 0009-0008-2498-0134.

**Recibido:** 15 de Febrero del 2023

**Aceptado:** 18 de Marzo del 2023

**Publicado:** 24 de Marzo del 2023

**Resumen.** - *En este artículo se presenta un estudio sobre la relación que existe entre el comportamiento del crecimiento de grieta por fatiga y la evolución de la temperatura en la punta de grieta en un acero AISI 1018. Tanto la longitud de la grieta como la temperatura se obtuvieron experimentalmente de ensayos de fatiga de acuerdo a la norma ASTM E647. La temperatura se midió simultáneamente a través de termopares y termografía infrarroja, mientras que la longitud de la grieta se midió a través de un microscopio. Los datos experimentales se procesaron para obtener curvas de ciclos contra temperatura y ciclos contra longitud de grieta para posteriormente correlacionar la información y obtener, por regresión lineal de los datos experimentales, un modelo para relacionar la temperatura con la longitud de la grieta. Los resultados muestran que el modelo propuesto está en buena concordancia con los datos experimentales y permite estimar la tendencia y la magnitud de la temperatura al crecer la grieta.*

**Palabras clave:** Crecimiento de grietas; Temperatura; Fatiga de metales; Termopares; Cámara termográfica.

**Abstract.** - *In this work, a study dealing with the correlation between the fatigue crack growth behavior and the temperature evolution at the tip of the fatigue crack of the AISI 1018 steel is presented. Both the crack length and the temperature at the crack tip were experimentally obtained from a fatigue test carried out according to the ASTM E647; the temperature at the crack tip was simultaneously acquired by thermocouples and infrared thermography, while the crack length was acquired through a microscope. The experimental data were processed aimed at plotting the curves of the temperature against cycles as well as the crack length against cycles in order to be able to correlate the information and, therefore, to obtain by linear regression of the experimental data a model to correlate the temperature at the crack tip to the crack length. The results showed that, on one hand, the linear regression is in good agreement with the experimental data, and, on the other hand, the proposed model allows estimating the trend and the magnitude of the temperature when the crack grows.*

**Keywords:** Crack growth; Temperature; Metal fatigue; Thermocouples; Thermographic camera.



## 1. Introducción

Los primeros estudios sobre fatiga fueron documentados por Albert [1] desde 1937, y desde entonces hasta la actualidad es un tema de gran interés entre la comunidad científica. Todo este interés tiene su motivación en el hecho de que el fenómeno de fatiga es común en las fallas de materiales. Zerbst *et al* [2] reportaron que entre el 80 y el 90% de los casos registrados de fallas estructurales tienen a la fatiga como la causa. Esto se manifiesta en estructuras y componentes de máquinas, usadas en áreas como las ingenierías aeroespacial, civil y mecánica [3]. La mayoría de los componentes mecánicos que se someten a cargas cíclicas son susceptibles a desarrollar grietas y eventualmente causar fallas por fractura, que a menudo ocurren sin previo aviso y con consecuencias catastróficas [1].

En la fatiga se desarrollan esfuerzos cíclicos a través del tiempo, que degradan el material hasta el punto en que las pequeñas grietas se nuclean. Después la grieta comienza a propagarse y termina en la ruptura final de la pieza [4]. El estudio de la propagación de grietas por fatiga es importante, debido que de ahí depende la seguridad de las partes mecánicas y estructurales, para evitar accidentes que conducen a pérdidas económicas, humanas y ambientales.

## 2. Antecedentes

Paris y Erdogan [5] fueron los primeros investigadores que utilizaron el factor de intensidad de esfuerzos para determinar una relación entre la condición de carga, la longitud de grieta y la velocidad de propagación. La ley de París es el tratamiento de resultados de muchos datos experimentales en el marco de la solución elástica del problema de propagación de grietas. Como consecuencia, esta ley no explica la naturaleza física del proceso de propagación de grietas en los metales e inicia muchas discusiones

científicas e intentos de derivar una descripción alternativa de la ley de propagación de grietas.

Recientemente, se han propuesto enfoques experimentales para evaluar la propagación de grietas [6,7], principalmente a partir del desarrollo de las técnicas modernas de medición de la temperatura, la cual, como se reporta ampliamente en la literatura [8-12], se puede correlacionar con la propagación de grieta por fatiga debido a que una gran variedad de estudios demuestran que, en la mayoría de los materiales metálicos, la energía de histéresis por deformación plástica se convierte en calor, como se reportó en el trabajo de Meneghetti *et al* [13]. Por lo anterior, se considera que la mayor parte de la energía mecánica de entrada se disipa en forma de calor y eleva la temperatura del material y, en el caso particular de la etapa de propagación de grieta, existe una distribución de temperatura que alcanza su valor máximo en la vecindad de la punta de la grieta, como lo demostraron Pandey y Chand [14].

Actualmente es posible encontrar trabajos como el de Meneghetti y Ricotta [15], quienes, a través de la medición de la temperatura en probetas sometidas a fatiga, demostraron que existe disipación de calor en la punta de la grieta, por lo que la medición de temperatura por termografía se ha aplicado ampliamente en la investigación del comportamiento a fatiga en los últimos años [16-18].

Resultados de trabajos recientes demuestran que, a medida que crece la grieta, hay un aumento de la temperatura superficial de la probeta, lo cual plantea la necesidad de comprender los fenómenos físicos en la propagación de grietas por fatiga desde el punto de vista de la Termodinámica. Un ejemplo es el trabajo de Idris *et al* [19], quienes midieron simultáneamente la temperatura y la longitud de la grieta durante los



ensayos de crecimiento de grietas por fatiga hasta la ruptura, bajo condiciones de carga de amplitud constante y variable. Hajshirmohammadi y Khonsari [20] reportaron un modelo matemático para determinar la tasa de propagación de grietas, el cual considera la temperatura superficial de la probeta como variable.

Por lo anterior, en el presente estudio se propone la medición de la temperatura en la vecindad de la punta de la grieta durante la propagación de la grieta por fatiga bajo una carga de modo I de amplitud constante para un acero AISI 1018 bajo condiciones de esfuerzo plano para correlacionar el comportamiento del crecimiento de grieta y la evolución de la temperatura en la punta de la grieta.

### 3. Metodología

Se realizaron 2 ensayos experimentales de crecimiento de grieta por fatiga bajo la norma ASTM E647 [21], en la que menciona que se debe realizar los ensayos en dos etapas: preagrietamiento y propagación de grietas. En la etapa de preagrietamiento, la norma ASTM E647 [21] especifica que la longitud inicial de pregrieta corresponde a la longitud del centro del orificio de carga hasta la punta de la muesca (10 mm) que se muestra en la Figura 1. En la etapa de propagación de grieta, la longitud de grieta inicial fue de 11.3 mm, que corresponde a la suma de la longitud inicial de pregrieta y el tamaño de la pregrieta. A partir de 11.3 mm se midieron simultáneamente la longitud de grieta y la temperatura en la punta de la grieta en una probeta de tensión compacta (CT, por sus siglas en inglés). Se realizaron intervalos de medición de la longitud de grieta ( $\Delta a$ ) de 0.033 mm,

debido a que la norma ASTM E647 [21] recomienda que para probetas CT de 40 mm de anchura ( $w$ ), los intervalos de medición deben ser menor o igual a 1.6 mm. La temperatura se registró en cada intervalo de longitud de grieta con su respectivo número de ciclos.

#### 3.1 Materiales y equipo

El material utilizado en este estudio es un acero AISI 1018. Este tipo de acero es muy usado en construcción de puentes, tuberías y edificios [22]. El acero es de tipo estructural y de bajo contenido de carbono. La composición química del material se encuentra en la Tabla 1. Las propiedades mecánicas y cíclicas de dicho acero se presentan en la Tabla 2.

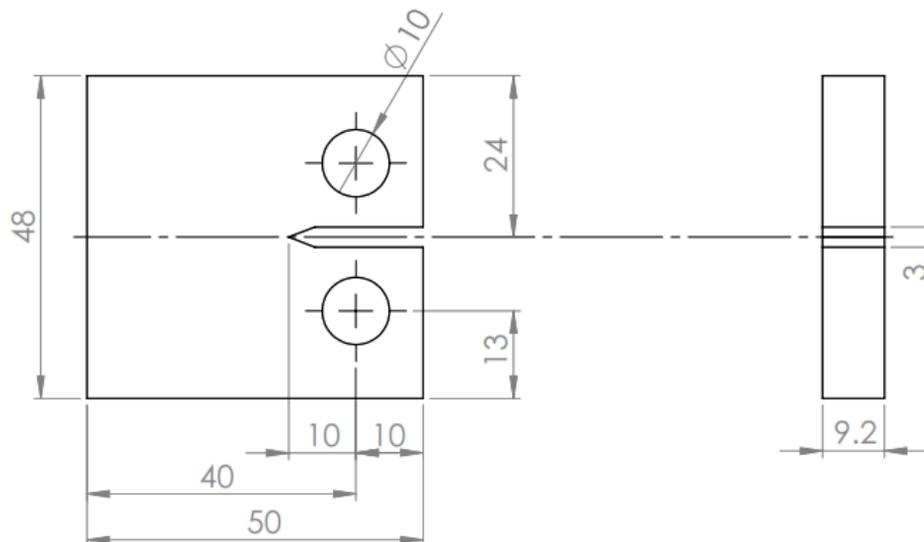
**Tabla 1.** Composición química del acero AISI 1018 [23].

% C	% Mn	% P	% S
0.15 - 0.20	0.60 - 0.90	0.040	0.05

**Tabla 2.** Propiedades del acero AISI 1018 [24].

Módulo de elasticidad (GPa)	200
Relación de Poisson	0.29
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	7850
Esfuerzo de fluencia (MPa)	386
Esfuerzo último (MPa)	634

Las muestras de tensión compacta (CT) se obtuvieron de una placa de acero AISI 1018 de medidas 10 x 8 x 3/8 de pulgadas, la cual se maquinó para dimensionarla de acuerdo a la norma ASTM E647 [21] para obtener las dimensiones que se muestran en la Figura 1. Se seleccionó la muesca en V y se maquinó mediante el proceso de fresado.



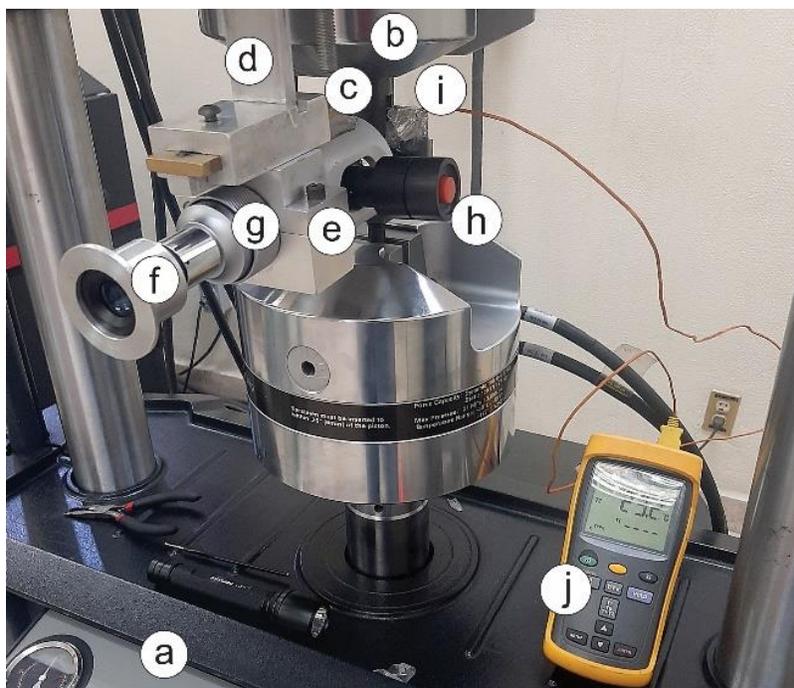
**Figura 1.** Dimensiones de probeta de tensión compacta (CT) en mm.

Con el fin de realizar una observación adecuada del crecimiento de la grieta en las probetas, una de las caras de las probetas se pulió en acabado espejo. En la otra cara se realizó un pulido menos fino, con la finalidad de que la rugosidad de la superficie no afectara la trayectoria de la grieta, durante la propagación de la misma. El desbaste se realizó con papeles abrasivos de carburo de silicio, de tamaño de grano grueso a un tamaño de grano muy fino (de lija #100 hasta lija #2000). Se utilizó agua como medio de lubricación y el pulido se realizó de forma manual. La cara menos pulida se recubrió con una fina capa de pintura negra rociada en la superficie para aumentar la emisividad térmica al valor conocido de 0.98.

Para garantizar una punta de grieta aguda, fue necesario generar un preagrietamiento sobre la entalla. La pregrieta se generó mediante carga cíclica de tensión-tensión. El manual ASM [25] menciona que para ensayos de tensión-tensión, la relación de carga debe ser mayor a 0, por lo que recomienda una relación de 0.1. También hace mención que las frecuencias de forma de onda sinusoidal son más fáciles de controlar en

máquinas de ensayo equipadas con sistemas servo hidráulicos. Las cargas aplicadas se propusieron en ciclos de carga sinusoidal con una frecuencia de 10 Hz y una relación de carga  $R = 0.1$ .

Para el proceso de preagrietamiento, cada una de las probetas fue sometida a cargas cíclicas en la máquina universal MTS Landmark servo hidráulica de circuito cerrado (ver Figura 2a), con una celda de carga de 100 kN de capacidad (ver Figura 2b), en modo de control de carga en condiciones de amplitud de carga constante,  $\Delta P$ . La sujeción de las probetas (CT) se realizó en mordazas tipo “clevis”, ajustando la altura de las mordazas con el controlador Flextest 40 de la máquina servo hidráulica. Los datos para preagrietamiento de carga máxima, mínima y promedio, se introdujeron en una computadora mediante el software MTS TestSuite. Con un microscopio óptico Struers modelo PSM- 10, se ajustó el punto de observación en la punta de la muesca.



**Figura 2.** Configuración con termopares. a) Máquina universal MTS, b) Celda de carga, c) Mordaza, d) Carro, e) Microscopio, f) Ocular de medición, g) Lente de objetivo, h) Botón de lámpara LED, i) Termopar, j) Monitor del termopar.

La medición de la pregrieta se monitoreó con la regla graduada incorporada en el ocular de medición hasta que la pregrieta alcanzó 1.33 mm de longitud. La longitud final de la pregrieta fue determinada de acuerdo a las indicaciones que especifica la norma ASTM E647 en el numeral 8.3.2, en el cual se sugiere que el valor mínimo que debe tener la pre-grieta, es de 1 mm. Los datos de ensayo para la etapa de preagrietamiento, se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Condiciones de carga de preagrietamiento.

Dato	Símbolo	Valor
Carga máxima, kN	$P_{m\acute{a}x}$	6.56
Carga mínima, kN	$P_{m\acute{i}n}$	0.656
Carga promedio, kN	$P_{prom}$	3.609

Una vez que se finalizó el proceso de preagrietado, se realizaron los ensayos de propagación de las grietas. Se consideró usar la misma frecuencia de 10 Hz y una relación de carga  $R=0.1$ , debido a recomendaciones de la norma ASTM E647 [21]. El microscopio óptico

se ajustó en la punta de la pregrieta generada, la cual fue la referencia de las mediciones para la etapa de propagación de grieta. Se registraron el número de ciclos cada 0.03 mm de avance de grieta. La prueba se consideró finalizada cuando la probeta se fracturó totalmente. Los datos de cargas máxima, mínima y promedio introducidos en la máquina de ensayos para la etapa de propagación de grieta, se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones de carga de propagación de grieta.

Dato	Símbolo	Valor
Carga máxima, kN	$P_{m\acute{a}x}$	7.01
Carga mínima, kN	$P_{m\acute{i}n}$	0.701
Carga promedio, kN	$P_{prom}$	3.855

### 3.2 Medición de crecimiento de grieta

La medición de la grieta se realizó de manera visual (ver Figura 2). Se colocó el microscopio al frente de la muestra y con la lente de objetivo (ver Figura 2g) se realizaron observaciones con



aumentos de 50x. El microscopio se desplazaba horizontalmente mediante un carro (ver Figura 2d) para seguir la trayectoria de la punta de grieta. A medida que se registraba cada avance de longitud de la grieta, también se consideraba el registro del número de ciclos.

### 3.2 Medición de temperatura de la grieta

La temperatura superficial de la muestra se midió a través de una cámara infrarroja marca Hti modelo HT-18 con resolución de 220 x 160 píxeles y sensibilidad térmica de 0.07 °C. La cámara infrarroja se instaló en la parte posterior de la probeta apoyada en un tripié (ver Figura 3d). El proceso de registro de temperatura se hizo en simultaneidad con el crecimiento de grieta mediante captura de imágenes.



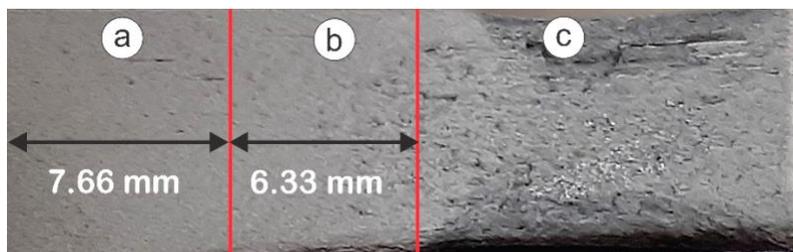
**Figura 3.** Configuración con cámara termográfica. a) Microscopio, b) Probeta, c) Cámara termográfica, d) Tripié.

En otra medición de temperatura, se colocaron termopares tipo K modelo Fluke 52 II (ver Figura 2i). Las terminales de los termopares se fijaron con cinta adhesiva laminar a 1.33 milímetros de la punta de la grieta y el valor de la temperatura se registraba en un monitor. El proceso de registro de temperatura se hizo en simultaneidad con el crecimiento de grieta.

## 4. Resultados

Después de concluir la prueba de propagación de grietas por fatiga, se notó una clara diferencia en la apariencia física en ciertas áreas superficiales de sección fracturada de la probeta (ver Figura 4). Se encontró que el área fracturada con condiciones de superficie lisa y plana (región a), mostró un crecimiento gradual de la grieta, que es la etapa de propagación de grieta por fatiga. En esta superficie fracturada, no se muestra ninguna marca de playa a simple vista en la región de crecimiento de grieta. Esto demostró, de acuerdo con la literatura [26-27], que las marcas de playa en la superficie de la fractura son invisibles cuando se usa la carga de amplitud constante, en comparación con cargas de amplitud variable, que son vistas a simple vista.

El área fracturada con condiciones de superficie rugosa e irregular (región b), mostró un crecimiento de grieta inestable y puede caracterizarse como un crecimiento rápido de la longitud de la grieta. Cuando la pieza tiene una fractura repentina y completa (región c), se observó un desprendimiento irregular de material en los extremos del espesor de la probeta y la superficie mostró porosidad. La transición de crecimiento de grieta estable a inestable se puede distinguir notoriamente debido al tipo de superficie liso y rugoso.

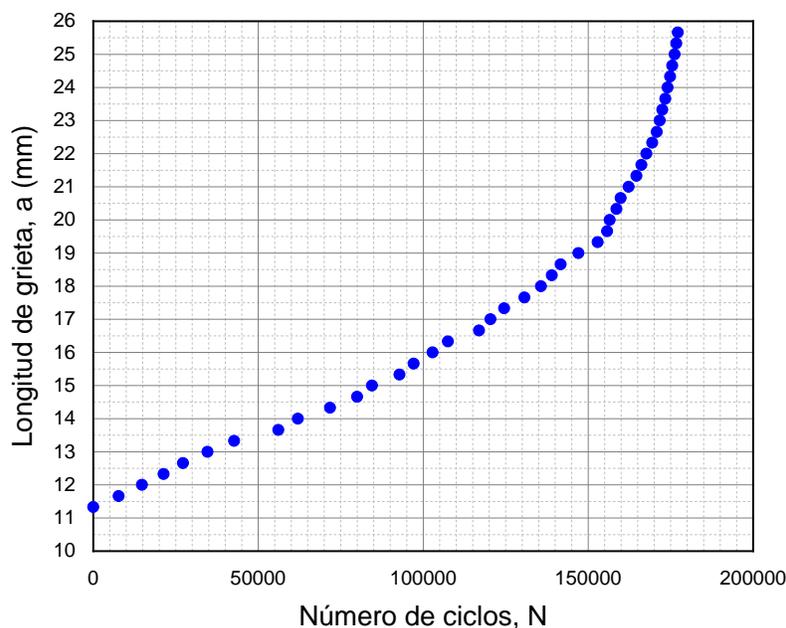


**Figura 4.** Aspecto de la superficie de fractura de las probetas CT. a) Región de propagación de grieta, b) Región de crecimiento inestable de grieta, c) Fractura repentina de la pieza.

En la Figura 5 se muestra la curva de longitud de grieta contra ciclos de fatiga (a-N) para el acero AISI 1018. Los datos experimentales de propagación de grietas por fatiga (ver Figura 5), muestran que la grieta inicialmente creció a un ritmo lento como se reporta en la literatura [5], y comenzó a acelerarse el crecimiento de grieta después de 150000 ciclos a partir de una longitud de 19 mm aproximadamente. La tasa de

crecimiento de la grieta aumentó junto con la longitud de la grieta.

Los ciclos totales hasta la falla fueron en promedio de 174773 ciclos bajo las condiciones de carga mostrados en la Tabla 4. El punto final de la curva indica la fractura final de la probeta durante la prueba.



**Figura 5.** Datos experimentales de longitud de grieta vs número de ciclos.

La curva de la temperatura respecto al número de ciclos mostrada en la Figura 6 se obtuvo a partir de los datos de termopares, y la cámara termográfica se usó para corroborar datos. La temperatura mostró un incremento lento y constante desde el inicio hasta los 150000 ciclos

donde la probeta pasa la mayor parte de su vida de fatiga. Después de los 150000 ciclos, la temperatura aumentó continuamente hasta llegar a la fractura total de la muestra que corresponde 174773 ciclos. Este comportamiento en el incremento estable de temperatura es debido a un



equilibrio entre la disipación de calor y la generación de energía por deformación plástica, que ha sido documentado por Meneghetti y Ricotta [15].

El incremento continuo de temperatura representa entre 5 al 10% de la vida de fatiga

[28], ya que un aumento repentino de temperatura representa una pequeña cantidad de ciclos después de los 150000 ciclos. La temperatura registrada en la probeta fue en un inicio con una temperatura de 24.6 °C y finalizó con 29.2 °C. La diferencia entre las temperaturas inicial y final fue de 4.6 °C.

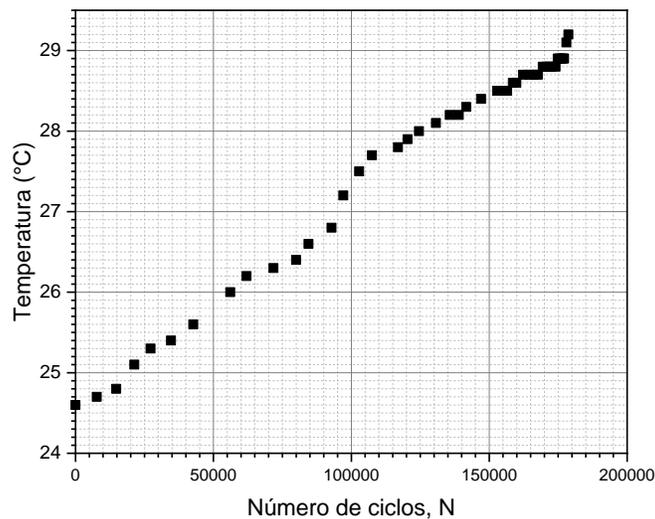


Figura 6. Comportamiento de temperatura superficial de la probeta.

## 5. Discusión de resultados

En este estudio se encontró que la temperatura aumenta a medida que la grieta crece hasta la fractura final de la prueba (ver Figura 7). Esta

información se puede utilizar para predecir el punto de transición entre el crecimiento estable e inestable de la longitud de grieta, y que se manifiesta en los incrementos de temperatura de la probeta.

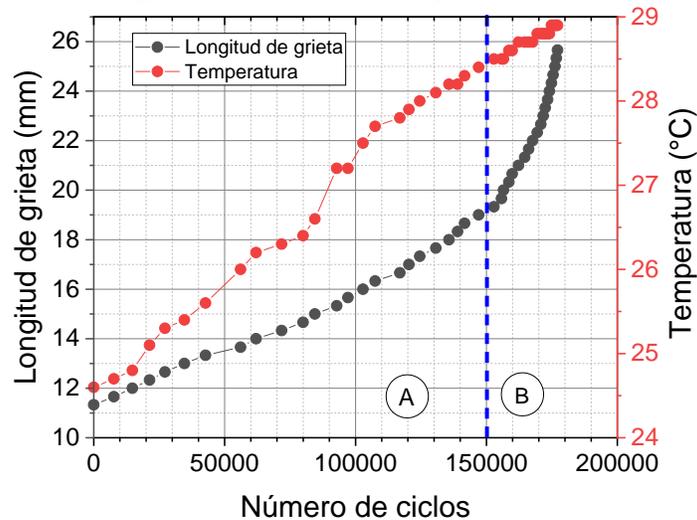
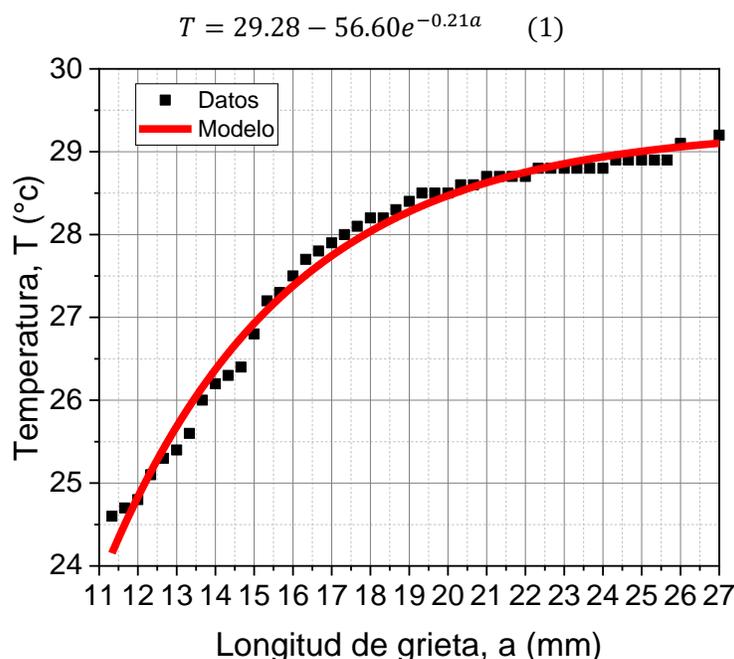


Figura 7. Comportamiento de la temperatura y la longitud de grieta durante el ensayo experimental. a) Región estable, b) Región inestable.



En la Figura 8 se muestra la relación del crecimiento de grieta con la temperatura de la superficie de la probeta, la cual revela que existe una relación exponencial desde la etapa de propagación de grieta hasta la fractura. Se observa una curva más pronunciada después de los 18 mm de longitud de grieta debido a la inestabilidad en su crecimiento. El modelo que se muestra en la ecuación (1), donde  $T$  representa la temperatura superficial de la probeta, y la

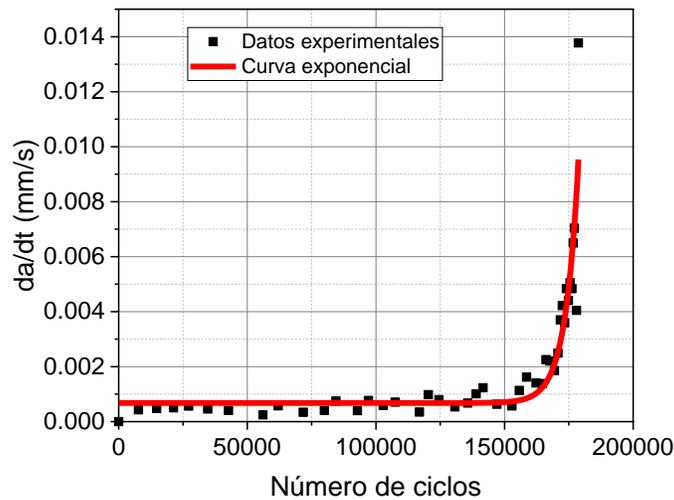
longitud de grieta se expresa como  $a$ . El modelo se obtuvo mediante la técnica de regresión exponencial. Se determinó el coeficiente de correlación  $R^2$  con un valor de 0.987 para establecer la correlación entre los resultados obtenidos en el presente modelo y los resultados del experimento.



**Figura 8.** Comportamiento de la temperatura y la longitud de grieta durante el ensayo experimental.

La velocidad de propagación de grieta ( $\frac{da}{dt}$ ) mostrado en la Figura 9, presenta una velocidad constante de crecimiento en la etapa de propagación de grieta antes de los 150 000 ciclos. Este comportamiento se presenta como una línea recta (ver Figura 9), donde la velocidad se mantiene constante a  $6.78E-4$  mm/s. Después de los 150 000 ciclos la velocidad de propagación de grieta se comporta de manera exponencial, debido a que su velocidad aumenta mientras transcurren a pequeños intervalos de ciclos hasta llegar a la ruptura total de la probeta. Paris y

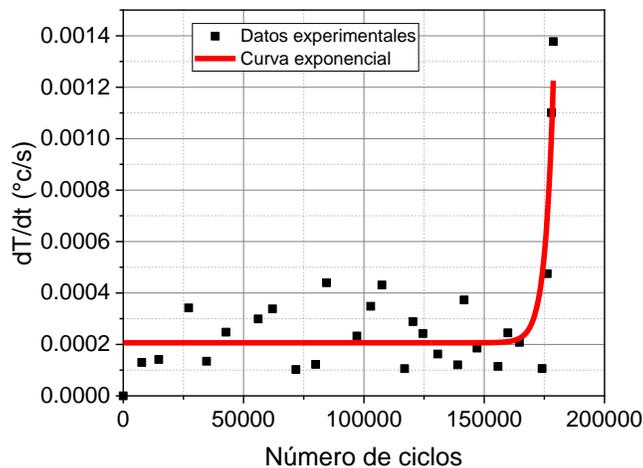
Erdogan [5] reportaron que existe un crecimiento acelerado de la tasa de la propagación de la grieta antes de la fractura total de una pieza sometida a cargas por fatiga, por lo que la Figura 9 representa el mismo comportamiento al final de la fractura de la probeta. El ajuste de la curva se obtuvo mediante la técnica de regresión exponencial y se obtuvo el valor de 0.997 para el coeficiente de correlación  $R^2$ . De acuerdo con Sivák y Ostertagová [29], un valor de  $R^2$  superior a 0.90 se considera muy bueno para evaluar la calidad de regresión.



**Figura 9.** Comportamiento de la velocidad de propagación de grietas.

La tasa de temperatura  $\left(\frac{dT}{dt}\right)$  mostrado en la Figura 10 tiene la misma tendencia de evolución que la velocidad de propagación de grieta, con un rápido incremento en la etapa final, pero con una gran dispersión de datos en el estado estacionario. Se estableció una tasa de temperatura constante de  $0.0002 \text{ }^\circ\text{C /s}$ . Después de los 140 000 ciclos la tasa de temperatura se comporta de manera exponencial, debido a que la

velocidad de propagación de grieta aumenta. Hajshirmohammadi y Khonsari [20] reportaron un comportamiento similar de la tasa de temperatura para un acero inoxidable 304. El ajuste de la curva se obtuvo mediante la técnica de regresión exponencial con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.774$ , que demuestra poca precisión debido a la dispersión de temperatura mencionada.



**Figura 10.** Comportamiento de la tasa de temperatura.

De acuerdo al modelo presentado en la ecuación (1), la temperatura está relacionado con el

crecimiento de grieta. También, la temperatura es una variable termodinámica que involucra la



entropía, debido a que la fatiga es un proceso irreversible [30-32]. La temperatura y la entropía son variables que, al estar relacionados con la longitud de grieta, han sido incorporados en

## 6. Conclusiones

Se encontró un modelo que relaciona el comportamiento del crecimiento de grieta y la temperatura en la punta de la grieta, en la propagación de grietas por fatiga. Las pruebas de propagación de grietas por fatiga, realizadas en el acero de bajo carbono AISI 1018 con una relación de carga ( $R$ ) de 0.1, muestran un aumento en la temperatura superficial de la probeta a medida que crece la grieta por fatiga cada 0.3 mm. El modelo predice la evolución completa de la temperatura durante el proceso de fatiga, incluido el aumento de la temperatura antes de la falla por fatiga.

La comparación de las predicciones del modelo con los resultados experimentales muestra una buena concordancia en la magnitud de la temperatura. Los resultados demuestran que la temperatura es una variable que se puede considerar en modelos de propagación de grietas, debido a su linealidad con respecto al incremento de longitud de grieta que existe exclusivamente en la etapa de crecimiento estable de la grieta.

Se utilizaron técnicas de medición de termopares y termografía para conocer mejor la naturaleza de la propagación de grietas, que demostró un ascenso de temperatura en cada intervalo de número de ciclos. Sin embargo, la dispersión de datos en la tasa de temperatura se debe a que se requiere de una mayor precisión en el equipo de medición de temperatura, por lo que se comenta que es un factor importante a considerar en este tipo de estudios.

Se presentó un aumento repentino de temperatura al final de la vida de fatiga, acompañado de la

modelos de propagación de grietas [19-20] o en predicciones de vida a la fatiga reportado en la literatura [33-35].

fractura total de la pieza. Este comportamiento se puede utilizar como una advertencia inmediata de una falla inminente, y puede ser útil, por ejemplo, para interrumpir el funcionamiento de la maquinaria o reemplazar piezas agrietadas en un proceso de mantenimiento, a fin de evitar fallas catastróficas.

## 7. Agradecimientos

Al CONACYT por la beca número 1080300. Al Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC) por el apoyo en las pruebas experimentales en sus instalaciones.

## 8. Reconocimiento de autoría

*Darío Antonio García Lavariega*: Borrador original; Escritura; Análisis formal; metodología. *Arturo Abúndez Pliego*: Revisión y edición, supervisión. *Christian Jesús García López*: Ideas; supervisión. *Jan Mayén Chaires*: Ideas.

## Referencias

- [1] W. Schütz, "A history of fatigue," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 54, no. 2, pp. 263–300, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00178-6)
- [2] U. Zerbst, M. Madia, C. Klinger, D. Bettge, and Y. Murakami, "Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. I: Basic aspects," *Engineering Failure Analysis*, vol. 97, pp. 777–792, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.055>
- [3] C. S. Pande, "Fundamentals of Fatigue Crack Initiation and propagation: Some thoughts,"



*Fatigue of Materials II*, pp. 3–15, 2013.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-48105-0\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48105-0_1)

[4] A. Bhaduri, “Mechanical properties and working of metals and alloys,” *Springer Series in Materials Science*, 2018.  
<https://doi.org/10.1007/978-981-10-7209-3>

[5] P. Paris and F. Erdogan, “A critical analysis of crack propagation laws,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 85, no. 4, pp. 528–533, 1963.  
<https://doi.org/10.1115/1.3656900>

[6] R. Idris, S. Abdullah, P. Thamburaja, and M. Z. Omar, “Prediction of fatigue crack growth rate based on entropy generation,” *Entropy*, vol. 22, no. 1, p. 9, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/e22010009>

[7] B. Hajshirmohammadi and M. M. Khonsari, “A simple approach for predicting fatigue crack propagation rate based on thermography,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 107, p. 102534, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102534>

[8] H. Salimi, M. Pourgol-Mohammad, and M. Yazdani, “Metal fatigue assessment based on temperature evolution and thermodynamic entropy generation,” *International Journal of Fatigue*, vol. 127, pp. 403–416, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.022>

[9] J. J. R. Faria, L. G. A. Fonseca, A. R. de Faria, A. Cantisano, T. N. Cunha, H. Jahed, and J. Montesano, “Determination of the fatigue behavior of mechanical components through infrared thermography,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 134, p. 106018, 2022.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.106018>

[10] R. Cappello, G. Meneghetti, M. Ricotta, and G. Pitarresi, “On the correlation of temperature

harmonic content with energy dissipation in C45 steel samples under fatigue loading,” *Mechanics of Materials*, vol. 168, p. 104271, 2022.  
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.09>

[11] A. Sendrowicz, A. O. Myhre, S. W. Wierdak, and A. Vinogradov, “Challenges and accomplishments in mechanical testing instrumented by in situ techniques: Infrared thermography, digital image correlation, and acoustic emission,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 15, p. 6718, 2021.  
<https://doi.org/10.3390/app11156718>

[12] G. Meneghetti and M. Ricotta, “Estimating the intrinsic dissipation using the second harmonic of the temperature signal in tension-compression fatigue. part II: Experiments,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 44, no. 8, pp. 2153–2167, 2021.  
<https://doi.org/10.1111/ffe.13484>

[13] G. Meneghetti, M. Ricotta, and G. Pitarresi, “On relation between J-integral and heat energy dissipation at the crack tip in stainless steel specimens,” *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 13, no. 49, pp. 82–96, 2019.  
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.09>

[14] K. N. Pandey and S. Chand, “Analysis of temperature distribution near the crack tip under constant amplitude loading,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 31, no. 5, pp. 316–326, 2008.  
<https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01218.x>

[15] G. Meneghetti and M. Ricotta, “A heat energy dissipation approach to elastic-plastic fatigue crack propagation,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 105, p. 102405, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102405>



- [16] B. Wisner, K. Mazur, and A. Kontsos, “The use of Nondestructive Evaluation Methods in fatigue: A Review,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 43, no. 5, pp. 859–878, 2020. <https://doi.org/10.1111/ffe.13208>
- [17] B. Hajshirmohammadi and M. M. Khonsari, “Thermographic evaluation of metal crack propagation during cyclic loading,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 105, p. 102385, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102385>
- [18] Z. Boussattine, N. Ranc, and T. Palin-Luc, “About the heat sources generated during fatigue crack growth: What consequences on the stress intensity factor?,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 109, p. 102704, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102704>
- [19] R. Idris, S. Abdullah, P. Thamburaja, and M. Z. Omar, “Predicting fatigue crack growth rate under block spectrum loading based on temperature evolution using the degradation-entropy generation theorem,” *International Journal of Fracture*, vol. 228, no. 2, pp. 145–158, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10704-021-00525-y>
- [20] B. Hajshirmohammadi and M. M. Khonsari, “On the entropy of Fatigue Crack propagation,” *International Journal of Fatigue*, vol. 133, p. 105413, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105413>
- [21] ASTM E647-15. Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. 2015. <https://www.astm.org/e0647-15.html>
- [22] K. Parthiban, S. Mohan Kumar, A. Rajesh Kannan, N. Siva Shanmugam, and K. Sankaranarayanan, “Microstructure and fatigue behaviour of spin-arc welded AISI C1018 Low Carbon Steel,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 235, no. 6, pp. 2035–2044, 2021. <https://doi.org/10.1177/09544089211027786>
- [23] ASTM A29/A29M. Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought. 2015. [https://www.astm.org/a0029\\_a0029m-16.html](https://www.astm.org/a0029_a0029m-16.html)
- [24] ASM International, “*ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*,” 10th ed.; ASM International: Materials Park, OH, USA, 1990. [https://www.asminternational.org/home/-/journal\\_content/56/10192/06181G/PUBLICATIION](https://www.asminternational.org/home/-/journal_content/56/10192/06181G/PUBLICATIION)
- [25] ASM International, “*ASM Handbook. Volume 19: Fatigue and Fracture*”. Materials Park Ohio: ASM International, 1996. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v19.9781627081931>.
- [26] B. M. Schönbauer, M. Fitzka, U. Karr, and H. Mayer, “Variable amplitude very high cycle fatigue of 17-4PH steel with a stepwise S-N curve,” *International Journal of Fatigue*, vol. 142, p. 105963, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105963>
- [27] H. A. Richard and M. Sander, “Fatigue crack growth under cyclic loading with constant amplitude,” *Fatigue Crack Growth*, pp. 113–151, 2016. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32534-7\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32534-7_4)
- [28] M. Mehdizadeh, A. Haghshenas, and M. M. Khonsari, “On the effect of internal friction on torsional and axial cyclic loading,” *International Journal of Fatigue*, vol. 145, p. 106113, 2021.



<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106113>

[29] P. Sivák and E. Ostertagová, “Evaluation of fatigue tests by means of mathematical statistics,” *Procedia Engineering*, vol. 48, pp. 636–642, 2012.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.564>

[30] H. Salimi, M. Pourgol-Mohammad, and M. Yazdani, “Low-cycle fatigue assessment of metallic materials based on thermodynamic entropy generation – methodology and model development,” *International Journal of Fatigue*, vol. 144, p. 106058, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106058>

[31] C. Basaran, “Entropy based fatigue, fracture, failure prediction and Structural Health Monitoring,” *Entropy*, vol. 22, no. 10, p. 1178, 2020.

<https://doi.org/10.1007/s10704-021-00525-y>

[32] J. Y. Jang and M. M. Khonsari, “Experimentally validated thermodynamic theory of metal fatigue,” *Mechanics of Materials*,

vol. 160, p. 103927, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103927>

[33] J. Liu and X. Liu, “An improved method for fatigue life prediction of metal materials based on thermodynamic entropy,” *International Journal of Fatigue*, vol. 170, p. 107546, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107546>

[34] A. Nourian-Avval and M. M. Khonsari, “Rapid prediction of fatigue life based on thermodynamic entropy generation,” *International Journal of Fatigue*, vol. 145, p. 106105, 2021.

<https://doi.org/10.3390/e22101178>

[35] M. Mehdizadeh, A. Haghshenas, and M. M. Khonsari, “In-situ technique for fatigue life prediction of metals based on temperature evolution,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 192, p. 106113, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106113>

Derechos de Autor (c) 2023 Darío Antonio García Lavariega, Arturo Abúndez Pliego, Christian Jesús García López, Jan Mayén Chaires



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)