



Review and Assesment of Fatigue Damage Models for Metallic Materials Through Energy Methods Based on Entropy

Víctor I. Rodríguez-Reyes and Arturo Abúndez-Pliego

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

September 23, 2023

Revisión y evaluación de modelos de daño a la fatiga en materiales metálicos a través de métodos energéticos basados en la entropía

Víctor I. Rodríguez-Reyes. Arturo Abúndez-Pliego

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Prolongación Palmira Esq. Apatzingán S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, 62480, México; (d18ce030@cenidet.tecnm.mx, arturo.ap@cenidet.tecnm.mx).

Resumen: En este trabajo se presenta una revisión de la literatura sobre modelos para la estimación del daño de materiales metálicos sometidos a fatiga basados en la generación de entropía, los cuales corresponden a investigaciones realizadas por grupos líderes a nivel internacional. Se evaluaron tres enfoques, empleando datos de entropía existentes en la literatura de aluminio 6061-T6 sometido a fatiga a flexión, a amplitud de carga constante. Se muestran y discuten las características, semejanzas y diferencias de los modelos evaluados. Se propone extender los estudios de fatiga empleando la termodinámica, ya que aporta una base teórica que parte de principios físicos, contrario a las metodologías tradicionales para generar modelos empíricos, en las que se requiere una gran cantidad de datos experimentales para ajustar curvas.

Palabras clave: Daño mecánico, fatiga, entropía, termodinámica.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga es un proceso de acumulación del daño en un material sometido a cargas cíclicas, el cual conduce a una falla por fractura, incluso en casos donde el material está sometido a una carga que no supere el límite elástico. La fatiga llega a causar hasta el 90% del total de fallas reportadas en estructuras y componentes de ingeniería (Zakaria *et al.*, 2016). En la falla por fatiga los daños se desarrollan lentamente durante los primeros ciclos, y se aceleran cerca del final de la vida útil (ver Fig. 1). En la etapa I se presenta la iniciación de una grieta, la cual está localizada usualmente en un área pequeña con concentración de esfuerzos elevados. En la etapa II se propaga la grieta dominante, además de que se forma la característica más típica del daño por fatiga, las *marcas de playa*. En la etapa III se lleva a cabo la fractura súbita.

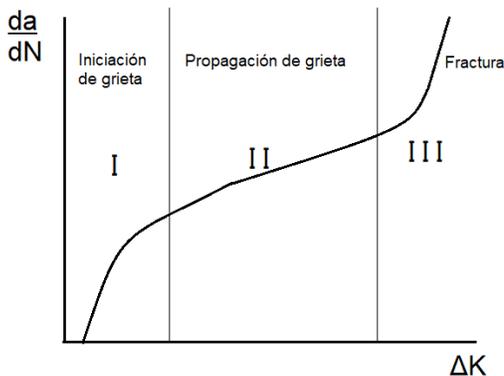


Fig. 1. Crecimiento característico de la grieta.

Desde las primeras investigaciones de fatiga de August Wöhler en 1860, quien planteó las bien conocidas curvas de esfuerzo-vida ($S - N$), se han desarrollado una serie de modelos para la estimación de la vida a la fatiga, en su mayoría basados en trabajos experimentales. Uno de los primeros modelos que representó datos experimentales de fatiga es el de Basquin (1910), el cual relaciona el esfuerzo aplicado con el número de ciclos a la falla a través de un par de parámetros empíricos A y b , que representan un coeficiente y un exponente de resistencia a la fatiga. Otro modelo que se puede mencionar es la regla de daño lineal de Miner (1945), donde el parámetro de daño D se obtiene sumando los cocientes entre los ciclos aplicados n_i y los ciclos a la falla N_i para cada i -ésimo nivel de esfuerzo. Cuando $D = 1$, se origina la falla. Este modelo es el más tradicional y fácil de implementar, por lo que muchos trabajos reportados en la literatura lo toman como base, aunque es el menos exacto, debido a la suposición de la linealidad. Otro de los principales modelos para el diseño y análisis de vida a la fatiga es la relación de Coffin-Manson (Manson, 1962; Tavernelli & Coffin, 1962) entre la duración a la fatiga y la deformación total. La ley de Paris (Paris & Erdogan, 1963) se emplea en el método de crecimiento de grieta, en el cual se asume que una grieta ya se ha generado y detectado. Se expresa en términos de constantes empíricas del material y del intervalo de intensidad de esfuerzos ΔK_i , que se obtiene de la mecánica de la fractura.

Los modelos descritos son de los más populares y son sólo una muestra de todos los que se han propuesto para la estimación de la vida a la fatiga. Sin embargo, ninguno ha recibido aceptación universal, ya que sacrifican el rango de aplicabilidad en favor de ganar precisión en la estimación de la vida a la fatiga, generando las siguientes dificultades (Cui, 2002): la predicción de vida útil

bajo cargas de amplitud variable y multiaxiales, la transferencia de información de probetas pequeñas a componentes o estructuras reales, la influencia de la corrosión y de la fluencia viscosa (creep), así como el tipo de distribución probabilística y el tratamiento de las dispersiones observadas experimentalmente. Muchos modelos se enfocan en cargas uniaxiales y se basan en que el material es homogéneo. Además, algunos de los más conocidos aún presentan deficiencias y limitaciones al considerar los efectos de la secuencia e interacción de cargas. Se han propuesto varios enfoques, como las teorías basadas en energía, las cuales tienen el potencial de unificar el daño causado por diferentes tipos de cargas (Basaran & Yan, 1998; Bryant et al., 2008).

En este trabajo se presenta una revisión sobre enfoques energéticos para el estudio de fatiga. Se discuten las semejanzas, diferencias, alcances y limitaciones de tres de ellos. Para esto, se emplearon datos de la evolución de la acumulación de la entropía existentes en la literatura de aluminio 6061-T6, sometido a cargas cíclicas de flexión totalmente invertidas. Se distinguen las principales variables y parámetros empleados por cada uno de los grupos de investigación. Los tres modelos de daño evaluados se deducen de manera particular, lo que hace que presenten una tendencia de evolución diferente. En los tres casos, se realizan suposiciones con el fin de simplificar el cálculo de la entropía, limitando el rango de aplicación de los modelos. El objetivo del trabajo radica en conocer y discutir los enfoques existentes más recientes en el uso de la entropía como índice de daño para el estudio de la fatiga de materiales metálicos. Esta revisión puede ser útil para el lector en la selección de algún modelo, dependiendo de las características del tipo de estudio que se pretenda realizar.

2. TERMODINÁMICA

La termodinámica es una rama de la física encargada del estudio de la interacción entre el calor y otras manifestaciones de la energía y se basa en cuatro leyes principales. Para el estudio de los sólidos, en conjunción con la mecánica del medio continuo, generalmente se emplean dos leyes: la primera ley, o la ley de la conservación de la energía; y la segunda ley, o la ley de la entropía o de la irreversibilidad de un proceso.

La primera ley de la termodinámica es la correspondiente a la conservación de la energía, la cual establece que la energía puede transformarse de una forma a otra, pero no puede ser creada o destruida. Se expresa mediante (1), donde E es la energía interna, K la energía cinética, Q el flujo de calor y $P_{(x)}$ el trabajo hecho por fuerzas externas (Lemaitre & Chaboche, 1990).

$$(d/dt)(E + K) = P_{(x)} + Q \quad (1)$$

La segunda ley explica los fenómenos de naturaleza irreversible y de degradación y deriva en otra propiedad llamada entropía, la cual dicta la dirección de un proceso, cuantificando la energía disipada como calor que no se puede convertir en trabajo útil. Por ello, esta propiedad se relaciona con una *flecha del tiempo* y

se recurre a ella para determinar la evolución de un sistema durante un proceso irreversible (Khonsari & Amiri, 2013).

La entropía se expresa como una variación de la energía con respecto a una variación de temperatura, de acuerdo con (2), donde ρ es la densidad, s la entropía específica, J_q el flujo de calor y T la temperatura. Esta ecuación plantea la irreversibilidad en la entropía de un sistema, ya que el cambio de entropía será más grande que para un proceso reversible. (Lemaitre & Chaboche, 1990).

$$\rho \frac{ds}{dt} \geq -div \left(\frac{J_q}{T} \right) \quad (2)$$

Como se ha reportado en la literatura (Basaran & Yan, 1998; Bryant et al., 2008; Naderi et al., 2010), el daño por fatiga es un proceso termodinámicamente irreversible que está acompañado por disipación de energía, llevando a la generación de entropía. Ésta ofrece una medida de la degradación de los materiales con la que se puede predecir la vida a la fatiga. Es útil como indicador de daño, ya que es independiente de varios parámetros involucrados en el proceso.

3. RESUMEN DE MODELOS BASADOS ENTROPÍA

En los últimos años se han realizado estudios para plantear modelos de estimación de vida a la fatiga partiendo de principios termodinámicos. Por ejemplo, Basaran y Yan (1998) plantearon una medida de daño por fatiga basada en la segunda ley de la termodinámica y la mecánica estadística. Para ello se asume al cuerpo sólido como un sistema termodinámico en el que la producción de entropía es no negativa. Mediante la ecuación de Boltzmann y la energía libre de Helmholtz, desarrollaron un parámetro de daño en función de la entropía y de propiedades del material. Bryant et al. (2008) desarrollaron el *teorema de degradación-generación de entropía (DEG)*, por sus siglas en inglés), que relaciona la generación de entropía con procesos de degradación irreversible a través de fuerzas termodinámicas generalizadas y fuerzas de degradación. Naderi et al. (2010) postularon que la entropía en el punto de fractura en metales que experimentan cargas cíclicas repetidamente es constante, independientemente de la geometría de las probetas, tipo y amplitud o frecuencia de carga, concepto nombrado como *Entropía de Fractura a la Fatiga (FFE)*, por sus siglas en inglés). Con base en esta hipótesis, se propuso una metodología para la prevención de fallas en metales que experimentan cargas cíclicas (Naderi & Khonsari, 2011).

La entropía ha sido útil para evaluar la evolución del daño por fatiga de materiales metálicos sometidos a cargas uniaxiales de amplitud constante (Naderi & Khonsari, 2010a; Temfack & Basaran, 2015) y de amplitud variable (Naderi & Khonsari, 2010b). Además, se ha empleado como índice de daño para estudiar la fatiga en ambientes corrosivos y con fines de monitoreo de la salud estructural (Imanian & Modarres, 2015, 2018). Por otra parte, se han desarrollado modelos para la estimación de la velocidad del crecimiento de la grieta en función del flujo de entropía, partiendo del teorema DEG

(Hajshirmohammadi & Khonsari, 2020; Idris *et al.*, 2019). Los resultados mostraron una relación lineal entre el flujo de entropía y la velocidad del crecimiento de la grieta por fatiga. Por lo tanto, el flujo de la entropía es un parámetro prometedor para la predicción de la velocidad de crecimiento de la grieta, tanto en fatiga de bajo y alto ciclaje.

Sin embargo, en alto ciclaje existe disipación de energía asociada tanto a las deformaciones microplásticas como a la fricción interna. Se ha determinado que la fricción interna es despreciable en fatiga de bajo ciclaje, pero se acumula con el tiempo y se vuelve notable en fatiga de alto ciclaje, por lo que se sugiere considerarla para el cálculo de la FFE (Jang & Khonsari, 2018; Ontiveros *et al.*, 2017).

A continuación se presenta la comparación de tres enfoques que han sido desarrollados por distintos grupos de investigación, los cuales emplean la evaluación de la entropía como índice de daño, partiendo de un modelado teórico.

3.1 Enfoque de Naderi y Khonsari

Naderi y Khonsari (2010a, 2010b) mostraron que la generación de entropía puede usarse de manera efectiva para evaluar la evolución del daño por fatiga. Calcularon la entropía γ de acuerdo con (3), la cual es la desigualdad de Clausius-Duhem,

$$D = \sum_{k=1}^n \left\{ D_{N_{k-1}} + \frac{D_c - D_{N_{k-1}}}{\ln \left[\frac{(1 - (s_{ic}/s_g))}{(1 - (s_{k-1}/s_g))} \right]} \ln \left[\frac{1 - (s/s_g)}{1 - (s_{k-1}/s_g)} \right] \right\} \quad (4)$$

Naderi y Khonsari evaluaron la vida a la fatiga con cargas cíclicas a flexión, tensión-compresión y torsión en amplitud constante y con historiales de carga con amplitud variable, con probetas de aluminio 6061 y acero inoxidable 304. Los autores encontraron que el daño para distintas geometrías de probetas, sometidas a diferentes tipos, amplitudes y secuencias de bloques de carga, evoluciona de una manera general para todos los casos al normalizar la acumulación de entropía. También observaron que el parámetro de daño crece con una pendiente constante hasta que alcanza aproximadamente el 90% de la FFE. En este punto, el daño crece rápidamente hasta alcanzar la unidad. Este cambio coincide con el punto en el que la macrogrieta comienza a crecer hasta la falla.

3.2 Enfoque de Temfack y Basaran

Temfack y Basaran (2015) presentaron un modelo para fatiga basado en la generación de entropía, apoyándose en un método físico que combina la mecánica estadística con las leyes de la termodinámica. Obtuvieron la desigualdad de Clausius-Duhem para la estimación de la entropía, de acuerdo con (5), donde σ es el tensor de esfuerzos, ε^P el tensor de deformación plástica, k el coeficiente de conductividad térmica, ρ la densidad, r la fuente interna de calor y T la temperatura.

donde σ es el tensor de esfuerzos, $\dot{\varepsilon}_p$ la evolución de la deformación plástica, \dot{V}_k la evolución de las variables internas, A_k la fuerza termodinámica asociada con las variables internas, J_q el flujo de calor y T la temperatura del sistema.

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma: \dot{\varepsilon}_p}{T} - \frac{A_k \dot{V}_k}{T} - J_q \cdot \frac{\nabla T}{T^2} \geq 0 \quad (3)$$

La ecuación (3) es válida para fatiga de bajo ciclaje. En su estudio, Naderi y Khonsari consideraron que la generación de entropía debida a variables internas es pequeña, y que no existe transferencia de calor, siendo la entropía calculada solo en función de la disipación por deformación plástica. Propusieron un parámetro de daño adimensional D en función de la generación de entropía, definido en (4). Para su desarrollo, tomaron como base un modelo de daño de la literatura (Duyi & Zhenlin, 2001) que está en función del agotamiento de la tenacidad. En el modelo de Naderi y Khonsari se suman todas las variaciones de daño k para cada etapa de carga n , donde s_{k-1} representa la entropía acumulada para la etapa $k-1$, D_c es el valor del daño crítico, el cual debe ser ≤ 1 , s es la generación de entropía, s_{ic} es el valor crítico de la generación de entropía y s_g es la generación total de entropía en el punto de la fractura.

$$\gamma = \frac{\sigma: \varepsilon^P}{T} + \frac{k}{T^2} |\overrightarrow{\text{grad}T}|^2 + \frac{\rho r}{T} \geq 0 \quad (5)$$

Para el parámetro de evolución del daño D , los autores plantearon una razón de cambio entre el desorden presente W y el desorden de un estado inicial W_o . La representación matemática de este planteamiento se presenta en (6), donde $(s_i - s_{i0})$ es la diferencia de la producción de entropía, m_s la masa molar y R la constante universal de los gases. La obtención de esta ecuación, con dichos parámetros, se debe al uso de la ecuación de Boltzmann.

$$D = \frac{W - W_o}{W} = 1 - \exp \left(-(s_i - s_{i0}) \frac{m_s}{R} \right) \quad (6)$$

Este modelo de daño es igual a cero en el estado inicial del material e incrementa progresivamente hasta alcanzar el valor de la unidad en el momento de la falla. Temfack y Basaran probaron el modelo con probetas de acero estructural A36 en fatiga de bajo ciclaje, con cargas uniaxiales a tensión-compresión, siendo controladas mediante desplazamientos. En la estimación de la entropía, los autores despreciaron el flujo de calor con los alrededores, así como la variación de la temperatura, quedando solo en función de la disipación plástica, por lo que no es aplicable en fatiga de alto ciclaje, ya que se necesitaría estimar la entropía considerando otros procesos disipativos. Los autores

también sugieren que para una aplicación práctica, su parámetro de daño debería multiplicarse por un factor de seguridad. Este parámetro de daño tiene una tendencia particular a crecer aceleradamente durante los primeros ciclos de la prueba hasta alcanzar un valor asintótico cercano a la unidad.

3.3 Enfoque de Imanian y Modarres

Imanian y Modarres (2018) estudiaron el proceso combinado de corrosión-fatiga, proponiendo una variable de daño para el pronóstico y la gestión de la salud estructural, con una base en la evolución de la generación de entropía, como se muestra en (7), donde γ_d es la generación de entropía, γ_{d_0} la entropía en el punto inicial, y γ_{d_E} el valor del límite de la entropía. En este modelo, la falla ocurre cuando la generación total de entropía alcanza el nivel del límite de entropía.

$$D = \frac{\gamma_d - \gamma_{d_0}}{\gamma_{d_E} - \gamma_{d_0}} \quad (7)$$

La desigualdad de Clausius-Duhem para la estimación de la entropía se presenta en (8), donde T es la temperatura, J_q el flujo de calor, $J_{M,a}$ es la corriente anódica y $J_{M,c}$ la corriente catódica de activación para la reacción de oxidación, $J_{O,a}$ es la corriente anódica y $J_{O,c}$ la corriente catódica de activación para la reacción de reducción, \tilde{A}_M es la afinidad electroquímica para la reacción de oxidación y \tilde{A}_O para la reacción de reducción, α_M es un coeficiente de transporte de carga para la reacción de oxidación y α_O para la reacción de reducción, σ_Ω la energía de disipación óhmica, $E_{Mconc,c}$ es el sobrepotencial de oxidación catódica, $E_{Oconc,c}$ el sobrepotencial de difusión de reducción, τ el tensor de esfuerzos, $\dot{\epsilon}_p$ la tasa de deformación plástica y $\sigma_{M,e}$ la energía disipada resultado de la deformación elástica (Imanian & Modarres, 2015). En (8) se involucran pérdidas de calor, pérdidas electroquímicas resultado de un potencial de activación, y de un sobrepotencial óhmico, pérdidas por difusión y pérdidas mecánicas.

$$\begin{aligned} \sigma = & \frac{1}{T^2} J_q \nabla T + \frac{1}{T} (J_{M,a} \alpha_M \tilde{A}_M + J_{M,c} (1 - \alpha_M) \tilde{A}_M \\ & + J_{O,a} \alpha_O \tilde{A}_O + J_{O,c} (1 - \alpha_O) \tilde{A}_O) + \frac{\sigma_\Omega}{T} \\ & + \frac{1}{T} (J_{M,c} E_{Mconc,c} + J_{O,c} E_{Oconc,c}) \\ & + \frac{\dot{\epsilon}_p \cdot \tau}{T} + \frac{\sigma_{M,e}}{T} \end{aligned} \quad (8)$$

Imanian y Modarres probaron el modelo experimentalmente con aluminio 7075-T651. Calcularon la entropía en términos del área de la curva de histéresis debida a los esfuerzos y deformaciones mecánicas, y a la variación de la corriente eléctrica y el potencial corrosivo en cada ciclo de carga. Obtuvieron una distribución fina de los resultados de entropía, que justifica la capacidad de esta propiedad para tratar las incertidumbres asociadas con las variabilidades del microestado, además de una independencia a la condición de carga. Por otra parte, explicaron la dispersión

obtenida, entre otras cosas, por errores en los instrumentos de medida, las consideraciones hechas en la evaluación de la entropía, el control del experimento, condiciones ambientales y operacionales y al error humano.

La evolución de este parámetro de daño presenta una tendencia lineal desde el comienzo de la prueba hasta el punto de la falla.

4. COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS PRESENTADOS

Khonsari y Amiri (2013) experimentaron con probetas de aluminio 6061-T6, sometidas a flexión a diferentes amplitudes de desplazamiento, con una relación de esfuerzos totalmente reversible en bajo ciclaje, a frecuencia de 10 Hz (ver Fig. 2). Calcularon la generación de entropía cíclica, considerando solamente la disipación plástica, a través de la energía de histéresis y la medición de la temperatura con una cámara de termografía infrarroja. Se observa que la tasa de cambio es diferente para cada nivel de desplazamiento, pero finalmente alcanzando una entropía acumulada media de $4.07 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$ en el punto de la fractura (ver Fig. 3).

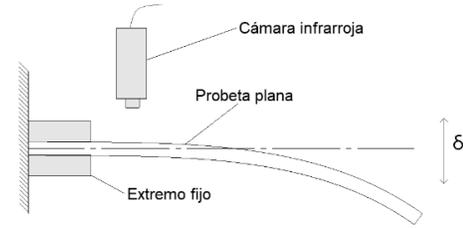


Fig. 2. Diagrama esquemático de la configuración experimental.

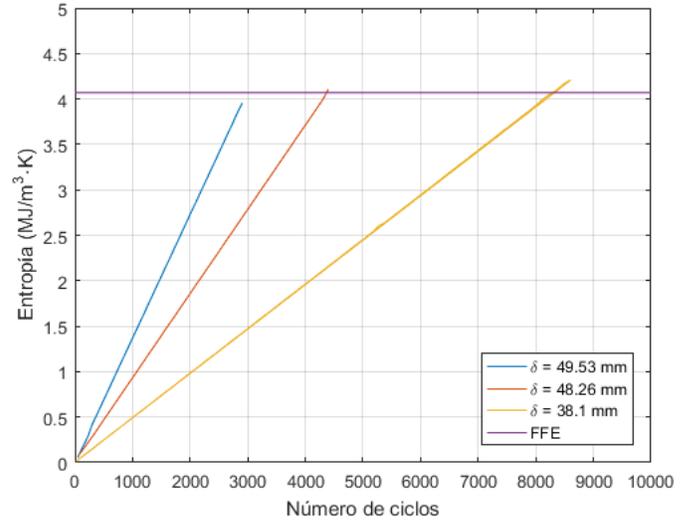


Fig. 3. Evolución de la acumulación de entropía hasta la fractura para probetas de aluminio 6061-T6 en pruebas de flexión cíclica (Khonsari & Amiri, 2013).

En el presente trabajo se emplearon los datos de la prueba con desplazamiento de 49.53 mm para evaluar los tres modelos de daño descritos anteriormente. Khonsari y Amiri (2013)

reportaron que, para estas condiciones, el material alcanza una vida a la fatiga de 2910 ciclos y un valor de entropía máximo de $3.97 \text{ MJ}/\text{m}^3\text{K}$. Los tres modelos discutidos emplean la entropía como la variable independiente. La evolución del parámetro de daño para cada uno de ellos se presenta en la Fig. 4. Se añade la evolución del daño del parámetro de Duyi y Zhenlin (2001) como referencia, cuyo modelo fue obtenido experimentalmente del agotamiento de la tenacidad del material.

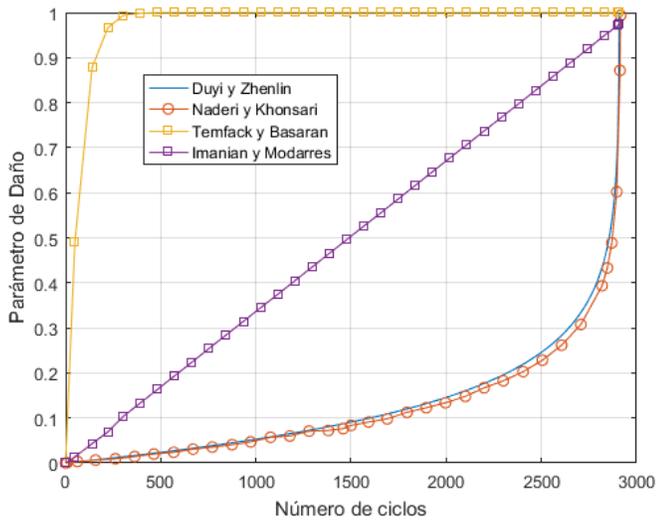


Fig. 4. Evolución del parámetro de daño para los tres modelos comparados.

Se observa que el parámetro de daño de Naderi y Khonsari crece con pendiente constante hasta aproximadamente el 90% de la vida a la fatiga (aproximadamente en 2600 ciclos), momento en el cual presenta un incremento súbito hasta la fractura, donde el valor del daño se aproxima a la unidad. En cambio, el parámetro de Temfack y Basaran crece de manera acelerada durante los primeros ciclos, aproximándose al valor de la unidad en alrededor de 663 ciclos. Éste es un valor muy lejano al número de ciclos a la falla, incluso al del punto crítico en el 90% de la vida útil que se aprecia con el parámetro de Naderi y Khonsari. A partir de este punto, el comportamiento del daño de Temfack y Basaran es asintótico en $D = 1$ hasta alcanzar la FFE.

El parámetro de Imanian y Modarres crece de manera lineal a lo largo de toda la vida a la fatiga del material. Esto es debido a que, para este caso, se está considerando un material prístino con daño inicial igual a cero. Esto quiere decir que (7) se convierte en un cociente entre el valor de la entropía en el instante medido y el del límite de entropía, relación análoga a la regla del daño lineal de Miner.

Se realizó un análisis de correlación entre cada uno de los parámetros de daño y la entropía. El modelo de Naderi y Khonsari tiene un valor R de 0.771, el de Temfack y Basaran de 0.416, y el de Imanian y Modarres de 1. El modelo de Imanian y Modarres tiene dicha correlación debido a que se asemeja a una relación lineal. El modelo de Naderi y Khonsari supera una correlación de 0.7, lo que indica una relación fuerte entre las

variables. El modelo de Temfack y Basaran está muy por debajo de ese valor, por lo que su relación sería de moderada a débil.

5. DISCUSIÓN SOBRE LOS MODELOS PRESENTADOS

Los tres modelos presentados emplean la entropía como índice de daño, cuantificándola mediante las leyes de la termodinámica. Con ellas, todos los autores plantean una desigualdad de Clausius-Duhem acorde a las condiciones del problema estudiado. En los tres estudios se consideró carga uniaxial y material continuo homogéneo.

Naderi y Khonsari derivaron su modelo de daño de otro de la literatura y aprovechan la FFE como una propiedad del material, que es constante en el punto de la fractura, independientemente de la geometría de la probeta, amplitud, frecuencia y tipo de carga. Calcularon la entropía considerando a la deformación plástica como el único proceso de disipación de energía. Con ello, estiman el punto de daño crítico conforme se alcanza la FFE. Tras este punto, la pendiente de la evolución del daño crece a un ritmo más acelerado con respecto a su comportamiento previo, alcanzando el valor de la unidad en unos pocos ciclos. De esta forma, se tiene la ventaja de retirar de operación a una pieza sometida a fatiga con suficiente anticipación a la falla. La principal limitación del modelo es que ha sido evaluado con escenarios de carga específicos, por lo que se requiere de más secuencias de cargas y probar otro tipo de condiciones de temperatura y atmosféricas. Por otra parte, sería idóneo extender el modelo al régimen de alto ciclaje, donde los niveles de esfuerzo no serían suficientes para estimar la entropía considerando solamente disipación plástica, además de que habría muy poca variación de temperatura.

Temfack y Basaran emplearon la ecuación de Boltzmann para incorporar la entropía como índice de daño en su modelo. Para el cálculo de la entropía realizaron suposiciones de tal manera que sólo se requiera la disipación plástica. Esto ocasiona que su modelo sea aplicable sólo en bajo ciclaje. El parámetro de daño se planteó a partir de la variación del estado de desorden presente con respecto a un estado de referencia inicial. La evolución del parámetro de daño es atípica, comparada con otros modelos, dado su crecimiento acelerado en los primeros ciclos de carga, hasta alcanzar un valor asintótico en la unidad. Este comportamiento es matemáticamente correcto, debido al exponencial negativo, pero es contrario a las mediciones experimentales y del comportamiento del crecimiento de la grieta. Se requiere revisar su formulación, ya que, si bien es matemáticamente correcta, minimiza en gran medida los ciclos a la falla del material. Por otra parte, se puede extender el modelo a escenarios de alto ciclaje, donde la producción de entropía debe calcularse en función del trabajo elástico, además de considerar materiales anisotrópicos.

Imanian y Modarres estudiaron el proceso combinado de corrosión-fatiga, por lo que su desigualdad de Clausius-Duhem está compuesta por una serie de términos que incluyen procesos disipativos electroquímicos y eléctricos. Ellos también emplean un concepto de límite de fatiga, mediante el cual argumentan que

la probabilidad de la falla se incrementará conforme la entropía acumulada en el proceso de degradación del material alcanza dicho límite. La desigualdad de Clausius-Duhem formulada incluye un término para la disipación de energía por deformaciones elásticas, lo que la haría aplicable en cierta medida en el régimen de alto ciclaje. El modelo de daño es bastante simple, lo que resulta en una evaluación semejante a la de la regla del daño lineal de Miner. Esto resulta en una aplicabilidad sencilla, aunque no permite observar algún punto de daño crítico en el material.

El modelo de Naderi y Khonsari es muy ventajoso, ya que permite distinguir un punto crítico en la evolución del daño que posibilita al usuario tomar una decisión anticipada. El modelo de Imanian y Modarres es simple, pero de comportamiento lineal. En cambio, si se quisiera emplear el modelo de Temfack y Basaran, se deben tomar precauciones, debido a que resulta en una evolución del daño bastante acelerada en los primeros ciclos de carga.

Naderi y Khonsari, probaron su modelo para ciertas secuencias de bloques de cargas. Temfack y Basaran solo probaron su modelo con cargas de amplitud constante. Por otra parte, Imanian y Modarres demuestran que el enfoque de daño con entropía es aplicable a escenarios con cargas más allá de las mecánicas; en su caso, someten una serie de probetas a cargas mecánicas y a corrosión a la vez.

Aunque los modelos de Temfack y Basaran y de Imanian y Modarres no se probaron para cargas de amplitud variable, incluyen un término para un estado inicial de daño. Si se cuantifica la acumulación de entropía tras cierta cantidad de ciclos a una carga dada, se podría emplear este valor para el estado inicial de un segundo bloque de cargas. Por lo tanto, sería útil extender el estudio en estos modelos para verificar su aplicabilidad en escenarios de carga de amplitud variable y con secuencias de bloques aleatorias.

6. CONCLUSIONES

El proceso de fatiga de los materiales es un fenómeno irreversible, en el que hay disipación de energía involucrada. Varios autores han planteado que este problema pueda ser tratado a partir de las leyes de la termodinámica. Específicamente, es la entropía el parámetro que se relaciona con irreversibilidades, en las que se involucran procesos disipativos. Los resultados obtenidos por los investigadores con estos modelos demuestran que la entropía es un parámetro prometedor para emplearse como índice de daño en procesos de fatiga.

La principal ventaja que tiene este enfoque es que se basa en leyes físicas, lo que permite un modelado teórico. Con esto, se deja atrás el enfoque tradicional que consiste en el ajuste de curvas a datos experimentales, el cual es un método muy arraigado en la comunidad científica e ingenieril.

En los estudios revisados se probaron escenarios de carga simples, con consideraciones para el cálculo de la entropía que no serían válidas para escenarios más complejos. Los métodos

energéticos pueden considerar los diversos procesos de degradación presentes durante la fatiga, tanto a macro, meso y microescala. Es necesario ampliar la aplicabilidad de estas metodologías a una mayor gama de materiales, más escenarios de carga donde se involucren amplitudes y frecuencias variables y aleatorias, cargas combinadas, diferentes geometrías con concentradores de esfuerzos, así como variar las condiciones ambientales y de temperatura de las pruebas, con el fin de emular situaciones de aplicaciones de ingeniería.

AGRADECIMIENTOS

Víctor I. Rodríguez-Reyes manifiesta su reconocimiento y agradecimiento al CONACYT por la beca número 773824 otorgada para sus estudios doctorales.

REFERENCIAS

- Basaran, C., & Yan, C.-Y. (1998). A Thermodynamic Framework for Damage Mechanics of Solder Joints. *Journal of Electronic Packaging*, 120(4), 379–384. <https://doi.org/10.1115/1.2792650>
- Basquin, O. H. (1910). The exponential law of endurance tests. *American Society for Testing and Materials Proceedings*, 10, 625–630.
- Bryant, M. ., Khonsari, M. ., & Ling, F. . (2008). On the thermodynamics of degradation. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 464(2096), 2001–2014. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.0371>
- Cui, W. (2002). A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. *Journal of Marine Science and Technology*, 7(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s007730200012>
- Duyi, Y., & Zhenlin, W. (2001). A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. *International Journal of Fatigue*, 23(8), 679–687. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00027-5)
- Hajshirmohammadi, B., & Khonsari, M. M. (2020). On the entropy of fatigue crack propagation. *International Journal of Fatigue*, 133, 105413. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105413>
- Idris, R., Abdullah, S., Thamburaja, P., & Omar, M. Z. (2019). Prediction of Fatigue Crack Growth Rate Based on Entropy Generation. *Entropy*, 22(1), 9. <https://doi.org/10.3390/e22010009>
- Imanian, A., & Modarres, M. (2015). A Thermodynamic Entropy Approach to Reliability Assessment with Applications to Corrosion Fatigue. *Entropy*, 17(12), 6995–7020. <https://doi.org/10.3390/e17106995>
- Imanian, A., & Modarres, M. (2018). A thermodynamic entropy-based damage assessment with applications to prognostics and health management. *Structural Health Monitoring*,

- 17(2), 240–254. <https://doi.org/10.1177/1475921716689561>
- Jang, J. Y., & Khonsari, M. M. (2018). On the evaluation of fracture fatigue entropy. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 96, 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2018.05.013>
- Khonsari, M. M., & Amiri, M. (2013). *Introduction to Thermodynamics of Mechanical Fatigue*. CRC Press Taylor & Francis Group.
- Lemaitre, J., & Chaboche, J.-L. (1990). *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167970>
- Manson, S. S. (1962). Discussion: “Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue” (Tavernelli, J. F., and Coffin, Jr., L. F., 1962, ASME J. Basic Eng., 84, pp. 533–537). *Journal of Basic Engineering*, 84(4), 537–541. <https://doi.org/10.1115/1.3658702>
- Miner, M. A. (1945). Cumulative fatigue damage. *Journal of applied mechanics*, 12(3), A159–A164.
- Naderi, M., Amiri, M., & Khonsari, M. M. (2010). On the thermodynamic entropy of fatigue fracture. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2114), 423–438. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0348>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2010a). An experimental approach to low-cycle fatigue damage based on thermodynamic entropy. *International Journal of Solids and Structures*, 47(6), 875–880. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.12.005>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2010b). A thermodynamic approach to fatigue damage accumulation under variable loading. *Materials Science and Engineering: A*, 527(23), 6133–6139. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.018>
- Naderi, M., & Khonsari, M. M. (2011). Real-time fatigue life monitoring based on thermodynamic entropy. *Structural Health Monitoring*, 10(2), 189–197. <https://doi.org/10.1177/1475921710373295>
- Ontiveros, V., Amiri, M., Kahirdeh, A., & Modarres, M. (2017). Thermodynamic entropy generation in the course of the fatigue crack initiation. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(3), 423–434. <https://doi.org/10.1111/ffe.12506>
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 528–533. <https://doi.org/10.1115/1.3656900>
- Tavernelli, J. F., & Coffin, L. F. (1962). Experimental Support for Generalized Equation Predicting Low Cycle Fatigue. *Journal of Basic Engineering*, 84(4), 533–537. <https://doi.org/10.1115/1.3658701>
- Temfack, T., & Basaran, C. (2015). Experimental verification of thermodynamic fatigue life prediction model using entropy as damage metric. *Materials Science and Technology*, 31(13), 1627–1632. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000074>
- Zakaria, K. A., Abdullah, S., & Ghazali, M. J. (2016). A Review of the Loading Sequence Effects on the Fatigue Life Behaviour of Metallic Materials. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 9(5), 189–200. <https://doi.org/10.25103/jestr.095.30>