



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Propuesta de modelo para el seguimiento de  
crecimiento de grieta a través del método de la  
energía

presentado por

**Ing. Darío Antonio García Lavariega.**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería  
Mecánica**

Director de tesis

**Dr. Arturo Abúndez Pliego**

Codirector de tesis

**Dr. Jan Mayén Chaires**

Cuernavaca, Morelos, México. Mayo de 2023.

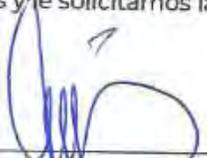


Cuernavaca, Mor., **26/abril/2023**

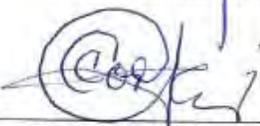
OFICIO No. DIM/029/2023  
Asunto: Aceptación de documento de tesis  
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO  
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Darío Antonio García Lavariéga con número de control M20CE049, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Propuesta de modelo para el seguimiento del crecimiento de grieta por fatiga a través del método de la energía" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que acordamos aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

  
Dr. Arturo Abundez Pliego  
Director de tesis

  
Dr. Jan Mayén Chaires  
Codirector de Tesis

  
Dra. Claudia Cortés García  
Revisor 1

  
Dr. Jorge Colín Ocampo  
Revisor 2

  
Dr. José Antonio Arellano Cabrera  
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.  
Expediente / Estudiante  
Iniciales RCA/mrsr

SEP TecNM CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
**RECIBIDO**  
02 MAY 2023  
LMZ  
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

EDUCACIÓN  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
27 ABR 2023  
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO  
SERVICIOS ESCOLARES  
**RECIBIDO**



Cuernavaca, Mor.,  
No. De Oficio:  
Asunto:

**02/mayo/2023**  
**SAC/056/2023**  
**Autorización de**  
**impresión de tesis**

**DARÍO ANTONIO GARCÍA LAVARIEGA**  
**CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**P R E S E N T E**

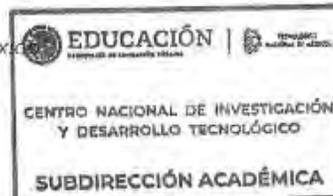
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"PROPUESTA DE MODELO PARA EL SEGUIMIENTO DEL CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA A TRAVÉS DEL MÉTODO DE LA ENERGÍA"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**Excelencia en Educación Tecnológica®**

*"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ciencias Computacionales  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/LMZ

## **Dedicatoria**

Dedico esta tesis a mi esposa Flor Lizzet Méndez Maraver por ser mi principal motivación y apoyo durante esta etapa. Gracias por toda tu paciencia, comprensión y amor.

A mis padres, Darío García Aragón y Elvira Lavariega Ortega por todo el esfuerzo y sacrificio de darme la oportunidad de llegar a ser profesionista. Gracias por formarme como persona y continuar en los momentos difíciles.

A mi hermana Janet Lavariega por apoyarme en mi estancia en la Ciudad de México y motivarme en seguir adelante.

## **Agradecimientos**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me otorgó durante mis estudios de maestría.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por permitir realizar mi posgrado de maestría y desarrollar mi formación académica como profesional e investigador.

Al Dr. Arturo Abúndez Pliego por ser mi asesor, por mostrarme el camino de la investigación, por el apoyo y la confianza para asesorarme en todo el proceso del posgrado, y por sus comentarios constructivos en todo momento.

Al Dr. Jorge Colín Ocampo, Dra. Claudia Cortés García y Dr. José Antonio Arellano Cabrera por formar el comité revisor en este trabajo y mejorar la tesis mediante sus sugerencias y observaciones.

Al Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC) por aceptarme realizar la estancia y permitirme el uso de sus instalaciones para obtener resultados experimentales.

Al Dr. Christian Jesús García López por compartirme de su conocimiento, por sus sugerencias y por acompañarme en la fabricación de las muestras y el proceso experimental de este trabajo.

A mis compañeros del grupo de trabajo de fatiga y materiales compuestos por los consejos, sugerencias y críticas constructivas para mejorar el trabajo.

A mis compañeros Walter, Juliana y Miguel de CIITEC que me dieron su apoyo incondicional cuando más los necesitaba y los consejos para poder obtener los resultados experimentales.

# ÍNDICE

Dedicatoria .....	4
Agradecimientos.....	5
Resumen .....	12
Abstract .....	13
Introducción .....	14
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....	16
1.1. Antecedentes.....	16
1.2. Generalidades de fatiga .....	17
1.2.1. Caracterización de esfuerzos fluctuantes .....	17
1.3. Generalidades de la mecánica de la fractura .....	19
1.3.1. Modos de desplazamiento de la grieta .....	19
1.4. Enfoque basado en la energía .....	22
1.5. Investigaciones actuales de propagación de crecimiento de grieta .....	22
1.6. Efecto disipativo de la fatiga de la microestructura a la macroestructura.....	25
1.7. Tendencia de la temperatura durante una prueba de fatiga .....	26
1.8. Relación de la degradación y entropía en la fatiga.....	27
1.9. Energía plástica disipada .....	29
1.10. Norma ASTM E-647.....	30
1.11. Conclusión del estado del arte .....	31
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	32
2.1. Justificación.....	32
2.2. Objetivos.....	33
2.2.1. General. ....	33
2.2.2. Específicos .....	33
2.3. Alcances .....	33
2.4. Limitaciones .....	33
2.5. Metas .....	33
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO .....	34
3.1. Teorema de Degradación – Generación de Entropía.....	34
3.2. Aplicación del teorema DEG al crecimiento de grieta por fatiga .....	36
3.3. Generación de entropía para la falla por fatiga .....	38
CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL MODELO .....	39
CAPÍTULO V: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO PROPUESTO.....	46

5.1. Diseño experimental.....	46
5.1.1. Especificaciones y propiedades del material.....	47
5.1.2. Geometría y dimensiones de las probetas .....	47
5.1.3. Fabricación de las muestras.....	49
5.1.4. Dimensión de los sujetadores.....	49
5.1.5. Número de probetas .....	49
5.1.6. Preparación de probetas. ....	49
5.2. Cálculo de condiciones de carga .....	51
5.2.1. Cargas de pre agrietamiento.....	51
5.2.2. Cargas de crecimiento de grieta por fatiga.....	53
5.3. Descripción del equipo .....	54
CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	58
6.1. Comparación del modelo propuesto con el modelo de Idris .....	58
6.2. Resultados experimentales del acero AISI 1018.....	60
6.3. Validación experimental del modelo propuesto en acero AISI 1018.....	63
Conclusiones .....	66
Actividades futuras.....	67
Referencias bibliográficas .....	68
ANEXO A: Fabricación de muestras .....	74
ANEXO B: Dimensiones de sujetadores y pernos .....	76
ANEXO C: Comparación de modelos.....	78
ANEXO D: Datos experimentales .....	79

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Esfuerzos cíclicos de amplitud constante [21].....	18
<b>Figura 1.2</b> Ciclos de amplitud constante completamente invertidos [5].....	18
<b>Figura 1.3</b> Representación esquemática de una superficie de fractura por fatiga [23]. ....	19
<b>Figura 1.4</b> Modos de desplazamiento de grieta. Modificado de [24].....	20
<b>Figura 1.5</b> Representación gráfica del crecimiento de grieta [23]. ....	21
<b>Figura 1.6</b> Ejemplo de (a) una imagen microscópica de la grieta por fatiga y (b) un mapa de la temperatura tomado de la superficie opuesta [7]. ....	23
<b>Figura 1.7</b> Diagrama de fractura por fatiga cinética [31].....	23
<b>Figura 1.8</b> La densidad de energía de deformación requerida para que los elementos materiales se fracturen [32].....	24
<b>Figura 1.9</b> Relación entre el crecimiento de grieta y la entropía [8].....	24
<b>Figura 1.10</b> Tasa de generación de entropía [9].....	25
<b>Figura 1.11</b> a) Cambios de temperatura inducidos por el efecto termoelástico. ....	26
b) Incremento de la temperatura media y estimación del límite de fatiga a partir del punto de inflexión de la curva [40]. ....	26
<b>Figura 1.12</b> Evolución de la temperatura durante una prueba de fatiga [41]. ....	27
<b>Figura 1.13</b> Muestras recomendadas [2].....	31
<b>Figura 4.1</b> Regiones frente a la punta de una grieta. Modificado de [55].....	41
<b>Figura 4.2</b> Ciclo de histéresis estable para un material de Masing [36]. ....	42
<b>Figura 5.1</b> Metodología experimental. ....	46
<b>Figura 5.2</b> Dimensiones de la probeta de tensión compacta (CT) en mm.....	48
<b>Figura 5.3</b> Probeta de tensión compacta (CT) para pruebas de tasa de crecimiento de grietas por fatiga [2]. ....	48
<b>Figura 5.4</b> Cara de probeta pintado de negro mate. ....	50
<b>Figura 5.5</b> Probetas pulidas. ....	51
<b>Figura 5.6</b> Diagrama de crecimiento de grieta por fatiga para acero AISI 1018. Modificado de [72]. ....	52
<b>Figura 5.7</b> Máquina universal MTS Landmark®. a) Cabezal superior. b) Celda de carga. c) Mordaza superior. d) Mordaza inferior. e) Columnas. f) Cabezal inferior. ....	54
<b>Figura 5.8</b> MTS Landmark® (Centro de Investigación e Innovación Tecnológica “CIITEC”, IPN). ....	55
<b>Figura 5.9</b> Microscopio óptico portable PSM-10 Struers. a) Carro portable, b) Ocular de medición, c) Lente de objetivo, d) Botón de luz led. ....	56
<b>Figura 5.10</b> Configuración con cámara termográfica. a) Microscopio, b) Probeta, c) Cámara termográfica, d) Tripié. ....	56
<b>Figura 5.11</b> Configuración con termopares. a) Microscopio, b) Cinta adhesiva laminar, c) Termopar, d) Monitor del termopar. ....	57

<b>Figura 5.12</b> Observación del microscopio con aumento de 40x. a) Termopar, b) Grieta.....	57
<b>Figura 6.1</b> Comparación de los modelos.....	59
<b>Figura 6.2</b> Superficie fracturada de probeta CT. a) Región de propagación de grieta, b) Región de crecimiento inestable de grieta.....	61
<b>Figura 6.3</b> Curvas de temperatura y longitud de grieta del ensayo experimental. a) Región estable, b) Región inestable.....	61
<b>Figura 6.4</b> Datos experimentales de tasa de crecimiento de grietas.....	62
<b>Figura 6.5</b> Datos experimentales de tasa de crecimiento de grietas.....	63
<b>Figura 6.6</b> Modelo propuesto en tasa de crecimiento de grietas.....	65
<b>Figura A.1</b> Corte de placa de 10 x 8 x 3/8 pulgadas de material AISI 1018. a) Medición de dimensiones de corte. b) Proceso de corte con refrigerante.....	74
<b>Figura A.2</b> Cortadora metalográfica. ....	74
<b>Figura A.3</b> Proceso de perforación. a) Marcas de centros. b) Taladro industrial. ....	75
<b>Figura A.4</b> Proceso de ranura de la muesca. ....	75
<b>Figura B.1</b> Dimensiones de los sujetadores en mm. ....	76
<b>Figura B.2</b> Dimensiones de los pernos en mm.....	77

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 4.1</b> Modelos de propagación de grieta basados en el teorema DEG. ....	45
<b>Tabla 5.1</b> Composición química del acero AISI 1018 [71]. ....	47
<b>Tabla 5.2</b> Propiedades mecánicas del acero AISI 1018 [72]. ....	47
<b>Tabla 5.3</b> Secuencia para el pulido de probetas tipo CT. ....	50
<b>Tabla 5.4</b> Datos iniciales para cálculos de pregrieta. ....	53
<b>Tabla 5.5</b> Datos iniciales para cálculos de ensayo de crecimiento de grietas. ....	54
<b>Tabla 6.1</b> Propiedades del acero AISI 1020 [1,74]. ....	58
<b>Tabla 6.2</b> Parámetros de ajuste para los modelos de propagación de grieta. ....	59
<b>Tabla 6.3</b> Comparación de los modelos con MAPE. ....	60
<b>Tabla 6.6</b> Propiedades mecánicas y cíclicas del acero AISI 1018 [79]. ....	63
<b>Tabla 6.5</b> Obtención de datos calculados para el modelo propuesto. ....	64
<b>Tabla 6.6</b> Propiedades mecánicas y cíclicas del acero AISI 1018 [72,74]. ....	64

## NOMENCLATURA

$^{\circ}\text{C}$	<i>Grado centígrados.</i>
$a$	<i>Longitud de grieta.</i>
ASTM	<i>American Society of Testing Materials.</i>
B	<i>Coeficiente de degradación.</i>
$C(T)$	<i>Probeta compacta a tensión.</i>
$da$	<i>Incremento de la longitud de las grietas.</i>
$da/dN$	<i>Tasa de crecimiento de grieta.</i>
$dW/dN$	<i>Energía plástica por ciclo.</i>
E	<i>Módulo de Young.</i>
f	<i>Frecuencia.</i>
G	<i>Tasa de liberación de energía.</i>
Hz	<i>Hertz.</i>
N	<i>Número de ciclos.</i>
K	<i>Factor de intensidad de esfuerzos.</i>
$\Delta K$	<i>Amplitud del factor de intensidad de esfuerzo.</i>
$K_{IC}$	<i>Tenacidad a la fractura en modo I de falla.</i>
kN	<i>Kilo newton.</i>
P	<i>Carga.</i>
$P_{m\acute{a}x}$	<i>Carga máxima aplicada.</i>
$P_{m\acute{i}n}$	<i>Carga mínima aplicada.</i>
$\Delta\sigma$	<i>Amplitud de carga.</i>
mm	<i>Milímetro.</i>
$\sigma$	<i>Esfuerzo.</i>
R	<i>Relación de esfuerzos.</i>
s	<i>Segundo</i>
W	<i>Ancho de la probeta</i>

## Resumen

En este trabajo se presentó la propuesta de un modelo para el seguimiento de crecimiento de grieta a través del método de la energía. Se revisaron en la literatura modelos energéticos, siendo el idóneo el enfoque basado en el teorema de degradación-generación de entropía (DEG, por sus siglas en inglés) que incluye principalmente las variables temperatura y coeficiente de degradación. El teorema DEG se modificó al incluir la energía de disipación plástica  $\left(\frac{dW_p}{dN}\right)$  en función del endurecimiento por deformación ( $n'$ ) y la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ) y se aplicó para materiales de acero debido a la importancia en elementos mecánicos y estructurales.

El modelo propuesto se comparó con el modelo de Idris *et al* [1], que está basado en el teorema DEG en un acero AISI 1020. Después se implementó el modelo propuesto en otro acero para validarlo experimentalmente con ensayos de fatiga basados en la norma ASTM E647 [2], para este caso fue el acero AISI 1018. Se usó termopares y termografía para medir simultáneamente la temperatura, mientras que la medición de la longitud de la grieta se realizó con un microscopio. Los datos experimentales se procesaron para obtener el coeficiente de degradación y la curva de la tasa de crecimiento de grieta mediante regresión lineal. Los resultados demostraron que el modelo propuesto tiene buena predicción con los datos experimentales del acero AISI 1018 y tiene mayor precisión que el modelo de Idris *et al* [1] en el acero AISI 1020.

## Abstract

In this work, the proposal of a model for crack monitoring through the energy method was presented. Energy models are reviewed in the literature, the appropriate approach being based on the degradation-entropy generation theorem (DEG), which mainly includes the variables temperature and degradation coefficient. The DEG theorem was modified to include the plastic dissipation energy  $\left(\frac{dW_p}{dN}\right)$  as a function of strain hardening ( $n'$ ) and the amplitude of the stress intensity factor ( $\Delta K$ ) and was applied to steel materials due to its importance in mechanical and structural elements.

The proposed model was compared with the model of Idris et al [1], which is based on the DEG theorem in an AISI 1020 steel. Later, the proposed model was implemented in another steel to validate it experimentally with fatigue tests based on the ASTM standard. E647 [2], for this case it was AISI 1018 steel. Thermocouples and thermography were used to simultaneously measure the temperature, while the crack length was measured with a microscope. The experimental data were processed to obtain the degradation coefficient and the crack growth rate curve by linear regression. The results showed that the proposed model has a good prediction with the experimental data of AISI 1018 steel and has higher precision than the model of Idris et al [1] in AISI 1020 steel.

## Introducción

La fatiga de materiales ha originado, según Zerbst [3], un registro del 80% y el 90% de casos que involucran fallas estructurales y de componentes de máquinas durante muchos años. El estudio de la fatiga es importante debido a que se presenta en áreas importantes de la ingeniería como son: aeroespacial, civil y mecánica [4].

Los componentes mecánicos desarrollan crecimiento de grietas cuando se someten a cargas cíclicas y eventualmente causar fallas por fractura. La fractura ocurre repentinamente y sin previo aviso, siendo difícil evitar un accidente catastrófico. Las fallas de elementos sometidos a fatiga generan pérdidas económicas: Dowling *et al* [5] reportaron que en 1991 se produjo una pérdida promedio del 4% del Producto Interno Bruto en Europa. Por lo tanto, la importancia del estudio de la fatiga radica en la seguridad de componentes mecánicos y estructurales, para prevenir accidentes que implican pérdidas humanas, ambientales y económicas,

Paris y Erdogan [6] fueron los pioneros en mostrar un modelo empírico sobre el crecimiento de grietas por fatiga. Sin embargo, el modelo de Paris se limita a parámetros de ajuste y no está basado en leyes físicas que expliquen el proceso del crecimiento de grietas en los metales.

Actualmente, es posible encontrar trabajos basados en el principio de la energía como el de Meneghetti y Ricotta [7], quienes presentaron resultados de la medición de la energía de histéresis por deformación plástica a través de la temperatura, y encontraron un modelo de crecimiento de grieta, a través del uso de la energía de deformación plástica y el calor.

Investigaciones recientes demuestran que existe un aumento de la temperatura superficial de la probeta a medida que crece la grieta, lo cual es necesario la comprensión de los fenómenos físicos en la propagación de grietas por fatiga, a partir de las leyes de la Termodinámica. Por lo anterior, existen investigaciones como el trabajo de Idris *et al.* [8], quienes desarrollaron un modelo de crecimiento de grietas por fatiga al involucrar la entropía, en condiciones de carga de amplitud constante y variable. Hajshirmohammadi y Khonsari [9] obtuvieron un modelo matemático para calcular la tasa de propagación de grietas, el cual incluye la temperatura y el flujo de entropía como variables en su modelo. Sin embargo, la hipótesis de que toda la energía de deformación es disipado en calor es apropiado sólo en casos muy limitados [10].

En este trabajo se propone un modelo de crecimiento de grieta por fatiga a través del método de la energía en acero, el cual se obtuvo a partir del análisis del teorema Degradación-Generación de Entropía (DEG, por sus siglas en inglés) e implementando la energía de disipación plástica  $\left(\frac{dW_p}{dN}\right)$  en función del endurecimiento por deformación ( $n'$ ) y la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ). El modelo propuesto se comparó con el modelo de Idris *et al* [1] a partir de datos de la literatura, y se validó experimentalmente en un acero AISI 1018. La metodología experimental se basó en la norma ASTM E647 [2] para obtener los datos experimentales de crecimiento de grieta, y simultáneamente se midió la temperatura con termopares y termografía para encontrar el coeficiente de degradación propuesto en el modelo. El modelo propuesto muestra una buena predicción de resultados con los datos experimentales.

# CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE

---

## 1.1. Antecedentes

Las primeras investigaciones sobre fatiga fueron desarrolladas en 1937 por Wilhelm August Julius Albert [11]. Sus estudios se realizaron en cadenas transportadoras mediante ensayos experimentales en una máquina de prueba. La conclusión de su investigación fue que cargas repetitivas en un elemento provoca la ruptura de éste y no un exceso de carga.

En 1920, Griffith desarrolló la base de la fractura mecánica sobre la propagación de grietas debido a la fatiga. Introdujo la energía superficial de la grieta en el balance energético y formuló el concepto de fractura energética [12]. El modelo de Griffith usó la primera ley de la termodinámica para formular una teoría de fractura basada en un balance de energía. Aunque el trabajo de Griffith tuvo aceptación, no tenía relevancia en la práctica de la ingeniería por la ausencia de aplicación en caracterizar el fallo por fatiga en los materiales metálicos.

A principios de la década de los 60's, George Irwin mostró que el tamaño y la forma de la zona plástica alrededor de la punta de la grieta, podía ser expresada en términos de una cantidad conocida como el factor de intensidad de esfuerzos  $K$ , el parámetro clave en la mecánica de fractura elástica lineal (LEFM por sus siglas en inglés) [13]. Si los procesos de fractura ocurren principalmente en esta región,  $K$  debería predecir de manera única la fractura. Esto complementó la teoría de Griffith y la hizo aplicable a problemas reales de ingeniería.

Con el desarrollo de la mecánica de la fractura elástica lineal, Paris y Erdogan [6] fueron los primeros en sugerir que el incremento de longitud de grieta por ciclo,  $da/dN$ , podía relacionarse con la variación del factor de intensidad de esfuerzos,  $\Delta K$ , bajo cargas de amplitud constante. Esto era válido en longitudes de grieta mayores a un milímetro [14], las cuales se clasifican en grietas medianas y grietas grandes, pero el modelo de Paris no tenía buenas predicciones en condiciones que involucraban grietas pequeñas. A partir de los trabajos de Paris, creció el interés por comprender el proceso por el que el factor de intensidad de esfuerzo podía verse alterado con el avance de la grieta.

## **1.2. Generalidades de fatiga**

Según Lee *et al* [15], la fatiga es un proceso de daño localizado del material, producido por una carga cíclica, que provoca una deformación plástica y se desarrolla el inicio, propagación y fractura final de la fisura de un componente. Por otra parte, Askeland [16], menciona que la fatiga provoca la disminución de la resistencia o falla de un material por un esfuerzo repetitivo que puede estar por encima o por debajo del límite elástico. Finalmente, Charles y Crane [17], definen la fatiga como una forma peligrosa de fractura que ocurre en los materiales cuando se someten a cargas cíclicas o fluctuantes, y se desarrolla el crecimiento progresivo de una grieta hasta el punto de falla final.

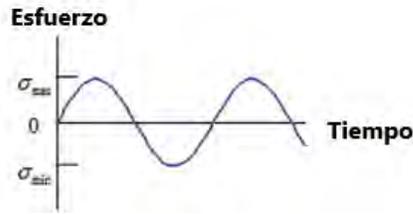
Cuando se trata de fallas de componentes y equipos estructurales, los diseñadores, fabricantes y usuarios de estructuras realizan una búsqueda de comprender cómo y por qué ocurrieron estas fallas. Esto da como resultado, el desarrollo de programas de integridad estructural, técnicas mejoradas de predicción y modelado analítico, métodos precisos de evaluación de la vida del material y un compromiso reforzado para evitar la recurrencia de estas fallas a través de diseños mejorados [18].

En su mayoría, las fallas de elementos de máquinas ocurren por esfuerzos repetidos o fluctuantes, y no por cargas estáticas. Estos esfuerzos fluctuantes varían de intensidad con respecto al tiempo y suelen repetirse un gran número de veces. Por lo tanto, puede provocar que el material falle a niveles por debajo del límite elástico. Esta falla se denomina “falla por fatiga” y se produce de manera repentina y total, considerada peligrosa por no presentar algún indicativo previo que permita evitarla o detenerla [19].

Una falla por fatiga se inicia a partir de una pequeña grieta que se origina por concentración de esfuerzos debido a discontinuidades geométricas (muescas, esquinas afiladas, filetes, agujeros, roscas de tornillos y chaveteros) [20]. Cuando el esfuerzo cíclico alcanza un valor máximo, la diminuta grieta empieza a crecer en el material hasta alcanzar la longitud crítica (limitante) de la grieta y producir la fractura total del material.

### **1.2.1. Caracterización de esfuerzos fluctuantes**

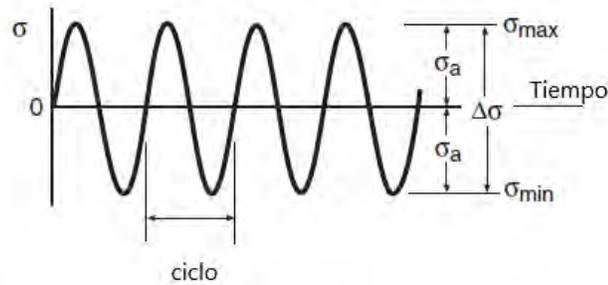
Los esfuerzos fluctuantes o cíclicas generadas, se representan en forma sinusoidal en función del tiempo. En la Figura 1.1 se muestran las cargas fluctuantes con amplitud de esfuerzo constante.



**Figura 1.1** Esfuerzos cíclicos de amplitud constante [21].

Estas curvas representan el historial de esfuerzos cíclicos de las cuales se toma en cuenta el número de ciclos para la vida a fatiga ( $N$ ). Dicho historial puede ser en esfuerzos: axiales (tensión y compresión), flexión y torsión [21].

Para pruebas de fatiga en materiales, se consideran niveles constantes de esfuerzo máximo y mínimo, por lo que la amplitud del esfuerzo es constante [5]. En la Figura 1.2 se muestran ciclos de amplitud constante completamente invertidos.



**Figura 1.2** Ciclos de amplitud constante completamente invertidos [5].

Las cargas cíclicas se definen por los siguientes parámetros: esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ), esfuerzo mínimo ( $\sigma_{min}$ ), esfuerzo medio ( $\sigma_m$ ), amplitud de esfuerzo ( $\sigma_a$ ) y rango de esfuerzos ( $\Delta\sigma$ ).

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3.3)$$

Para caracterizar el tipo de carga se usa frecuentemente el parámetro razón del esfuerzo ( $R$ ), el cual se define por:

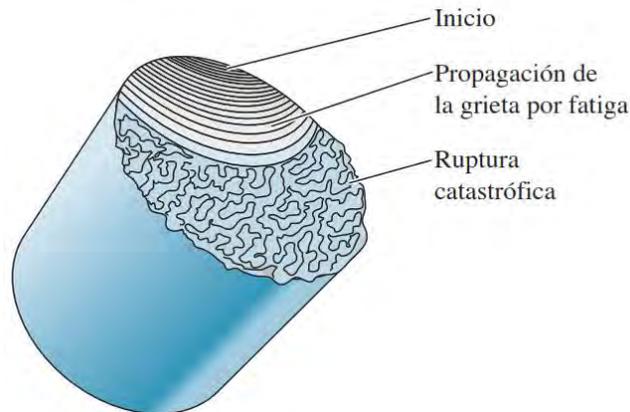
$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4.4)$$

### 1.3. Generalidades de la mecánica de la fractura

La mecánica de la fractura considera que los materiales contienen pequeños defectos como microgrietas, poros e inclusiones, ya sea por la estructura del material o por defectos de fabricación de piezas. Estos defectos del material generan concentraciones de esfuerzos que provocan el crecimiento de grieta. Existen tres etapas en el proceso de crecimiento de grieta por fatiga para materiales dúctiles, y son:

1. Periodo de nucleación e inicio de la grieta en la zona donde la concentración de esfuerzos provoca deformaciones plásticas cíclicas.
2. Crecimiento de la grieta en la zona plástica donde se originó.
3. Propagación de la grieta en la pieza, fuera del campo de concentración de esfuerzos donde se originó, hasta producir el fallo final.

En la Figura 1.3 se muestran las regiones que involucran el inicio, la propagación de la grieta por fatiga (con marcas de playa) y la ruptura cuando la longitud de la grieta excede un valor crítico en el esfuerzo aplicado.

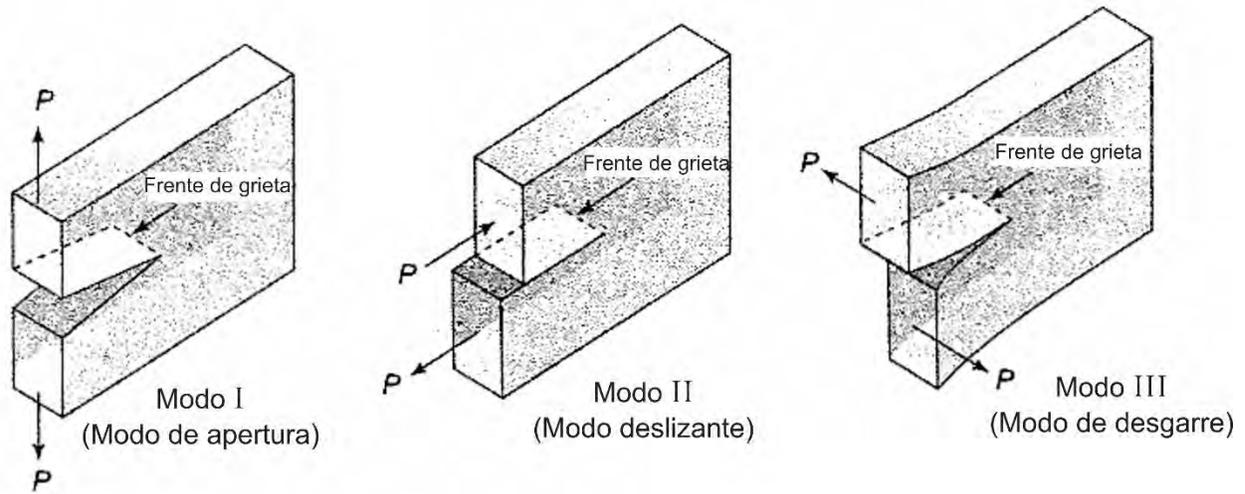


**Figura 1.3** Representación esquemática de una superficie de fractura por fatiga [23].

#### 1.3.1. Modos de desplazamiento de la grieta

Los modos de desplazamiento de la grieta dependen de la orientación de la carga contra la grieta, por lo que se consideran tres modos, los cuales son [24]:

- 1) Modo I (modo de apertura): La grieta se abre debido a la aplicación de tensiones normales al plano de la fractura.
- 2) Modo II (modo deslizante): Las cargas aplicadas cortan la grieta en un plano.
- 3) Modo III (modo de corte o desgarre): Las cargas aplicadas cortan la grieta fuera del plano.



**Figura 1.4** Modos de desplazamiento de grieta. Modificado de [24].

El Modo I generalmente juega un papel dominante en muchas aplicaciones de ingeniería y se considera que es el más peligroso.

El análisis de crecimiento de grieta puede ser obtenido usando el concepto de factor de intensidad de esfuerzos, el cual, provoca que crezca la grieta y se produzca la falla [25]. El factor de intensidad de esfuerzo  $K$  se calcula como:

$$K = f \sigma \sqrt{\pi a} \quad (5.5)$$

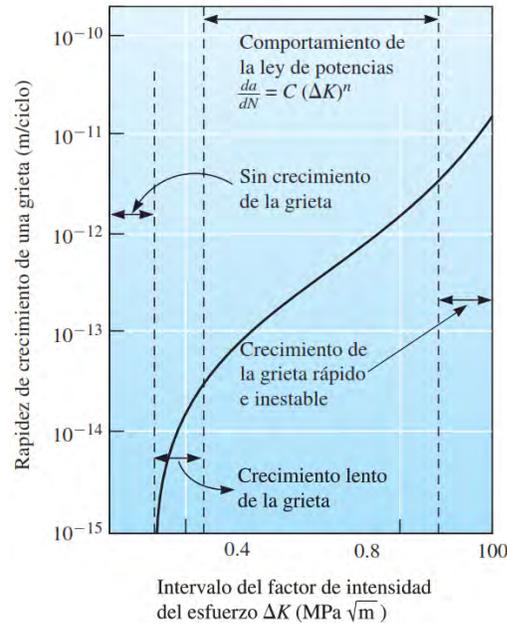
Donde:

$f$  = factor geométrico del espécimen y la imperfección.

$\sigma$  = esfuerzo aplicado.

$a$  = tamaño de la imperfección.

El factor de intensidad de esfuerzos tiene una relación con el esfuerzo aplicado y la longitud de la grieta, por lo que es un parámetro a considerar en el crecimiento de grieta. El material tiene una resistencia característica a la fractura conocida como "tenacidad a la fractura",  $K_C$ . El factor de intensidad del esfuerzo es un parámetro que está en función de la rapidez de crecimiento de una grieta y se representa en una gráfica doblemente logarítmica (Figura 1.5).



**Figura 1.5** Representación gráfica del crecimiento de grieta [23].

Un criterio para la fractura es el enfoque energético de la mecánica de fractura, la cual consiste en comparar la energía disponible para la propagación de una grieta en el material con la energía necesaria para producir su agrietamiento. La tasa de liberación de energía ( $G$ ) se define como la energía disponible para el avance de grieta por unidad de área, y la tasa crítica de liberación de energía o energía de agrietamiento ( $G_C$ ) es la energía necesaria para el agrietamiento. En el enfoque energético, el criterio de fractura se puede dar como  $G \geq G_C$ . Los mecanismos físicos de disipación de energía debido a la fractura incluyen la deformación plástica antes de la grieta en metales [26].

Cuando la tensión en la punta de la grieta excede el límite elástico, el material que rodea la punta de la grieta comienza a deformarse plásticamente y absorbe energía [18]. En lugar de elevarse hasta el esfuerzo de tracción ( $\sigma_c$ ) predicho por el análisis elástico lineal, el esfuerzo máximo se reduce al límite elástico ( $\sigma_y$ ). Debido a la existencia de una zona plástica hace que la grieta actúe como si fuera más larga que su tamaño real. En otras palabras, como resultado de la plasticidad de la punta de la grieta, los desplazamientos son más grandes y la rigidez es menor que la predicha por el análisis elástico.

Al analizar la deformación plástica antes de la fractura y materiales con alta tenacidad como los metales, se considera la mecánica de la fractura elástico-plástico (EPFM por sus siglas en inglés). Por lo tanto, se necesitan parámetros y conceptos que tengan en cuenta el flujo plástico del material en regiones más grandes fuera de la zona de proceso [27].

Existen tres métodos básicos de EPFM que proporcionan mediciones especializadas de fractura, los cuales son:

- 1) Desplazamiento de apertura de la punta de la grieta (CTOD por sus siglas en inglés).
- 2) La integral  $J$ .
- 3) La curva  $R$ .

Estos tres enfoques especifican el inicio de la fractura inestable en presencia de deformación plástica a pequeña escala. CTOD y la integral  $J$  pueden ser útiles incluso si existe una deformación plástica a gran escala en la punta de la grieta [28].

#### **1.4. Enfoque basado en la energía**

El crecimiento de las grietas está relacionado con la existencia de una zona plástica cíclica (CPZ por sus siglas en inglés) en la punta de la grieta, cuya formación e intensificación va acompañada de una disipación de energía. Por tanto, la cantidad de energía de deformación plástica cíclica puede representar con precisión la tasa de daño en la punta de la grieta.

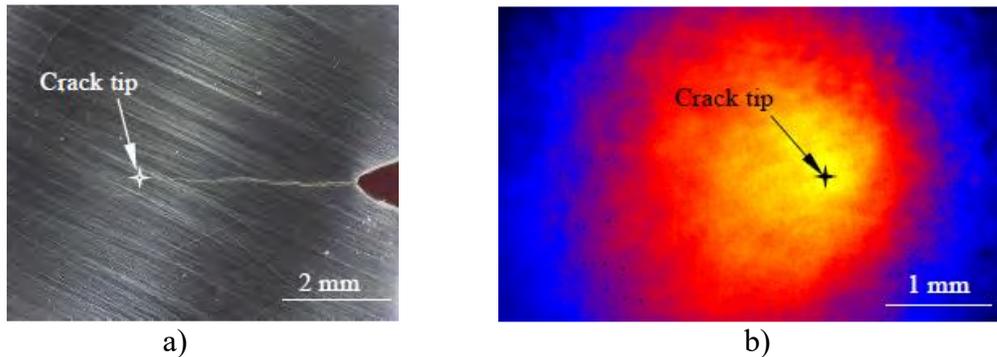
Rice [29] propuso por primera vez el uso de un criterio de disipación plástica cíclica para el crecimiento de grietas por fatiga. Consideró que la punta de la grieta avanza cuando la energía de histéresis evaluada en la Zona Plástica Cíclica se iguala con el valor crítico de energía por unidad de área. Rice demostró una dependencia de la tasa de crecimiento de grieta con el factor de intensidad de esfuerzos en la región elástica lineal.

Posteriormente, se han desarrollado diferentes técnicas para evaluar la energía plástica, tales como: medidas de tamaño subgranular, termografía infrarroja, micro-calorimetría y por medición de la energía de histéresis bajo la línea de carga de un espécimen bajo tensión [30].

#### **1.5. Investigaciones actuales de propagación de crecimiento de grieta**

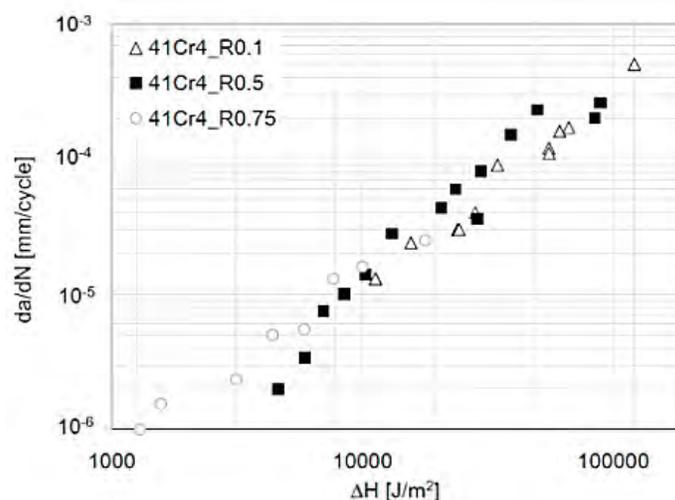
Actualmente, es posible encontrar trabajos relacionados con el crecimiento de grieta por fatiga a través del enfoque basado en la energía. A continuación, se mencionan las investigaciones más recientes:

Meneghetti y Ricotta [7], presentaron resultados de la medición de la energía de histéresis por deformación plástica a través de la temperatura (Figura 1.6). Encontraron que los resultados obtenidos de este método experimental son comparables a aquellos que consideran a dicha energía como la impulsora del crecimiento de grieta, a través del uso del calor y la energía de deformación plástica.



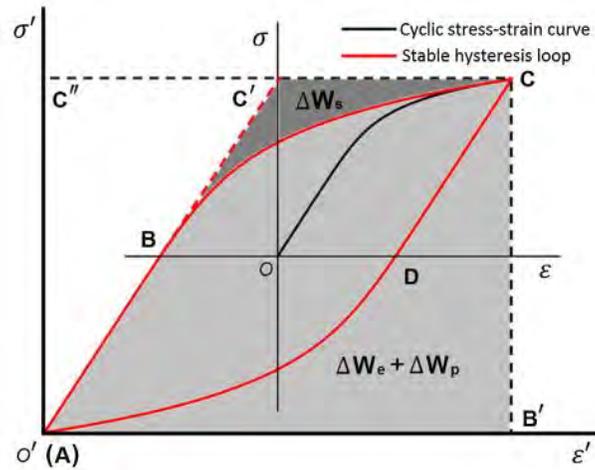
**Figura 1.6** Ejemplo de (a) una imagen microscópica de la grieta por fatiga y (b) un mapa de la temperatura tomado de la superficie opuesta [7].

Lesiuk *et al* [31] desarrollaron un enfoque energético a partir de la primera Ley de la Termodinámica. Relacionaron el trabajo de las fuerzas externas, la entrada de calor al cuerpo durante el ensayo, la energía de deformación por ciclo de carga, la energía cinética del cuerpo y la energía de daño, para proponer un modelo empírico que incluye parámetros que permiten medir la tasa de crecimiento de grieta. Concluye que, al usar este enfoque, es posible obtener mediciones y estimaciones más precisas que usando el enfoque del factor de intensidad de esfuerzos.



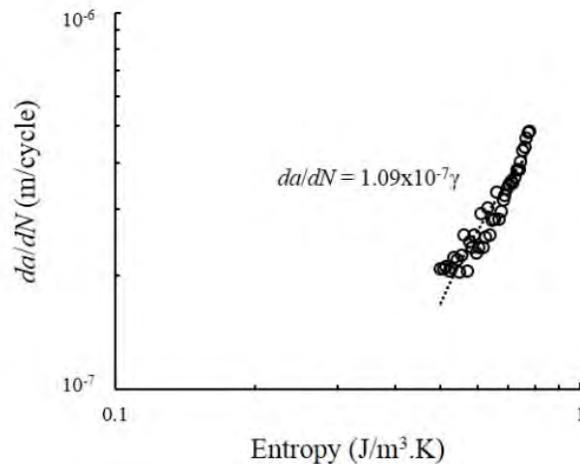
**Figura 1.7** Diagrama de fractura por fatiga cinética [31].

Cheng *et al* [32] propusieron un modelo para la predicción del crecimiento de grietas por fatiga en materiales metálicos, el cual requiere sólo de las propiedades fundamentales de deformación, a partir de un enfoque de energía.



**Figura 1.8** La densidad de energía de deformación requerida para que los elementos materiales se fracturen [32].

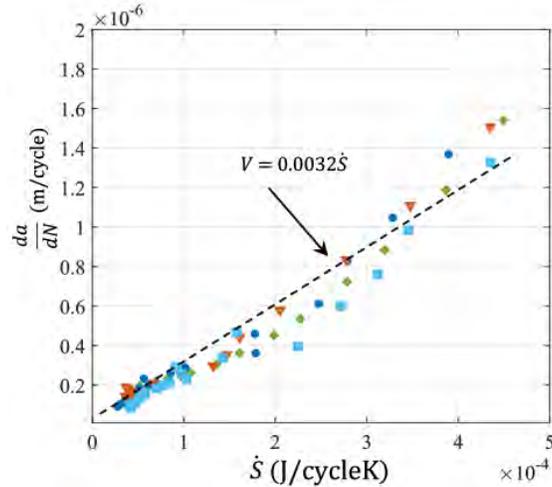
Idris [8] presentó la evaluación de la tasa de crecimiento de grietas por fatiga basada en la generación de entropía y la segunda ley de la termodinámica. Menciona que el crecimiento de las fisuras por fatiga está relacionado con la ganancia de entropía debido a su irreversibilidad. Los resultados de su investigación indicaron una correlación significativa entre la tasa de crecimiento de grietas por fatiga y la entropía.



**Figura 1.9** Relación entre el crecimiento de grieta y la entropía [8].

Hajshirmohammadi y Khonsari [9] mostraron que la tasa de propagación de grietas está relacionada con el flujo de entropía durante la carga cíclica de una muestra plana en el modo I.

Sus resultados comprobaron que el flujo de entropía es un parámetro confiable para la predicción de la tasa de propagación de grietas en regiones de baja y alta velocidad.



**Figura 1.10** Tasa de generación de entropía [9].

## 1.6. Efecto disipativo de la fatiga de la microestructura a la macroestructura

La fatiga es un fenómeno de alta disipación que involucra varias transformaciones energéticas. La disipación de energía plástica es una manifestación de los mecanismos de falla, que ocurren dentro del material cuando se somete a cargas de fatiga. Esto ocurre primero a microescala y después a macroescala.

A nivel de microescala, Sangid [33] mencionó que las dislocaciones son las responsables de la disipación de grietas. Posteriormente, Eshelby [34] aplicó la noción de dislocación para evaluar la disipación de energía en los metales, la cual describe el mecanismo de amortiguación mecánica en metales vibrantes considerando también el movimiento de dislocaciones. Eshelby observó que además de la amortiguación termoelástica, adoptada por Zener [35], había una pérdida de energía adicional debido a la oscilación de las dislocaciones. El movimiento de la dislocación conduce a una redistribución del campo de esfuerzos dentro del material y, por lo tanto, a un cambio en la distribución de temperatura que, mediante el flujo de calor, provoca la amortiguación mecánica. Tal fenómeno depende estrictamente del esfuerzo aplicado y de la densidad de dislocación.

Desde un punto de vista macroscópico, Morrow [36] desarrolló un modelo para evaluar la energía de deformación plástica del bucle de histéresis en términos de esfuerzo y deformación. En su trabajo, observó que la energía de deformación plástica liberada por ciclo es casi constante

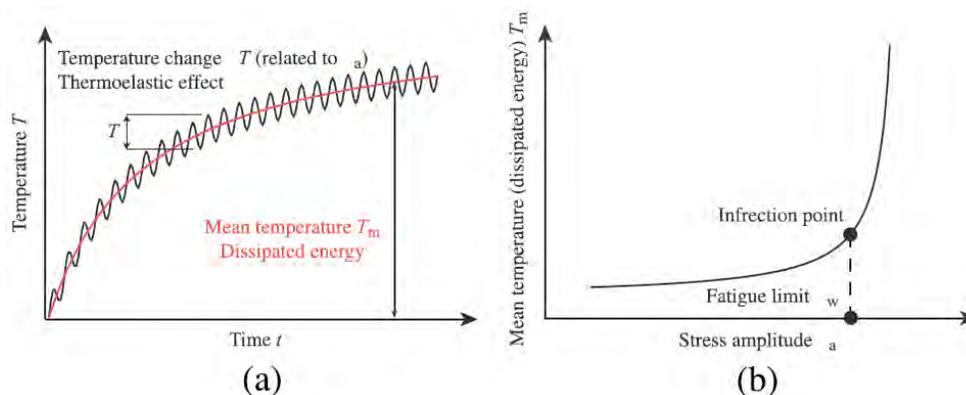
durante la prueba de fatiga. Kaleta *et al* [37] adoptaron la consideración del ciclo de histéresis, para medir la energía almacenada en muestras de acero. La energía almacenada se estimó como la diferencia de la energía mecánica gastada en la muestra y la energía liberada en el entorno. Por lo tanto, ambos autores [36-37], demostraron que la energía de deformación disipada en un ciclo de histéresis puede ser una ayuda útil para predecir la falla por fatiga de los materiales

Varios estudios [38,39] han demostrado que, bajo diferentes velocidades de deformación, aproximadamente el 90% de la energía de deformación plástica generada se convierte en calor. Bajo esta consideración se puede decir que la fatiga es un fenómeno disipativo; por lo tanto, medir la disipación de energía puede proporcionar información útil sobre la vida a fatiga del material.

### 1.7. Tendencia de la temperatura durante una prueba de fatiga

Durante una prueba de fatiga, la variación de temperatura de la muestra puede descomponerse en dos contribuciones (Figura 1.11): una dada por la energía de deformación elástica y la otra por la energía de deformación plástica. El primer efecto está asociado a un cambio cíclico recuperable de temperatura (efecto termoelástico), mientras que el segundo está asociado a un aumento del valor medio de la temperatura [40].

La temperatura termoelástica se caracteriza por amplitudes del orden de una décima de °C. Por otro lado, la tendencia de la temperatura media, con las frecuencias adecuadas, alcanza niveles del orden de decenas de °C, por lo cual es posible despreciar la tendencia de la temperatura termoelástica.

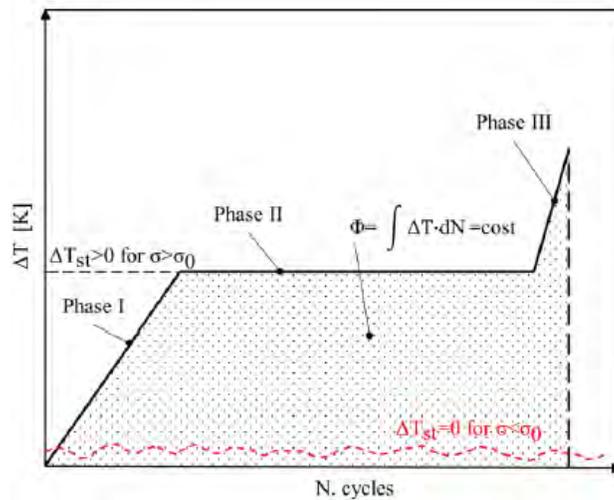


**Figura 1.11** a) Cambios de temperatura inducidos por el efecto termoelástico.

b) Incremento de la temperatura media y estimación del límite de fatiga a partir del punto de inflexión de la curva [40].

La variación de la temperatura de la muestra se puede realizar mediante termopares o mediante Termografía Infrarroja (IR). Gracias a su rápido crecimiento, la termografía IR permite captar variaciones muy pequeñas en la temperatura de un cuerpo debido a deformaciones elásticas, en comparación con termopares que también pueden alterar la medición.

La Rosa y Risitano [41], aplicaron la termografía IR para monitorear la temperatura superficial de una probeta, bajo condiciones de carga de fatiga de amplitud constante, por lo que observaron tres fases diferentes (Figura 1.12). En la primera fase (Fase I), la temperatura aumenta y en la segunda fase (Fase II) alcanza una región de meseta, donde la temperatura tiene un valor casi constante definido como la temperatura de estabilización  $\Delta T_{st}$ . Finalmente, en la tercera fase (Fase III), la temperatura experimenta un incremento de temperatura adicional muy alto hasta que la muestra falla.



**Figura 1.12** Evolución de la temperatura durante una prueba de fatiga [41].

### 1.8. Relación de la degradación y entropía en la fatiga

Todas las estructuras y componentes de la maquinaria son propensos a degradarse y eventualmente ocurrirán fallas si los diseños no son capaces de mantener la integridad. La falla debido a la fatiga, el daño estructural progresivo y localizado que ocurre cuando un material se somete a cargas cíclicas repetitivas, es la fuente más común de degradación estructural, lo que hace que las capacidades de diagnóstico y pronóstico de la fatiga sean altamente deseables.

Autores como Khonsari *et al* [42], clasificaron la fatiga como un tipo de degradación, que disminuye progresivamente la resistencia del material como resultado de la aplicación de una carga mecánica cíclica o una deformación cíclica. La degradación es una consecuencia de procesos termodinámicos irreversibles que alteran un componente, y es un fenómeno dependiente del tiempo con un desorden creciente. Por lo tanto, la degradación por fatiga es un proceso irreversible que desorganiza un sistema y produce entropía de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica.

Por lo anterior, la entropía es un parámetro fundamental en la termodinámica que caracteriza el desorden; ofrece una medida natural del deterioro de los componentes [43]. También, la entropía se define como el grado de irreversibilidad de un proceso en un sistema. Existe una relación entre la degradación por fatiga y la generación de entropía debido a que se involucran en los procesos irreversibles. En un proceso irreversible se observa pérdida o disipación de energía por choques o fricciones intermoleculares en el material, por lo tanto, no permite la recuperación de energía al invertir el proceso. Esto indica que la fatiga es un proceso de degradación y que la entropía es el índice más adecuado para evaluar dicha degradación.

El aumento de entropía se debe a la alteración de la energía interna la cual involucra:

- energía de deformación absorbida durante generación de calor [44].
- trabajo plástico bajo el endurecimiento por deformación [45].
- sonido liberado debido al agrietamiento [46].

Salimi [47] reportó que la entropía generada durante la fatiga puede servir como una medida de degradación. Diversos autores [48-50] ha llegado a la conclusión de que la generación de entropía puede predecir con precisión la tasa de crecimiento de grieta debido a que la propagación de grieta es un proceso termodinámico irreversible. La generación de entropía puede ser una variable para el modelo de crecimiento de grieta, sin embargo, dentro del marco de la mecánica de la fractura no se ha investigado lo suficiente en la aplicación de la entropía producida por el crecimiento de grietas.

## 1.9. Energía plástica disipada

Debido a que los materiales metálicos son dúctiles, los fenómenos de plasticidad influyen en la tasa de crecimiento de grietas por fatiga ( $da / dN$ ) en los metales. Existe en la literatura la influencia de la disipación de energía plástica durante la propagación de grietas por fatiga. Estos trabajos usan el enfoque energético debido a que es un método universal entre varios materiales y, además, la plasticidad representa un tipo de disipación de energía.

El primer enfoque basado en energía para el crecimiento de grietas por fatiga fue propuesto por Weertman [30]. En su trabajo relacionó la energía plástica con el crecimiento de grietas por fatiga. Posteriormente surgieron otras investigaciones bajo el fenómeno de la energía plástica disipada o el trabajo de deformación en la punta de la grieta [51-52].

Actualmente, la base del enfoque energético es la relación entre la disipación de energía plástica por ciclo ( $dW/dN$ ) y la tasa de crecimiento de grietas por fatiga ( $da/dN$ ). Esta relación podría resumirse como:

$$\frac{dW}{dN} = \left( \frac{dW}{da} \right) \left( \frac{da}{dN} \right) \quad (2.1)$$

Se han desarrollado modelos de crecimiento de grietas basados en métodos. R.P. Skelton *et al.* [53] desarrollaron una expresión para el crecimiento de grietas con base en el criterio de energía de la densidad de energía acumulada. N.W. Klingbeil [54] propuso el crecimiento de grietas por fatiga en sólidos dúctiles basado en la acumulación de disipación de energía plástica total por ciclo. K.N. Pandey y S. Chand [55] desarrollaron un modelo teórico de la tasa de crecimiento de grietas por fatiga bajo carga de amplitud constante, al considerar el balance de energía de la zona de proceso durante el crecimiento de grietas. La zona de proceso es la vecindad de la punta de la grieta, en la que se produce el daño del material durante la propagación de la grieta. J.Z. Zuo *et al* [56] propusieron un modelo de crecimiento de grietas por el método de densidad de energía de deformación.

La energía plástica disipada tiene la ventaja de establecer modelos de crecimiento de grietas por fatiga bajo cargas cíclicas de amplitud constante y amplitud variable, de acuerdo con Wang *et al* [57]. La energía total disipada por unidad de extensión de la fisura por fatiga ( $dW/ da$ ) ha sido un tema de controversia debido a que Klingbeil *et al* [54] afirman que  $dW/da$  es una propiedad del material y su valor debe ser igual a la tenacidad a la fractura estática  $G_c$ , caso contrario a lo que

mencionó Ranganathan *et al* [30] al comprobar con sus resultados experimentales que  $dW/da$  no es una constante y podría depender de los diferentes mecanismos de crecimiento de la grieta.

### **1.10. Norma ASTM E-647**

Los procedimientos que cubren la determinación del crecimiento de grietas por fatiga ( $da/dN$ ) y el umbral de crecimiento de grietas por fatiga ( $\Delta K_{th}$ ) se presentan en la norma ASTM 647 (método de prueba estándar para medir las tasas de crecimiento de grietas por fatiga) [2]. Se proporcionan varios procedimientos de prueba diferentes, así como los detalles de las diferentes muestras que se pueden utilizar.

La norma describe el ensayo, que consiste en la aplicación de carga cíclica a una probeta con muesca, previamente fisurada por fatiga. La longitud de la grieta se mide mediante microscopio o con otros métodos equivalentes (óptico, diferencia de potencial eléctrico, galgas extensiométricas, complianza) para obtener la tasa de crecimiento de la grieta [58]. Luego, esto se expresa en función del rango del factor de intensidad de esfuerzo ( $\Delta K$ ), que se calcula utilizando expresiones basadas en el análisis de esfuerzo elástico lineal.

Tres tipos de probetas son adecuados para realizar ensayos de acuerdo con la norma ASMT 647, y estos son los especímenes compactos C (T), de tensión media M (T) y los especímenes de tensión de fisura de un solo borde con carga excéntrica ESE (T). Las tres probetas mencionadas anteriormente son diferentes en geometría, y se les aplican cargas de tensión o flexión.

Los materiales en este método no están limitados por el grosor o la resistencia siempre que las muestras tengan el grosor suficiente para evitar el pandeo y el tamaño plano suficiente para permanecer predominantemente elástico durante la prueba. Otra consideración importante es que el cierre de la fisura y el esfuerzo residual pueden influir en los resultados, aunque estas dos variables no se incluyen en el cálculo del rango del factor de intensidad de esfuerzos ( $\Delta K$ ).

La norma propone diferentes geometrías de muesca (Figura 1.13). La longitud de la muesca debe ser de al menos  $0.2 W$  para que  $K$  no se vea afectado por pequeñas variaciones de ubicación de los dos orificios donde se colocan los pasadores.

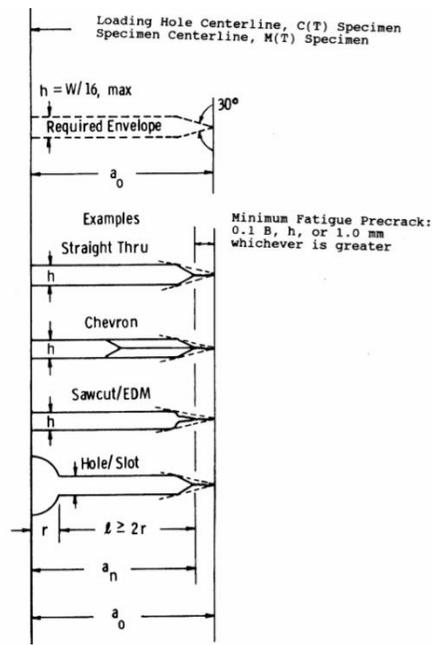


Figura 1.13 Muestras recomendadas [2].

## 1.11. Conclusión del estado del arte

El estudio del crecimiento de grieta por fatiga para metales es favorable con el uso de conceptos de la mecánica de la fractura elástico-plástico, donde se requiere considerar parámetros esenciales como la integral  $J$  propuesto por Rice, pionero en evaluar la propagación de grieta por fatiga basado en la energía. Los investigadores mencionados anteriormente se basan en un enfoque basado en la energía donde se requiere la aplicación de la termodinámica para tener un modelo más exacto de la tasa de crecimiento de grietas relacionado con la entropía.

Como puede observarse en la revisión de la literatura, los trabajos sobre la aplicación de métodos de energía para medir y estimar el crecimiento de grieta han estado tomando importancia a partir del desarrollo de tecnologías para medir la temperatura y la longitud de la grieta por fatiga.

Dentro de los trabajos experimentales se encuentra Meneguetti y Ricotta [7] donde las variables son la energía térmica disipada y la energía de histéresis de deformación plástica. Otros trabajos experimentales son Idris [8], y Hajshirmohammadi y Khonsari [9] donde la variable de mayor importancia es el flujo de entropía.

En los trabajos teóricos se encuentra Lesiuk [31], quien destaca que las variables son la densidad de energía de deformación ( $\Delta H$ ) y la integral  $J$  ( $\Delta J$ ). Otro trabajo teórico destacable es el de Cheng [32], quien considera que la energía almacenada acumulada y la energía de fractura liberada son las variables que describen la tasa de crecimiento de grieta por fatiga.

# CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

De acuerdo con la literatura, el estudio de la fatiga lleva 150 años de estudio; en contraste, la mecánica de la fractura es más reciente, con 60 años. Se han propuestos modelos sobre el comportamiento de grietas mediante la mecánica de fractura; sin embargo, dichos modelos matemáticos tienen limitaciones o son aplicables a condiciones específicas. Surge la siguiente pregunta: ¿qué modelo puede generalizar el comportamiento de grietas para diferentes condiciones de carga?

El enfoque basado en la energía ha demostrado ser aplicable en los metales y aplicado en investigaciones recientes de acuerdo con la literatura.

En este sentido, en este trabajo se propone tomar como base los modelos propuestos en la literatura, evaluar la influencia de las condiciones de carga y proponer ajustes o adaptaciones para extenderlos a diferentes condiciones de carga con una cantidad menor de variables.

## 2.1. Justificación

Como resultado de esta investigación, se propone construir un modelo matemático para evaluar el crecimiento de grieta por fatiga en acero. Aún hay conocimiento por adquirir acerca del fenómeno de fatiga, debido a modelos de estimación limitados e imprecisos, ya que solo son aplicables a ciertas condiciones. El desconocimiento del fenómeno conlleva al uso de factores de seguridad altos, lo cual consecuentemente se refleja en el sobredimensionamiento de las partes estructurales y aumento de peso; además, las fallas por fatiga representan importantes pérdidas económicas.

Hay una limitación en el uso de nuevos materiales para aplicaciones estructurales a causa del desconocimiento de su comportamiento a fatiga. Por lo tanto, el modelo construido contribuirá en la industria y en el sector de construcción debido a que el acero es muy usado en estructuras. El modelo ayudará a predecir la vida útil de los componentes elaborados con aceros para poder reemplazarlos en periodos de tiempo definidos y contribuir en la seguridad. De esta manera, se evitan accidentes y se optimiza el funcionamiento de las máquinas, reduciendo el costo de las reparaciones.

## **2.2. Objetivos**

### **2.2.1. General.**

Proponer un modelo matemático para la estimación de la tasa de crecimiento de grieta por fatiga en acero, a partir de los principios de la Termodinámica, tomando en consideración los parámetros del historial de carga.

### **2.2.2. Específicos**

- Identificar los parámetros del historial de carga que tienen mayor influencia en la nucleación y propagación de grieta por fatiga.
- Identificar y evaluar los métodos energéticos reportados en la literatura para evaluar el crecimiento de grieta por fatiga, para seleccionar aquéllos que incluyan los parámetros del historial de carga.
- Evaluar y adaptar algún modelo de la literatura para extender su rango de aplicación e incluir los efectos de los parámetros de la carga de mayor influencia en el crecimiento de grieta.
- Validar experimentalmente el modelo matemático.

## **2.3. Alcances**

- Establecer un criterio para el crecimiento de grieta por fatiga.
- Entender el fenómeno de fatiga, las técnicas experimentales y analíticas de fatiga para el tratamiento de datos experimentales de crecimiento de grieta.

## **2.4. Limitaciones**

- Se realizarán las pruebas experimentales en material de acero AISI 1018.
- Se considera solo el criterio basado en la energía.

## **2.5. Metas**

Obtener un modelo de crecimiento de grieta con base en el criterio basado en la energía.

# CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

---

## 3.1. Teorema de Degradación – Generación de Entropía

Bryant *et al* [59] propusieron el teorema de Degradación-Generación de Entropía (DEG por sus siglas en inglés), que iguala la tasa de cambio de una variable  $w$  que mide la degradación en forma de una combinación lineal de las entropías irreversibles,  $S_i$ , generadas por  $n$  procesos disipativos subyacentes a la degradación. Este teorema establece que existe una correspondencia entre la tasa de generación de entropía y la tasa de degradación que se relacionan entre sí a través de un factor de escala llamado coeficiente de degradación. Por lo tanto, si todos y cada uno de los procesos irreversibles se identifican en un sistema degradante, la tasa de degradación se puede determinar mediante la tasa de generación de entropía.

Aplicó esto para formular modelos predictivos de desgaste, fatiga y degradación de la batería, es decir, ecuaciones diferenciales que gobiernan la degradación o el envejecimiento. El teorema se puede usar para desarrollar un enfoque termodinámico para el modelo de crecimiento de grieta por fatiga. En el trabajo de Idris *et al* [9], propone un modelo de crecimiento de grieta basado en el teorema DEG y llega a la conclusión que la entropía irreversible es confiable y preciso en el modelo.

En un mecanismo de degradación consta de  $i = 1, 2, \dots, n$  procesos disipativos  $p_i$ , donde cada  $p_i = p_i(\zeta_i^j)$  describe una característica de energía, trabajo o calor del proceso, y depende de un conjunto de variables fenomenológicas dependiente del tiempo  $\zeta_i^j = \zeta_i^j(t), j=1,2, \dots, m$ . Para acumular los efectos de los procesos sobre la degradación o el envejecimiento general, se define la medida de degradación en la Ecuación (3.1)

$$w = w \{p_i(\zeta_i^j)\} \quad (3.1)$$

que depende de todas las variables fenomenológicas  $\zeta_i^j$  a través de  $n$  procesos  $p_i$ . Cualquier proceso disipativo  $p_i$  debe producir una entropía irreversible  $S'_i$ , caracterizada por el mismo conjunto de variables  $\zeta_i^j$ , esto se muestra en la Ecuación (3.2).

$$S' = S'_i \{p_i(\zeta_i^j)\} \quad (3.2)$$

La tasa de degradación  $dw / dt$  se puede determinar al aplicar la regla de la cadena a la Ecuación (3.1):

$$\frac{dw}{dt} = \dot{w} = \sum_i \sum_j \left( \frac{\partial w}{\partial p_i} \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j} \right) \frac{\partial \zeta_i^j}{\partial t} = \sum_i \sum_j Y_i^j J_i^j \quad (3.3)$$

La tasa de entropía ( $dS'/dt$ ), que es la generación de entropía, se puede determinar aplicando la regla de la cadena a la Ecuación (3.2):

$$\frac{dS'}{dt} = \dot{S}' = \sum_i \sum_j \left( \frac{\partial S'}{\partial p_i} \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j} \right) \frac{\partial \zeta_i^j}{\partial t} = \sum_i \sum_j X_i^j J_i^j \quad (3.4)$$

Para sistemas estacionarios, o sistemas cercanos al equilibrio, la termodinámica irreversible expresa la generación de entropía  $\dot{S}'$  como el producto de una fuerza generalizada  $X_i^j$  y una tasa o flujo generalizado  $J_i^j$ . La termodinámica irreversible considera las fuerzas  $X_i^j$  como impulsoras de los flujos  $J_i^j$ . Cada  $J_i^j$  puede depender de todas las fuerzas y cantidades intensivas (por ejemplo, temperatura  $T$ ) asociadas con el proceso disipativo. El término  $Y_i^j$  es la fuerza de degradación generalizada. Los términos mencionados se representan en las siguientes ecuaciones.

$$X_i^j = \frac{\partial S'}{\partial p_i} \left( \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j} \right) \quad (3.5)$$

$$J_i^j = \frac{\partial \zeta_i^j}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$Y_i^j = \frac{\partial w}{\partial p_i} \left( \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j} \right) \quad (3.7)$$

Al relacionar la fuerza de degradación generalizada con la fuerza termodinámica generalizada se obtiene el coeficiente de degradación  $B_i$ , el cual mide cómo la generación y degradación de entropía interactúan a nivel de procesos  $p_i$ , en lugar de las variables fenomenológicas  $\zeta_i^j$ . Esto se representa en la Ecuación 3.8.

$$B_i = \frac{Y_i^j}{X_i^j} = \frac{\left( \frac{\partial w}{\partial p_i} \right) \left( \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j} \right)}{\left( \frac{\partial S'}{\partial p_i} \right) \left( \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j} \right)} = \frac{\left( \frac{\partial w}{\partial p_i} \right)}{\left( \frac{\partial S'}{\partial p_i} \right)} = \left. \frac{\partial w}{\partial S'} \right|_{p_i} \quad (3.8)$$

La relación entre la tasa de degradación y la tasa de generación de entropía se correlaciona con el coeficiente de degradación. Por lo tanto, la tasa de degradación de la Ecuación 3 quedaría de la siguiente manera:

$$B_i = \frac{Y_i^j}{X_i^j} = \frac{\left(\frac{\partial w}{\partial p_i}\right) \left(\frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j}\right)}{\left(\frac{\partial S'}{\partial p_i}\right) \left(\frac{\partial p_i}{\partial \zeta_i^j}\right)} = \frac{\left(\frac{\partial w}{\partial p_i}\right)}{\left(\frac{\partial S'}{\partial p_i}\right)} = \frac{\partial w}{\partial S'} \Big|_{p_i} \quad (3.9)$$

la cantidad total de degradación es una combinación lineal de los componentes totales de la entropía  $S_i$  producida por los procesos disipativos  $p_i$ .

### 3.2. Aplicación del teorema DEG al crecimiento de grieta por fatiga

Se define el parámetro de degradación ( $w$ ) como la longitud de la grieta ( $a$ ), es decir,  $w = a$ .

La generación de energía plástica en la punta de la grieta,  $W_p$ , es el proceso disipativo dominante  $p_i$ , el cual depende del número de ciclos  $N$  como variable fenomenológica. Por lo tanto, a partir de la ecuación (3.1) del teorema DEG se obtiene la siguiente expresión:

$$a = a \{W_p(N)\} \quad (3.10)$$

Aplicando regla de la cadena a ecuación 3.10, se obtiene la tasa de degradación

$$\frac{da}{dt} = \left( \frac{da}{dW_p} \frac{dW_p}{dN} \right) \left( \frac{dN}{dt} \right) = YJ \quad (3.11)$$

Se considera la entropía en función de la disipación plástica y el número de ciclos.

$$S' = S'_i \{W_p(N)\} \quad (3.12)$$

Aplicando regla de la cadena a la ecuación 3.12 se obtiene la tasa de entropía  $dS'_i/dt$  (generación de entropía):

$$\frac{dS'_i}{dt} = \left( \frac{dS'_i}{dW_p} \frac{dW_p}{dN} \right) \left( \frac{dN}{dt} \right) = XJ \quad (3.13)$$

La energía plástica se disipa como generación de entropía, es decir,  $dW_p = T dS'_i$ . También se considera que la frecuencia  $f = \frac{dN}{dt}$ . La fuerza generalizada  $X$ , el flujo generalizado  $J$  y la fuerza de degradación generalizada  $Y$ , quedan de la siguiente manera:

$$X = \frac{dS'_i}{dW_p} \frac{dW_p}{dN} = \frac{dS'_i}{dN} = \frac{\frac{dW_p}{T}}{dN} = \frac{1}{T} \frac{dW_p}{dN} \quad (3.14)$$

$$J = \frac{dN}{dt} = f \quad (3.15)$$

$$Y = \frac{da}{dW_p} \frac{dW_p}{dN} \quad (3.16)$$

El coeficiente de degradación es:

$$B = \frac{Y}{X} = \frac{\frac{da}{dW_p} \frac{dW_p}{dN}}{\frac{dS'_i}{dN} \frac{dW_p}{dN}} = \frac{da}{dS'_i} \quad (3.17)$$

Se considera la tasa de degradación en términos del coeficiente de degradación.

$$\frac{da}{dt} = YJ = BXJ \quad (3.18)$$

Para obtener la tasa de crecimiento de grieta, se divide la fuerza de degradación entre el flujo generalizado  $J$ .

$$\frac{\frac{da}{dt}}{\frac{dN}{dt}} = \frac{BXJ}{J} = BX = B \frac{1}{T} \frac{dW_p}{dN} \quad (3.19)$$

La tasa de crecimiento de grieta por fatiga queda en función del coeficiente de degradación  $B$ , la temperatura  $T$  y la tasa de disipación de energía plástica por ciclo, de acuerdo con la ecuación (3.20).

$$\frac{da}{dN} = B \frac{1}{T} \frac{dW_p}{dN} \quad (3.20)$$

Para deducir el termino  $\frac{dW_p}{dN}$  se propuso un modelo de la literatura con relación al crecimiento de grieta.

### 3.3. Generación de entropía para la falla por fatiga

Según Naderi *et al.* [60], la generación de entropía debida a conducción de calor es insignificante en procesos relacionados con la fatiga de bajo ciclo, así como en los que la generación de entropía debida a la deformación plástica es dominante. Por lo tanto, la generación de entropía se puede describir de la siguiente manera:

$$\dot{\gamma} = \frac{W_p}{T} \quad (3.21)$$

donde  $\dot{\gamma}$  es la tasa de generación de entropía ( $\dot{\gamma} \geq 0$ ),  $T$  es la temperatura superficial y  $W_p$  es la energía plástica cíclica por unidad de volumen [61], que se puede calcular utilizando la ecuación (3.22).

$$W_p = AN_f^\alpha \quad (3.22)$$

$N_f$  es el número de ciclos hasta la fractura. Las constantes  $A$  y  $\alpha$  son las especificaciones del material y están dadas por las ecuaciones (3.23) y (3.24), respectivamente.

$$A = 2^{2+b+c} \sigma_f' \varepsilon_f' \left( \frac{c-b}{c+b} \right) \quad (3.23)$$

$$\alpha = b + c \quad (3.24)$$

$\sigma_f'$  es el coeficiente de resistencia a la fatiga y  $\varepsilon_f'$  es el coeficiente de ductilidad a la fatiga, mientras que los parámetros  $b$  y  $c$  indican el exponente de resistencia a la fatiga y el exponente de ductilidad a la fatiga, respectivamente. Por lo tanto, la generación de entropía total ( $\gamma_f$ ) se puede obtener mediante la integración de la ecuación (3.21) hasta el tiempo  $t_f$  que ocurre la fractura.

$$\gamma_f = \int_0^{t_f} \left( \frac{W_p}{T} \right) dt \quad (3.25)$$

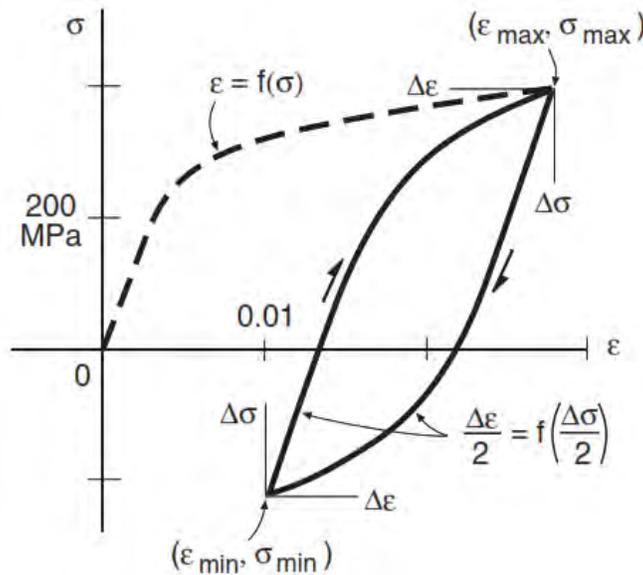
# CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL MODELO

---

El comportamiento elástico-plástico uniaxial de los materiales bajo carga cíclica a menudo se describe mediante la relación de Ramberg-Osgood [62] como se indica en la Ecuación. (4.1):

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left( \frac{\Delta\sigma}{2k'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (4.1)$$

donde  $E$  es el módulo elástico,  $k'$  es el coeficiente de resistencia cíclica y  $n'$  es el exponente de endurecimiento por deformación cíclica.  $\Delta\sigma$  y  $\Delta\varepsilon$  son las amplitudes de esfuerzo y deformación, respectivamente. La Ecuación. (4.1) considera la suma de la deformación elástica y plástica, y es representado mediante la línea punteada que se muestra en la Figura 4.1.

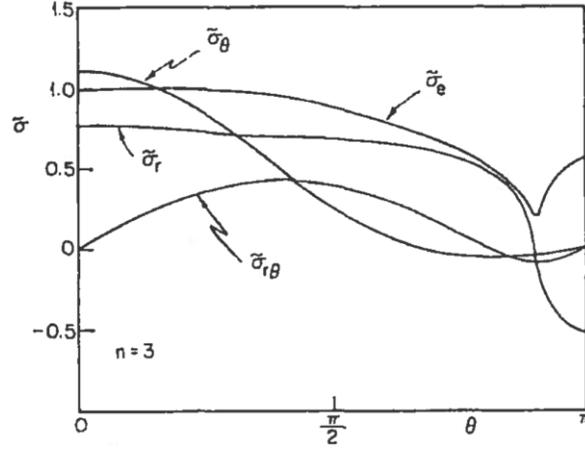


**Figura 4.1** Ejemplo de curva de esfuerzo-deformación de Ramberg-Osgood [5].

En condiciones de fluencia a pequeña escala, los componentes de esfuerzo cíclico y deformación plástica de los campos de singularidad HRR (Hutchinson, Rice y Rosengren) [63-64] que se muestra en la figura 4.2, por delante de la punta de grieta están dados por las Ecuaciones. (4.2a), (4.2b). Ambas ecuaciones son aplicables para materiales que obedecen la relación esfuerzo-deformación dada por la Ecuación (4.1).

$$\Delta\sigma_{ij} = \Delta\sigma'_y \left( \frac{\Delta K_I^2}{\alpha' \Delta\sigma_y'^2 I_{n'} r} \right)^{\frac{n'}{(1+n')}} \quad \tilde{\sigma}_{ij}(\theta; n') \quad (4.2a)$$

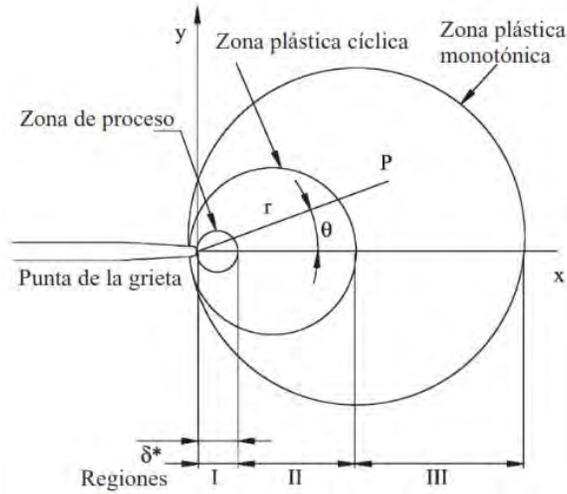
$$\Delta\varepsilon_{ij}^p = \frac{\alpha' \Delta\sigma'_y}{E} \left( \frac{\Delta K_I^2}{\alpha' \Delta\sigma_y'^2 I_{n'} r} \right)^{\frac{1}{(1+n')}} \quad \tilde{\varepsilon}_{ij}(\theta; n') \quad (4.2b)$$



**Figura 4.2** Componentes de los esfuerzos en la punta de la grieta con respecto al ángulo  $\theta$  [63].

$\Delta K_I$  es la amplitud de la intensidad de esfuerzo bajo carga de modo I (Figura 1.5) y  $\Delta\sigma'_y$  es la amplitud del esfuerzo de fluencia cíclica ( $\Delta\sigma'_y \sim 2\sigma'_y$ ), respectivamente. Además, los términos  $\tilde{\sigma}_{ij}(\theta; n')$  y  $\tilde{\varepsilon}_{ij}(\theta; n')$  son funciones de distribución angular adimensionales. Del mismo modo,  $I_{n'}$  es el parámetro adimensional del exponente  $n'$ .  $\theta$  y  $r$  son las posiciones angular y radial, respectivamente, de cualquier punto  $P$  desde la punta de la grieta, como se muestra en la Figura 4.1 y  $\alpha'$  viene dada por la ecuación (4.3).

$$\alpha' = \frac{2E}{(2k')^{\frac{1}{n'}} \Delta\sigma_y'^{(n'-1)/n'}} \quad (4.3)$$



**Figura 4.1** Regiones frente a la punta de una grieta. Modificado de [55].

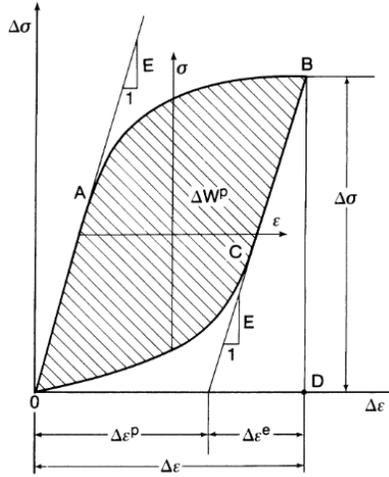
De las Ecuaciones (4.2a) y (4.2b) la multiplicación del esfuerzo y la deformación equivalentes a lo largo de la línea de fisura ( $\theta = 0$ ) viene dada por la Ecuación (4.4).

$$\Delta\sigma_{eq} \Delta\varepsilon_{eq} = \frac{\Delta K_I^2 \tilde{\sigma}_{eq}(0, n') \tilde{\varepsilon}_{eq}(0, n')}{E I_{n'} r} \quad (4.4)$$

Durante la carga cíclica, la energía se disipa debido a la deformación plástica. La energía de deformación plástica,  $\Delta W^p$  absorbida en un ciclo es el área del ciclo de histéresis (área 0ABC0 en la Figura 4.2) y para un material Masing [36] está dada por la ecuación (4.5).

$$\Delta W^p = \left( \frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \Delta\sigma \Delta\varepsilon^p \quad (4.5)$$

donde,  $\Delta\sigma$  es la amplitud de esfuerzo y  $n'$  es el exponente de endurecimiento por deformación cíclica.



**Figura 4.2** Ciclo de histéresis estable para un material de Masing [36].

Para una amplitud de esfuerzo y deformación equivalente especificado, la densidad de energía de deformación plástica cíclica en unidades de Joule por ciclo por unidad de volumen [65] viene dada por la ecuación (4.6).

$$\Delta W^p = \left( \frac{1 - n'}{1 + n'} \right) (\Delta\sigma)_{eq} (\Delta\varepsilon^p)_{eq} \quad (4.6)$$

Sustituyendo el valor de  $\Delta\sigma_{eq} \Delta\varepsilon_{eq}^p$  de la Ecuación (4.4) en la Ecuación. (4.6)

$$\Delta W^p = \left( \frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2 \tilde{\sigma}_{eq}(0; n') \tilde{\varepsilon}_{eq}(0; n')}{E I_{n'} r} \quad (4.7)$$

La Ecuación (4.6) representa la distribución de la densidad de energía de deformación plástica por ciclo delante de la punta de la grieta. Las funciones de distribución angular de esfuerzos y deformaciones equivalentes son  $\tilde{\sigma}_{eq}(0; n')$  y  $\tilde{\varepsilon}_{eq}(0; n')$ , respectivamente.  $I_{n'}$  es un parámetro adimensional del exponente  $n'$ .

La zona delante a la punta de la grieta está dividida en tres regiones como se muestra en la Figura 4.2. La región cercana a la punta de la grieta, conocida como zona de proceso (región I), es la región donde se acumula principalmente el daño [66]. Sea  $\delta^*$  (ver Figura 4.2) la longitud de la zona de proceso delante de la punta de la grieta, y es un parámetro dependiente del  $\Delta K_I$  [67] que se expresa mediante la ecuación (4.8).

$$\delta^* = \frac{\Delta K_I^2 - \Delta K_{th}^2}{\pi E \sigma_y'} \quad (4.8)$$

$\Delta K_{th}$  es el rango del factor de intensidad de tensión umbral. La energía plástica disipada en la zona de proceso sería la integración de la ecuación (4.7) sobre la zona de proceso. El valor finito del producto de la amplitud de esfuerzo y deformación plástica ( $\Delta\sigma_{eq}\Delta\varepsilon_{eq}^p$ ) en la zona de proceso se puede encontrar sustituyendo  $\delta^*$  en lugar de  $r$  en la Ecuación (4.4) [55]. Al integrar la Ecuación (4.7) a lo largo de la zona de proceso por delante de la punta de la grieta se obtiene la disipación de energía plástica por ciclo, que está representado en la ecuación (4.9).

$$\frac{dW_p}{dN} = \left( \frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2 \psi}{E I_{n'}} \quad (4.9)$$

donde  $\psi = \{\tilde{\sigma}_{eq}(0; n') \tilde{\varepsilon}_{eq}(0; n')\}$ . La función  $\psi$ , además del exponente de endurecimiento cíclico  $n'$ , depende de la naturaleza del problema plano que se esté considerando, es decir, esfuerzo o deformación plano.

Al sustituir la disipación de energía plástica mostrada en la ecuación (4.9) y sustituirla en el modelo formulado por el teorema DEG de la ecuación (3.20), se obtiene:

$$\frac{da}{dN} = B \frac{1}{T} \left( \frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\Delta K_I^2 \psi}{E I_{n'}} \quad (4.10)$$

La Ecuación (4.10) contiene el coeficiente de degradación B que representa la interacción de la generación de entropía y la propagación de grietas en el nivel del proceso de disipación de la deformación plástica [48]. Además, contiene términos que están en función del exponente de endurecimiento por deformación cíclica  $n'$ , como son  $I_{n'}$  y  $\psi$ . Las variables mencionadas anteriormente se pueden agrupar para formar la constante C.

$$C = B \frac{1}{T} \left( \frac{1 - n'}{1 + n'} \right) \frac{\psi}{E I_{n'}} \quad (4.11)$$

De acuerdo con la ley de Paris-Erdogan [6], la Ecuación (4.10) se puede expresar de la forma  $\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$ . Chand y Pandey [68] concluyeron que la fuerza impulsora de la grieta en la región de proceso (Región I) se considera como  $\Delta K - \Delta K_{th}$ , que es la amplitud efectiva del factor de intensidad de esfuerzo. Por lo tanto, la Ecuación (4.10) se simplifica en la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^2 \quad (4.12)$$

El término  $\Delta K_{th}$  de la Ecuación (4.12) es sensible a la relación de esfuerzos  $R$ . Las tendencias generales muestran  $\Delta K_{th}$  tiende a disminuir al aumentar  $R$  para muchos materiales en condiciones ambientales[55], pero para algunos materiales donde  $R > 0.5$ , la sensibilidad es menos pronunciada [68]. Klesnil y Lukáš [69] propusieron una relación entre  $\Delta K_{th}$  y  $R$ , dada por la ecuación (4.13):

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{tho}(1 - R)^\gamma \quad (4.13)$$

Donde  $R$  es la relación de esfuerzo,  $\Delta K_{tho}$  es la amplitud del factor de intensidad de esfuerzo umbral para  $R = 0$  y  $\gamma$  es una constante del material. La Ecuación (4.13) es útil cuando  $\Delta K_{th}$  no se obtiene de la literatura para un acero en específico [69].

El modelo propuesto de crecimiento de grieta está representado en la ecuación (4.12). El modelo tiene la ventaja de requerir un menor número de pruebas experimentales y estar fundamentado en los principios de la Termodinámica al considerar el teorema degradación- generación de entropía (DEG, por sus siglas en inglés) y con enfoque en la energía al relacionar la disipación plástica en el área del bucle de histéresis. Por lo tanto, el análisis de la degradación de la propagación de grietas por fatiga mediante el concepto de producción de entropía proporciona un método basado en principios físicos y no en relaciones empíricas como en otros modelos [6,31] para analizar el comportamiento de la propagación de grietas.

En la Tabla 4.1 se muestran los modelos que consideran el teorema DEG y están basados en el método de la energía. Un aspecto importante del modelo propuesto es que reduce una gran cantidad de variables con respecto al modelo de Hajshirmohammadi *et al* [9], por ejemplo el espesor ( $t$ ), el esfuerzo a la cedencia cíclica( $\sigma_0$ ), la relación entre el calor disipado y el trabajo plástico ( $\beta$ ) y el

parámetro adimensional ( $K'_{n'}$ ). No se realizó una comparación con el modelo propuesto debido a que Hajshirmohammadi *et al* [9] realizó su estudio únicamente en acero inoxidable 301.

**Tabla 4.1** Modelos de propagación de grieta basados en el teorema DEG.

Autor	Modelo	Constante
Idris <i>et al</i> [1]	$\frac{da}{dN} = B \frac{At \Delta K^4}{T \mu \sigma_y^2}$	$C = B \frac{At}{T \mu \sigma_y^2}$
Hajshirmohammadi y Khonsari [9]	$\frac{da}{dN} = B \frac{t}{T \sigma_0^2} \frac{\beta K'_{n'}}{4\pi E I_{n'}} \left( \frac{1-n'}{1+n'} \right) \Delta K^4$	$C = B \frac{t}{T \sigma_0^2} \frac{\beta K'_{n'}}{4\pi E I_{n'}} \left( \frac{1-n'}{1+n'} \right)$
Modelo propuesto	$\frac{da}{dN} = B \frac{1}{T} \left( \frac{1-n'}{1+n'} \right) \frac{\psi}{E I_{n'}} (\Delta K - \Delta K_{th})^2$	$C = B \frac{1}{T} \left( \frac{1-n'}{1+n'} \right) \frac{\psi}{E I_{n'}}$

Otra ventaja del modelo es que considera propiedades mecánicas y de fatiga de los materiales que están disponibles en la literatura [70], caso contrario al modelo de Idris *et al* [1] que sólo considera propiedades mecánicas como el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y el esfuerzo a la cedencia ( $\sigma_y$ ), y requiere de más pruebas experimentales para obtener la constante adimensional ( $A$ ) mostrado en su modelo. El modelo de Idris *et al* [1] se comparó con el modelo propuesto debido a que realizó estudios en aceros de bajo contenido de carbono, que fue el material usado en este trabajo. Esta comparación se muestra en el capítulo 6, donde el modelo propuesto tiene más precisión en la tasa de crecimiento de grieta que el modelo de Idris *et al* [1].

# CAPÍTULO V: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MODELO PROPUESTO

---

En este capítulo se describe el método experimental para realizar los ensayos de propagación de grietas por fatiga en el material acero AISI 1018. La finalidad de estas pruebas experimentales es obtener las mediciones de longitudes de las grietas y temperaturas de la punta de la grieta para determinar el coeficiente de degradación del material e incorporarlo en el modelo propuesto. Con los datos experimentales se realiza el análisis y la gráfica de la propagación de las grietas para validar el modelo mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ .

## 5.1. Diseño experimental

La metodología del diseño experimental (ver Figura 5.1) se basó en las recomendaciones de la norma ASTM E647-15 [2] para llevar a cabo el proceso experimental. En este proceso, se identificaron las necesidades de materia prima y el equipo experimental requerido.

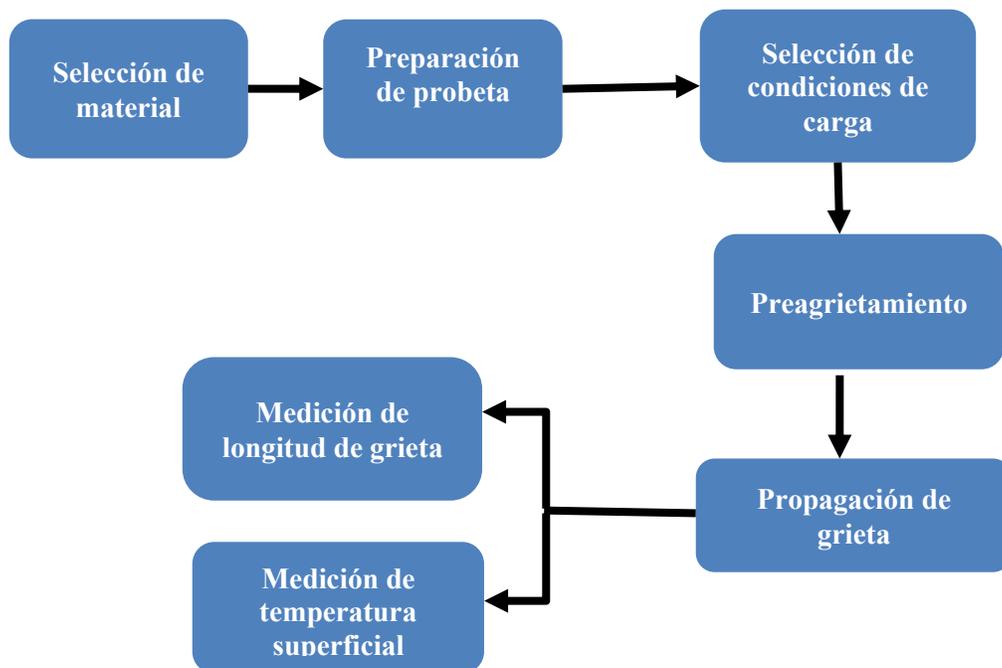


Figura 5.1 Metodología experimental.

### 5.1.1. Especificaciones y propiedades del material

El material usado para las probetas fue acero AISI 1018. El acero es de tipo estructural y de bajo contenido de carbono debido a su porcentaje de carbono. La composición química del material se encuentra en la Tabla 5.1 y las propiedades mecánicas del material se observan en la Tabla 5.2, las cuales, ambas tablas se obtuvieron a partir de la literatura.

**Tabla 5.1** Composición química del acero AISI 1018 [71].

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

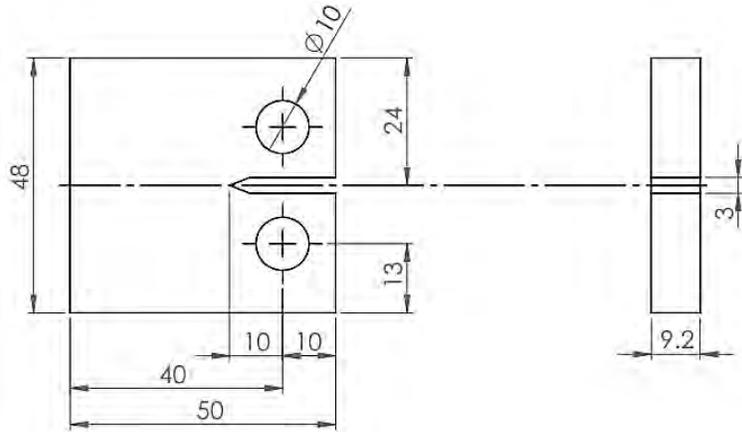
**Tabla 5.2** Propiedades mecánicas del acero AISI 1018 [72].

Resistencia última a la tensión ( $\sigma_u$ )	634 MPa
Punto de fluencia ( $\sigma_y$ )	386 MPa
% de elongación	27 %
Módulo de elasticidad (E)	200 MPa
Relación de Poisson ( $\nu$ )	0.29
Umbral del factor de intensidad de esfuerzo ( $\Delta K_{th}$ )	13.8 MPa $\sqrt{m}$
Tenacidad a la fractura ( $\Delta K_{IC}$ )	55.6 MPa $\sqrt{m}$

### 5.1.2. Geometría y dimensiones de las probetas

La geometría y dimensiones de las probetas están establecidas por la norma ASTM E467-15 [2]. La norma menciona que el tipo de muestra seleccionada dependerá del tipo de equipo, la capacidad del equipo y la forma en que el material está disponible. El método involucra el tipo de carga cíclica aplicada a determinadas probetas.

La probeta que se seleccionó fue de tipo tensión compacta (*CT*, por sus siglas en inglés), por el motivo de requerir de menor cantidad de material para su fabricación en comparación con las probetas M (T) y ESE(T). En la Figura 5.2 se muestran sus dimensiones en milímetros. Las dimensiones de mayor relevancia son: ancho ( $W=40$  mm) y espesor ( $B= 9.2$  mm) de acuerdo con las relaciones de geometría.



**Figura 5.2** Dimensiones de la probeta de tensión compacta (CT) en mm.

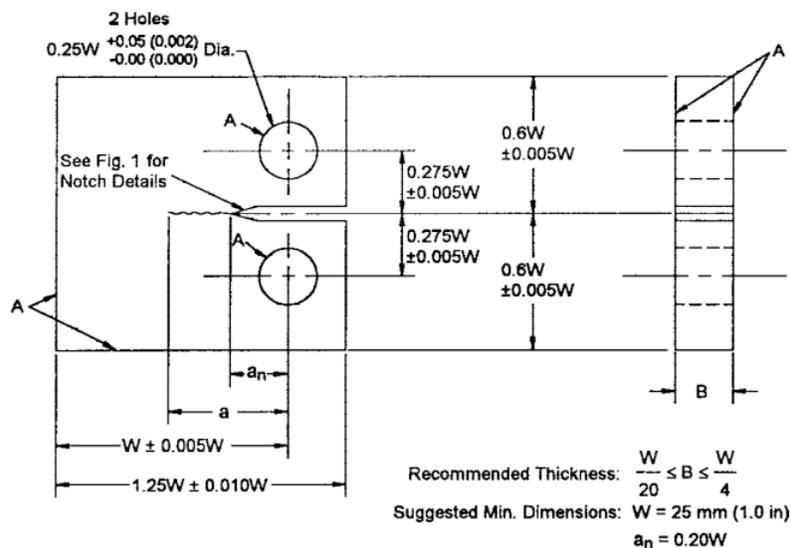
De acuerdo con la norma ASTM E647, el espesor mínimo recomendado es:

$$\frac{W}{20} \leq B \leq \frac{W}{4} \quad (5.1)$$

Sustituyendo  $W = 40$  mm en ecuación (5.1):

$$2 \leq B \leq 10 \quad (5.2)$$

El espesor propuesto de 9.2 mm está dentro del rango de valores recomendados por la norma ASTM E-647. Las dimensiones propuestas cumplen con lo establecido. En la figura 5.3 se muestra las demás relaciones de longitudes de la probeta, de acuerdo con la norma ASTM E-647. Las dimensiones de la probeta de tensión compacta C(T) se dan con respecto a la anchura ( $W$ ).



**Figura 5.3** Probeta de tensión compacta (CT) para pruebas de tasa de crecimiento de grietas por fatiga [2].

### **5.1.3. Fabricación de las muestras**

Las probetas de tensión compacta (CT) se realizaron a partir de una placa de acero AISI 1018 con medidas de  $10 \times 8 \times 3/8$  de pulgadas, y se empleó maquinado para obtener las dimensiones que se muestran en la Figura 5.2, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM E647 [2]. Se seleccionó la muesca tipo V y se realizó mediante el proceso de fresado. En el Anexo A se muestran más detalles del proceso de fabricación de las muestras.

### **5.1.4. Dimensión de los sujetadores**

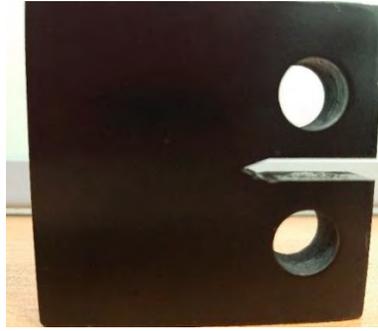
Para realizar el preagrietado y las pruebas de crecimiento de grietas fue necesario usar un par de sujetadores con sus respectivos pernos, esto debido a que la máquina de pruebas no contaba con los accesorios. Las dimensiones de los sujetadores y pernos que se utilizaron se ajustan con las dimensiones de las probetas C (T), y también se consideró la recomendación de la norma ASTM E647-15 [2]. Una de estas recomendaciones es el tipo de material de estos sujetadores, que es el acero AISI 4340 y tiene un esfuerzo de fluencia que varía entre 840 MPa y 1200 MPa, dependiendo del área de sección transversal del elemento. En el Anexo B se muestran las dimensiones de los sujetadores y los pernos.

### **5.1.5. Número de probetas**

El número de probetas se establecen en la norma ASTM E 647-15. La norma establece que a tasas de crecimiento de grietas superiores a  $10^{-8}$  m /ciclo, será de dos muestras como mínimo. Se propone hacer cuatro muestras para obtener datos confiables.

### **5.1.6. Preparación de probetas.**

Las probetas fueron pulidas en acabado espejo para tener una mejor visualización en el microscopio y un correcto seguimiento del crecimiento de la grieta. Se usaron lijas para el desbaste, de tamaño de grano grueso a tamaño de grano muy fino (de lija #100 hasta lija #2000). Los números de lijas usados se muestran en la Tabla 5.3. Se utilizó agua como medio de lubricación y el pulido se realizó de forma manual. Cada vez que se realizaba un cambio en el número de lija las probetas se giraron  $90^\circ$  para cambiar la dirección del lijado, de acuerdo con la norma ASTM E3-11 [73]. La cara menos pulida se pintó con aerosol de negro mate para aumentar la emisividad en la cámara termográfica (ver Figura 5.4).



**Figura 5.4** Cara de probeta pintado de negro mate.

Otro motivo de realizar el pulido fue para eliminar cualquier irregularidad dejado por el proceso de maquinado sobre las superficies de las probetas C (T); esto con el fin para facilitar la visualización de la longitud de la grieta en el microscopio, durante el proceso de preagrietado y crecimiento de grieta. En la Tabla 5.3 se presenta el orden en que se usaron las lijas para realizar el pulido en cada probeta C (T). En la Figura 5.5 se muestran las probetas C (T) pulidas para realizarles el preagrietado.

**Tabla 5.3** Secuencia para el pulido de probetas tipo CT.

No. de grano de lija
100
180
240
320
400
600
800
1000
1200
1500
2000



Figura 5.5 Probetas pulidas.

## 5.2. Cálculo de condiciones de carga

### 5.2.1. Cargas de pre agrietamiento

Una vez pulidas las probetas C (T) se les realizó una grieta previa con cargas de fatiga. El preagrietamiento de una muestra antes de la prueba de crecimiento de grieta, se realiza a intensidades de esfuerzos suficientes para provocar que se inicie una grieta desde la muesca inicial y se propague a una longitud que elimine el efecto de la muesca. Esta longitud de preagrietamiento es recomendado por la norma ASTM E647 considerando que no debe ser menor de 1 mm, 0.1B o  $h$  (altura de la muesca). Debido a las recomendaciones anteriores, se seleccionó una pregrieta de 1.33 mm.

Para disminuir la cantidad de tiempo necesario para que se produzca la grieta previa, la práctica común es iniciar la pregrieta con una carga superior a la que se utilizará durante la prueba de crecimiento de grieta y, posteriormente, reducir la carga para la prueba. Este procedimiento se realizó bajo condiciones de control de carga. Las cargas aplicadas fueron cíclicas de tipo sinusoidal con una frecuencia de 10 Hz y una relación de carga de  $R = 0.1$ . Los cálculos de cargas máxima, mínima y promedio se muestran a continuación:

El  $\Delta K$  para una probeta tipo compacta (CT) está dado por la ecuación (5.3) en la norma ASTM E647-15 [2].

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B \sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.866 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (5.3)$$

Donde

$$F(\alpha) = \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0.866 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (5.4)$$

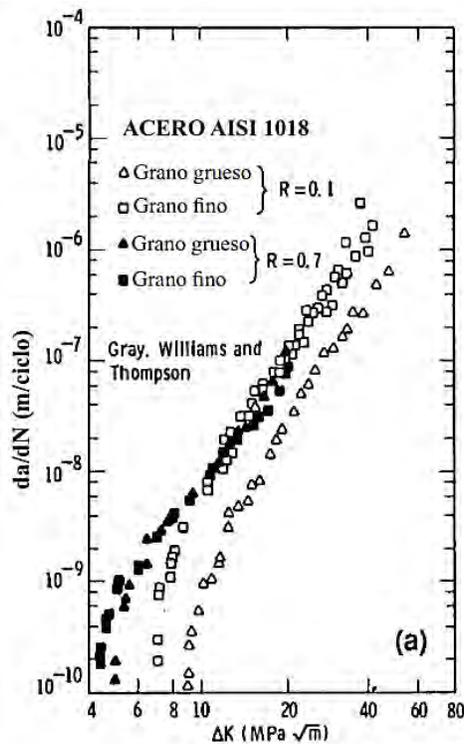
Por lo tanto:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B \sqrt{W}} F(\alpha) \quad (5.5)$$

Despejando  $\Delta P$  de la Ecuación (5.5):

$$\Delta P = \frac{\Delta K B \sqrt{W}}{F(\alpha)} \quad (5.6)$$

El valor inicial de  $\Delta K$  se consideró a partir las condiciones de grano grueso con  $R = 0.1$  del gráfico de  $\frac{da}{dN}$  vs  $\Delta K$  del material AISI 1018 [72] que se muestra en la Figura 5.6 y se seleccionó un valor de  $16.65 \text{ MPa m}^{1/2}$ . Se consideró la longitud relativa de grieta ( $\alpha = 0.25$ ) para encontrar  $F(\alpha)$  que es adimensional y sustituirlo junto con  $\Delta K$  en la ecuación (5.6) para encontrar la amplitud de esfuerzo ( $\Delta P$ ). Los valores calculados se establecen en la tabla 5.4, para la etapa de preagrietamiento de las muestras.



**Figura 5.6** Diagrama de crecimiento de grieta por fatiga para acero AISI 1018. Modificado de [72].

La relación de cargas es:

$$R = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (5.7)$$

Despejando  $P_{min}$  de Ecuación (5.7).

$$P_{min} = R P_{max} \quad (5.8)$$

La amplitud de carga es

$$\Delta P = P_{max} - P_{min} \quad (5.9)$$

Sustituyendo la Ecuación (5.8) en Ecuación (5.9) y despejando  $P_{max}$  :

$$P_{max} = \frac{\Delta P}{1 - R} \quad (5.10)$$

La carga promedio se calcula mediante la Ecuación (5.11):

$$P_{prom} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (5.11)$$

**Tabla 5.4** Datos iniciales para cálculos de pregrieta.

Variable	Símbolo	Valor
Amplitud del factor intensidad de esfuerzo	$\Delta K$	16.65 MPa m <sup>1/2</sup>
Tamaño de grieta	$a$	0.001 m
Ancho de probeta	$W$	0.040 m
Longitud relativa de grieta ( $\alpha$ )	$a/W$	0.25
Espesor	$B$	0.0092 m
Relación de cargas	$R$	0.1
Amplitud de carga	$\Delta P$	6.309 kN
Carga máxima	$P_{m\acute{a}x}$	7.01 kN
Carga mínima	$P_{m\acute{i}n}$	0.701 kN
Carga promedio	$P_{prom}$	3.855 kN

### 5.2.2. Cargas de crecimiento de grieta por fatiga

Para la prueba de crecimiento de grieta por fatiga, se consideró el mismo valor de relación de carga ( $R = 0.1$ ), ciclos de carga sinusoidal y frecuencia ( $f = 10$  Hz) que el proceso de preagrietamiento. Para el valor inicial de  $\Delta K$  en la prueba de crecimiento de grieta se retomó a partir del gráfico de  $\frac{da}{dN}$  vs  $\Delta K$  del material AISI 1018 [72] que se muestra en la Figura 5.6 y se seleccionó un valor de 17 MPa m<sup>1/2</sup>. Se consideró la longitud relativa de grieta ( $\alpha = 0.282$ ) para encontrar  $F(\alpha)$  y sustituirlo junto con  $\Delta K$  en la ecuación (5.6) para encontrar la amplitud de esfuerzo ( $\Delta P$ ). Los valores calculados se establecen en la Tabla 5.5.

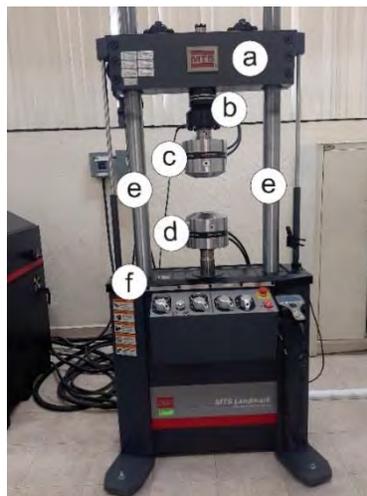
**Tabla 5.5** Datos iniciales para cálculos de ensayo de crecimiento de grietas.

Variable	Símbolo	Valor
Amplitud del factor intensidad de esfuerzo	$\Delta K$	17 MPa m <sup>1/2</sup>
Tamaño de grieta	a	0.01133 m
Ancho de probeta	W	0.040 m
Longitud relativa de grieta (a /W)	$\alpha$	0.282
Espesor	B	0.0092 m
Relación de cargas	R	0.1
Amplitud de cargas	$\Delta P$	5.907 kN
Carga máxima	P <sub>máx</sub>	6.56 kN
Carga mínima	P <sub>min</sub>	0.656 kN
Carga promedio	P <sub>prom</sub>	3.609 kN

### 5.3. Descripción del equipo

El equipo para realizar los ensayos de propagación de grietas fue un equipo de fatiga de la marca MTS Landmark®. Este equipo está conformado por una máquina universal MTS Landmark® Modelo 370.10, la unidad de potencia hidráulica MTS SilentFlo 515 Modelo 515.11/07, el módulo de control MTS FlexTest 40, la bomba hidráulica y un equipo de cómputo con el software MTS TestSuite necesario para controlar el equipo. Los componentes mencionados tienen las siguientes características:

La máquina universal (Figura 5.7) suministra la carga que se aplica a la probeta. Tiene incorporada una celda de carga con capacidad de  $\pm 100$  kN y está constituida por un cabezal superior, un cabezal inferior, dos columnas guías y una mordazas superior e inferior para sujetar los materiales de ensayo.



**Figura 5.7** Máquina universal MTS Landmark®. a) Cabezal superior. b) Celda de carga. c) Mordaza superior. d) Mordaza inferior. e) Columnas. f) Cabezal inferior.

La unidad de potencia (ver Figura 5.8a) controla el sistema hidráulico de la máquina universal, el flujo de la bomba hidráulica y mantiene la temperatura de funcionamiento adecuada del fluido hidráulico. El módulo de control MTS FlexTest 40 (Figura 5.8b) es la interfaz de comunicación entre la computadora y la máquina universal. Por último, la bomba hidráulica (Figura 5.8c) envía el flujo de aceite para mover los cabezales.



a) Unidad de potencia hidráulica.



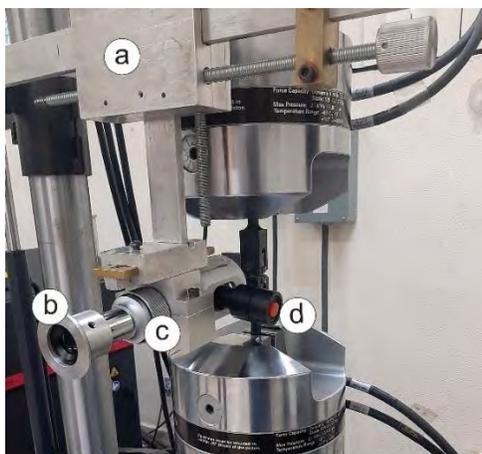
b) Módulo de control MTS FlexTest 40.



c) Bomba hidráulica.

**Figura 5.8** MTS Landmark® (Centro de Investigación e Innovación Tecnológica “CIITEC”, IPN).

Para obtener la medición de longitud de la grieta se utilizó un microscopio portátil óptico portable Struers modelo PSM- 10 (ver Figura 5.9), el cual se montó en un carro que permitía desplazarse tanto vertical como horizontalmente, para poder seguir la trayectoria de la punta de grieta. El microscopio óptico tiene incorporado un ocular de medición con una regla graduada en 0.03 mm y un lente de objetivo que permite aumentos de 40 y 60x. El microscopio se colocó al frente de la muestra y al oprimir el botón de la lámpara LED incorporado en el microscopio, se tenía una mejor visualización de la superficie para un correcto seguimiento de la punta de la grieta. Las observaciones se hicieron con aumento del microscopio a 40x.



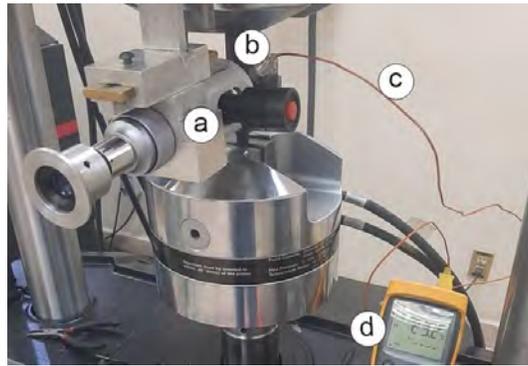
**Figura 5.9** Microscopio óptico portable PSM-10 Struers. a) Carro portable, b) Ocular de medición, c) Lente de objetivo, d) Botón de luz led.

Para la medición de la temperatura superficial de la muestra se usó una cámara infrarroja HT-18 con resolución de 220 x 160 píxeles y sensibilidad térmica de 0.07 °C. La cámara infrarroja fue instalada en la parte posterior de la probeta y se sujetó en un tripié (ver Figura 5.10). El registro de la temperatura se hizo simultáneamente con la medición del crecimiento de grieta mediante captura de imágenes.



**Figura 5.10** Configuración con cámara termográfica. a) Microscopio, b) Probeta, c) Cámara termográfica, d) Tripié.

Otro método de medición de temperatura fue colocar termopares tipo K modelo Fluke 52 II (ver Figura 5.11). Se usó cinta adhesiva laminar para fijar las terminales de los termopares a 1.33 milímetros de la punta de la grieta (ver Figura 5.12). Las lecturas de los valores de temperatura se registraban en un monitor, y se hizo en simultáneamente con las lecturas del microscopio en cada longitud de grieta (0.33 mm).



**Figura 5.11** Configuración con termopares. a) Microscopio, b) Cinta adhesiva laminar, c) Termopar, d) Monitor del termopar.



**Figura 5.12** Observación del microscopio con aumento de 40x. a) Termopar, b) Grieta.

# CAPÍTULO VI: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 6.1. Comparación del modelo propuesto con el modelo de Idris

El modelo propuesto dado en la ecuación (4.13) se comparó con el modelo de Idris *et al* [1] mostrado en la Tabla 4.1 para un acero AISI 1020. Esto se realizó para comprobar que el modelo puede extender su rango de aplicación en un acero diferente al AISI 1018. Los datos de las propiedades del material fueron obtenidos de la literatura [1,74] y se muestran en la Tabla 6.1.

**Tabla 6.1** Propiedades del acero AISI 1020 [1,74].

Propiedad de material	Valor
Coefficiente de degradación (B)	0.287
Temperatura (T)	273.7 K
Exponente de endurecimiento (n')	0.18
Distribución angular adimensional de esfuerzo y deformación ( $\psi$ )	0.94479
Módulo de Young (E)	203 GPa
Parámetro adimensional del exponente de endurecimiento ( $I_{n'}$ )	3.4
Rango del umbral del factor de intensidad de esfuerzo ( $\Delta K_{tho}$ )	10 MPa m <sup>1/2</sup>

Con los datos de la Tabla 6.1 se obtiene la constante de integración C del modelo propuesto. Al sustituir valores en la Ecuación (4.11) se obtiene un valor adimensional de  $9.97 \times 10^{-10}$ . De acuerdo con Pandey [52], el valor de  $\gamma$  es igual a 0.3 para aceros. Considerando que  $R = 0.1$  y  $\Delta K_{tho} = 10 \text{ MPa } \sqrt{m}$ , se sustituyen los valores mencionados en la Ecuación (4.13) para obtener  $\Delta K_{th}$ , con un resultado de  $9.68 \text{ MPa } \sqrt{m}$ .

El modelo obtenido para el material AISI 1020 a partir de las propiedades del material reportados en la literatura [60-61] es:

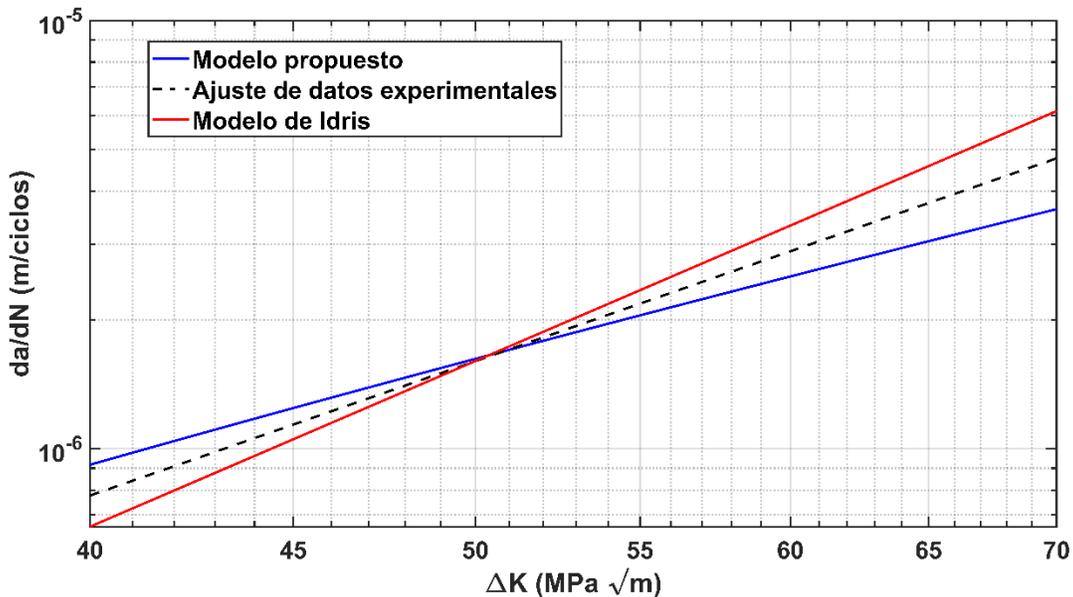
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^2 = 9.97 \times 10^{-10} (\Delta K - 9.68 \text{ MPa } \sqrt{m})^2$$

En la Tabla 6.2 se muestran los parámetros para el modelo propuesto. Idris *et al* [75] reportó los parámetros C y m del ajuste de sus datos experimentales del material AISI 1020 y su modelo.

**Tabla 6.2** Parámetros de ajuste para los modelos de propagación de grieta.

Material	Modelo Propuesto		Ajuste de datos experimentales [75].		Modelo de Idris [75].	
	$C$	$m$	$C$	$m$	$C$	$m$
Acero AISI 1020	9.97E-10	2	4.9736E-12	3.2418	2.6026E-13	3.9961

En la Figura 6.1 se muestra la gráfica doblemente logarítmica de la tasa de crecimiento  $\left(\frac{da}{dN}\right)$  con la amplitud del factor de intensidad de esfuerzo ( $\Delta K$ ). Los modelos se analizaron en un rango de la amplitud del factor de intensidad de esfuerzo de 40 a 70 MPa m<sup>1/2</sup>, que es el intervalo que analizó Idris *et al* [1] en el material AISI 1020. Se muestra un comportamiento lineal del modelo propuesto con el modelo experimental. Al igual que el modelo de Idris, existe una intersección en un punto con el modelo experimental cuando el factor de intensidad de esfuerzos alcanza un valor de 50 MPa m<sup>1/2</sup>. En el modelo propuesto se observa una cercanía con el modelo experimental, a pesar de tener un valor diferente en la constante  $m$ .



**Figura 6.1** Comparación de los modelos.

Se usó el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE, por sus siglas en inglés) para medir la precisión de predicción del modelo propuesto. En la Tabla 6.3, se muestran los valores de porcentajes de error del modelo propuesto y el modelo de Idris *et al* [1] con respecto al modelo experimental. De acuerdo con Frechtling [76], si los valores del MAPE están entre el 10% y el 20% son considerados como un buen pronóstico. Los resultados muestran que el modelo propuesto tiene mayor precisión que el modelo de Idris [1]. Los cálculos de los valores de MAPE, se encuentran en el Anexo C.

**Tabla 6.3** Comparación de los modelos con MAPE.

	Modelo Propuesto	Modelo de Idris [1]
MAPE	13.95 %	14.82%

## 6.2. Resultados experimentales del acero AISI 1018

Se observó una clara diferencia visual en ciertas regiones superficiales de sección fracturada de la probeta (ver Figura 6.2). La “región a” mostró condiciones de superficie lisa y plana, lo que demostró un crecimiento gradual de la grieta y representa la etapa de propagación de grieta por fatiga. También se notó que no hubo alguna marca de playa visible a simple vista en dicha región. Esto comprobó, de acuerdo con la literatura [77-78], que las marcas de playa en la superficie de la fractura no son visibles a simple vista cuando se usa una carga de amplitud constante, caso contrario con las cargas de amplitud variable, que sí son vistas a simple vista.

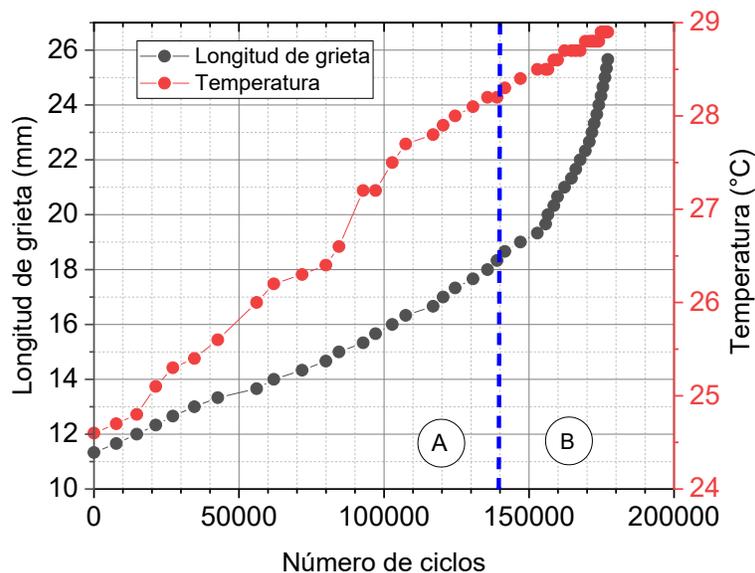
La “región b” mostró condiciones de superficie rugosa e irregular y se relacionó con un crecimiento de grieta inestable. También se observó un desprendimiento irregular en ambos extremos de la probeta. El cambio de superficie liso y rugoso se puede distinguir notoriamente, y está relacionado con el crecimiento de grieta estable a inestable.



**Figura 6.2** Superficie fracturada de probeta CT. a) Región de propagación de grieta, b) Región de crecimiento inestable de grieta.

La gráfica de longitud de grieta contra ciclos de fatiga (a-N) del acero AISI 1018 se muestra en la Figura 6.3. De acuerdo con los datos experimentales de propagación de grietas por fatiga, inicialmente la grieta creció lentamente como se reporta en la literatura [6], y el crecimiento de grieta se aceleró después de 140000 ciclos después de una longitud de 18.5 mm. La tasa de crecimiento de la grieta aumentó junto con el número de ciclos. En el Anexo D se muestran los datos de crecimiento de grietas de las probetas.

El número de ciclos hasta la fractura para el acero AISI 1018 fueron en promedio de 174773 ciclos con las condiciones de carga mostrados en la Tabla 5.5. La fractura total de la probeta es el punto final de la curva mostrado en la Figura 5.3.

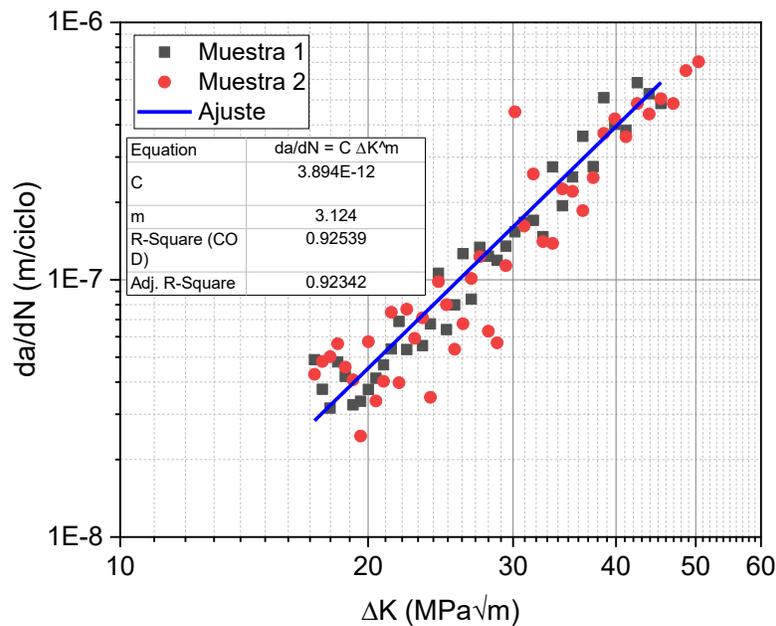


**Figura 6.3** Curvas de temperatura y longitud de grieta del ensayo experimental. a) Región estable, b) Región inestable.

La curva de temperatura con respecto al número de ciclos se muestra en la Figura 6.3. Los datos de temperatura se obtuvieron de termopares, y la cámara termográfica se usó para corroborar los datos. Se registró un incremento lento y constante de la temperatura desde el inicio hasta los 140000 ciclos. Después de los 140000 ciclos, la temperatura aumentó aceleradamente hasta la fractura total de la probeta que corresponde a 174773 ciclos. El incremento estable de temperatura es por el equilibrio que existe entre la disipación de calor y la generación de energía por deformación plástica, que ha sido reportado por Meneghetti y Ricotta [7].

El incremento inestable de temperatura representa en un intervalo del 5 al 10% de la vida de fatiga [7], por lo tanto, el aumento acelerado de la temperatura representa una cantidad de ciclos muy pequeña. La temperatura inicial de la probeta fue de 24.6 °C y el registro final fue de 29.2 °C. incremento de temperatura total de la probeta fue de 4.6 °C.

En la figura 6.4 se muestra el comportamiento de la tasa de propagación de grieta respecto a la amplitud del factor de intensidad de esfuerzos. Mediante un ajuste de los datos experimentales se obtuvieron las constantes de la ley de Paris, y corresponden a  $C = 3.894 \times 10^{-12}$  y  $m = 3.124$ . Hay una relación logarítmica lineal entre la amplitud del factor de intensidad de la tensión ( $\Delta K$ ) y la tasa de crecimiento de grieta  $\left(\frac{da}{dN}\right)$ . Los resultados del modelo de Paris coincidieron con los datos experimentales y se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.92.



**Figura 6.4** Datos experimentales de tasa de crecimiento de grietas.

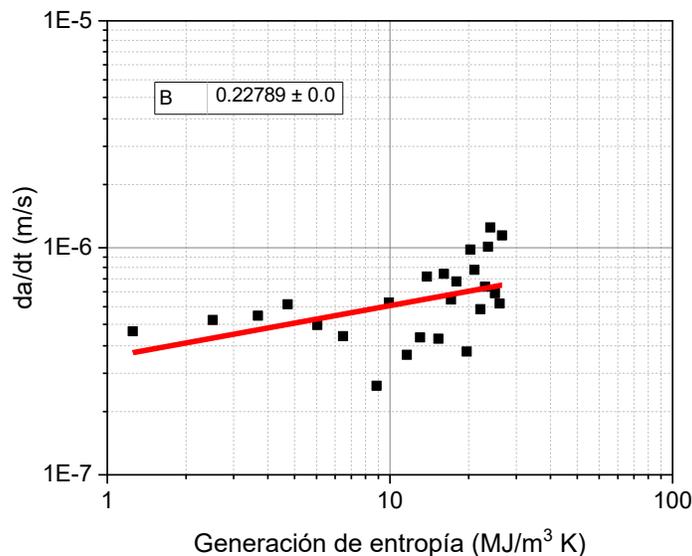
### 6.3. Validación experimental del modelo propuesto en acero AISI 1018

La relación entre la tasa de degradación ( $\frac{da}{dt}$ ) y la generación de entropía ( $\gamma$ ) asociada con el coeficiente de degradación B para el acero AISI 1018 se muestra en la Figura 6.5. La generación de entropía para este material se determinó al usar la ecuación (3.25) y las propiedades cíclicas mostradas en la Tabla 6.6. La generación de entropía hasta la fractura (174773 ciclos) resultó con un valor de  $28.5 \frac{MJ}{m^3 K}$ .

**Tabla 6.6** Propiedades mecánicas y cíclicas del acero AISI 1018 [79].

Propiedad del material	Valor
Exponente de resistencia a fatiga (b)	-0.11
Exponente de ductilidad a fatiga (c)	-0.41
Coefficiente de resistencia a fatiga ( $\sigma_f'$ )	785 MPa
Coefficiente de ductilidad a fatiga ( $\epsilon_f'$ )	0.19

El valor de B se estableció al encontrar la pendiente del ajuste lineal de la tasa de degradación respecto a la generación de entropía, correspondiendo al valor de 0.227. Este valor se utiliza para predecir la tasa de crecimiento de grieta por fatiga del acero AISI 1018 en condiciones de cargas de amplitud constante.



**Figura 6.5** Datos experimentales de tasa de crecimiento de grietas.

La temperatura mostró un aumento de décimas de grados a medida que aumentaba el número de ciclos (ver Figura 6.3). La temperatura inicial registrada fue de 24.6 °C y finalizó con 29.2 °C. La diferencia de temperatura del registro fue de 4.6 °C. La variable  $T$  que corresponde a la temperatura superficial en el modelo propuesto en la ecuación 4.2, se consideró 273.6 K como su valor numérico.

**Tabla 6.5** Obtención de datos calculados para el modelo propuesto.

Propiedad del material	Valor
Temperatura, $T$	273.6 K
Coefficiente de degradación, $B$	0.227

Una vez obtenido el coeficiente de degradación ( $B$ ) y la temperatura superficial ( $T$ ), los demás datos del material AISI 1018 necesarios para el modelo se obtuvieron de la literatura [72,74], que se muestran en la Tabla 6.6.

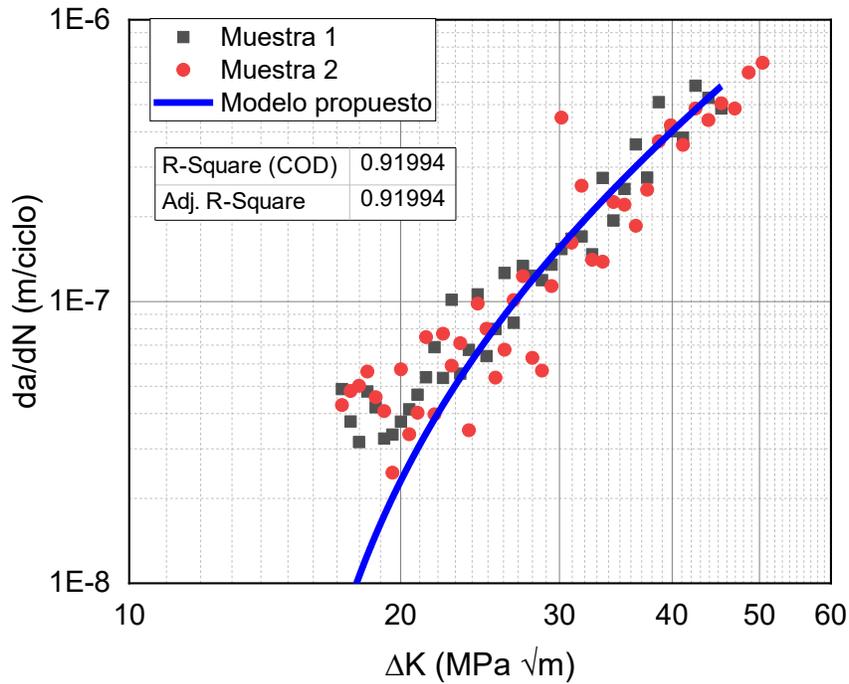
**Tabla 6.6** Propiedades mecánicas y cíclicas del acero AISI 1018 [72,74].

Propiedad del material	Valor
Módulo de elasticidad, $E$	200 GPa
Umbral del factor de intensidad de esfuerzo, $\Delta K_{th}$	13.8 MPa $\sqrt{m}$
Tenacidad a la fractura ( $\Delta K_{IC}$ )	55.6 MPa $\sqrt{m}$
Exponente de endurecimiento por deformación cíclica ( $n'$ )	0.27
Parámetro de distribución angular no dimensional ( $\psi$ )	0.95
Parámetro adimensional del exponente $n'$ ( $I_{n'}$ )	3.66

Con los datos de las Tablas 6.5 y 6.6 se obtiene la constante de integración  $C$  del modelo propuesto. Al sustituir valores en la ecuación (4.11) se obtiene el resultado adimensional de  $C = 6.19 \times 10^{-10}$ :

El modelo propuesto para la tasa de propagación de grietas del acero AISI 1018 se muestra en la Ecuación (6.1). Se determinó el coeficiente de determinación del modelo propuesto mediante ajuste lineal con los datos de dos muestras. El coeficiente de determinación resultó con un valor de 0.919 y se muestra en la Figura 6.6.

$$\frac{da}{dN} = 6.19 \times 10^{-10} (\Delta K - 13.8 \text{ MPa}\sqrt{m})^2 \quad (6.1)$$



**Figura 6.6** Modelo propuesto en tasa de crecimiento de grietas.

Se puede concluir que el modelo propuesto mostrado en la Figura 6.6 tiene una buena predicción en la tasa de crecimiento de grieta. Para modelos matemáticos con un valor de  $R^2$  superior a 0.90, la calidad de regresión se considera muy bueno, de acuerdo con Sivák y Ostertagová [67]. El modelo propuesto no se aleja mucho del coeficiente de determinación del ajuste de datos experimentales del acero AISI 1018 que obtuvo un valor de 0.92, a pesar de la dispersión de los datos experimentales. Esto demuestra que usando propiedades cíclicas y de temperatura en el modelo puede obtenerse valores cercanos a los datos experimentales y la ley de Paris. La generación de entropía y el crecimiento de grietas están estrechamente relacionados debido al coeficiente de degradación B, lo que permite la fácil determinación de la ley empírica de Paris Erdogan del crecimiento de grietas a partir de las consideraciones del teorema DEG.

## Conclusiones

En este trabajo se propuso un modelo del crecimiento de grieta por fatiga en acero AISI 1018 a través del método de la energía. El modelo se basó en el teorema de degradación-generación de entropía (DEG, por sus siglas en inglés). Se requirió obtener la generación de entropía, por lo que se consideró como variables principales la medición de temperatura y longitud de grieta en pruebas de carga de amplitud constante de bajo ciclaje. De acuerdo con el diseño experimental descrito en el Capítulo 5 basado en la norma ASTM E-647, los resultados obtenidos demostraron que:

- a) La aplicación de cargas cíclicas al material provocó disipación de calor por delante de la punta de la grieta. Se registraron las lecturas de temperatura mediante termopares. La temperatura aumentaba a medida que crecía la longitud de la grieta y el número de ciclos. Al comienzo de la prueba la temperatura aumentó rápidamente, después la temperatura tiene un aumento estable y al acercarse a la falla final registrado en 174 773 ciclos para el acero AISI 1018, la temperatura aumentó aceleradamente hasta la fractura final de la pieza. Por lo tanto, una variable a considerar en modelos de propagación de grietas es la temperatura, debido a su incremento constante cuando crece la grieta en la etapa de propagación de grieta.
- b) El modelo propuesto de crecimiento de grieta presenta una buena relación con la Ley de Paris al tener un coeficiente de determinación  $R^2$  superior de 0.9, lo cual indica una muy buena predicción del modelo con respecto datos experimentales.
- c) Se extendió la aplicabilidad del modelo propuesto de crecimiento de grieta al considerar dos diferentes aceros, tales como el AISI 1018 y el AISI 1020 y demostrar resultados con éxito.
- d) No se logró incluir los parámetros del historial de carga porque el modelo fue aplicado a fatiga de amplitud de carga constante y no de amplitud de carga variable, también por las condiciones del equipo de laboratorio.

## **Actividades futuras**

El crecimiento de grieta por fatiga se puede presentar en una amplia variedad de condiciones como ambiental, carga, frecuencia, etc. Por esta razón, su estudio es muy amplio e importante. Al estimar la vida útil de componentes agrietados, se pueden definir los intervalos de inspección y mantenimiento de forma específica. A continuación, se proponen actividades futuras a considerar en el desarrollo de modelos de crecimientos de grietas por fatiga:

- Estudio de modelos de crecimiento de grietas por fatiga en ambientes corrosivos.
- Proponer técnicas de automatización para medición de longitudes de grieta.
- Investigar variables involucradas en la propagación de grieta en condiciones de altas temperaturas.
- Ampliar el estudio de propagación de grietas en modos I y II de desplazamiento de grieta.
- Analizar modelos de crecimiento de grietas sometidos a carga variable.

## Referencias bibliográficas

- [1] R. Idris, S. Abdullah, P. Thamburaja and M. 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. Doi: 10.1007/s10704-021-00525-y.
- [2] ASTM E647-15, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", 2015.
- [3] 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.
- [4] C. S. Pande, "Fundamentals of fatigue crack initiation and propagation: Some thoughts" *Fatigue of Materials II*, pp. 3–15, 2013.
- [5] N. E. Dowling, S. L. Kampe, and M. V. Kral, *Mechanical behavior of materials: Engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. Hoboken, NJ: Pearson, 2019.
- [6] P. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation laws" *Journal of Basic Engineering*, vol.85, no.4, pp. 528-533, 2013.
- [7] 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. Doi: 10.1016/j.tafmec.2019.102405.
- [8] R. Idris. S. Abdullah, P. Thamburaja, y M. Z. Omar, "Prediction of fatigue crack growth rate base don entropy generation", *Entropy*, vol. 22, núm. 1, p. 9, dic. 2019, doi: [https://doi.org/ 10.3390/e22010009](https://doi.org/10.3390/e22010009).
- [9] B. Hajshirmohammadi y M.M. Khonsari, "On the entropy of fatigue crack propagation", *Int. J. Fatigue*, vol. 133, p. 105413, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105413>.
- [10] H. Quan and R. C. Alderliesten, "The relation between fatigue crack growth rate and plastic energy dissipation in 7075-T6," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 252, p. 107765, 2021
- [11] W. Schütz, "A history of fatigue," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 54, no. 2, pp. 263–300, 1996.
- [12] D. Gross, "Some remarks on the history of Fracture Mechanics," *The History of Theoretical, Material and Computational Mechanics - Mathematics Meets Mechanics and Engineering*, pp. 195–209, 2014.

- [13] S. D. Antolovich, A. Saxena, and W. W. Gerberich, “Fracture mechanics – an interpretive technical history,” *Mechanics Research Communications*, vol. 91, pp. 46–86, 2018.
- [14] R. W. Hertzberg, et al, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, 5th ed., U.S.A.: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [15] Y.-L. Lee, *Fatigue testing and analysis theory and Practice*. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [16] D. Askeland and P. Fulay, *Essentials of materials science and engineering*. Australia: Cengage Learning, 2009.
- [17] Charles, F. Crane and J. Furness, *Selection and use of engineering materials*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.
- [18] F. Campbell, *Fatigue and fracture*. Ohio: ASM International, 2013.
- [19] R. Budynas, J. Nisbett and J. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*, 10th ed. New York, 2015, pp. 274-338.
- [20] A. Bhaduri, “Mechanical properties and working of metals and alloys,” *Springer Series in Materials Science*, 2018.
- [21] N. Perez, “*Fracture Mechanics*”, 2nd ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.
- [22] R. L. Norton, R. S. M. Ángel, C. O. Correa y M. A. Alvarado, *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos*. Madrid: McGraw-Hill, 2013.
- [23] D. R. Askeland y W. J. Wright, *Ciencia e Ingeniería de Materiales, Séptima Edición*. México D.F: Cengage Learning, 2017.
- [24] P. Kumar, *Elements of fracture mechanics*. New Delhi: McGraw Hill, 2009, pp. 5-6.
- [25] S. Maiti, *Fracture Mechanics*. India: Cambridge University Press, 2015.
- [26] A. Zehnder, *Fracture mechanics*. London: Springer, 2012.
- [27] D. Gross and T. Seelig, “Linear Fracture Mechanics,” *Mechanical Engineering Series*, pp. 67–157, 2017.
- [28] A. Ochsner, *Continuum damage and fracture mechanics*. Singapore: Springer, 2016.
- [29] J.R. Rice, Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue, *Fatigue Crack Propagation*, ASTM STP 415, Am. Soc. Test. Mats. 1967.

- [30] N. Ranganathan, F. Chalon, S. Meo, "Some aspects of the energy-based approach to fatigue crack propagation", *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, No. 10-11, pp. 1921-1929, 2008.
- [31] G. Lesiuk, M. Szata, D. Rozumek, Z. Marciniak, J.A.F.O. Correia, A.M.P. De Jesus, Energy description of fatigue crack growth process - Theoretical and experimental approach, in: *Procedia Struct. Integr.*, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.128>.
- [32] A. Cheng, N. Chen and Y. Pu, "An energy principles based model for fatigue crack growth prediction", *International Journal of Fatigue*, vol. 128, p. 105198, 2019. Doi: [10.1016/j.ijfatigue.2019.105198](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105198).
- [33] M. Sangid, "The physics of fatigue crack initiation", *International Journal of Fatigue*, vol. 57, pp. 58-72, 2013. Doi: [10.1016/j.ijfatigue.2012.10.009](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.10.009).
- [34] Eshelby JD, "Dislocations as a cause of mechanical damping in metals", *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 197, no. 1050, pp. 396-416, 1949. Doi: [10.1098/rspa.1949.0072](https://doi.org/10.1098/rspa.1949.0072).
- [35] C. Wert, "Internal friction in solids", *Journal of Applied Physics*, vol. 60, no. 6, pp. 1888-1895, 1986. Doi: [10.1063/1.337237](https://doi.org/10.1063/1.337237). Grill, "Diamond-like carbon: State of the art", *Diam. Relat. Mater.*, vol. 8, núm. 2-5, pp. 428-434, 1999, doi: [10.1016/s0925-9635\(98\)00262-3](https://doi.org/10.1016/s0925-9635(98)00262-3).
- [36] J. D. Morrow, "Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals," *Internal Friction, Damping, and Cyclic Plasticity*, ASTM STP 378, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 45-84, 1965.
- [37] Kaleta J, Blotny R, Harig H. Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions. *J Test Eval* 1991;19:326-33.
- [38] Hodowany J. On the conversion of plastic work into heat. California Institute of Technology, 1997.
- [39] Kapoor R, Nemat-Nasser S. Determination of temperature rise during high strain rate deformation. *Mech Mater* 1998;27:1-12. doi:[10.1016/S0167-6636\(97\)00036-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(97)00036-7).
- [40] ASTM, "Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life. Fatigue Data 1", *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, núm. Reapproved, pp. 1-7, 2012, doi: [10.1520/E0739-10.2](https://doi.org/10.1520/E0739-10.2).
- [41] La Rosa G, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *Int J Fatigue* 2000;22:65-73. Doi:[10.1016/S0142-1123\(99\)00088-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00088-2).
- [42] Khonsari, M. and Amiri, M., 2013. *Introduction to Thermodynamics of Mechanical Fatigue*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis.

- [43] E. Barsky, "Brief history: properties and problems of the entropy parameter", *Entropy of complex processes and systems*, pp. 1-37, 2020. Doi: 10.1016 / b978-0-12-821662 0.00001-0.
- [44] A. Kermanidis y A. Tzamtzis, "Analytical modeling of fatigue crack propagation based on cyclic hardening and a characteristic damage length", *International Journal of Fatigue*, vol. 141, pág. 105864, 2020. Doi: 10.1016 / j.ijfatigue.2020.105864.
- [45] A. Nourian-Avval y M. Khonsari, "Rapid prediction of fatigue life based on thermodynamic entropy generation", *International Journal of Fatigue*, vol. 145, pp. 106105, 2021. Doi: 10.1016 / j.ijfatigue.2020.106105.
- [46] M. Amiri, M. Modarres and E. Droguett, "AE entropy for detection of fatigue crack initiation and growth", *2015 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2015. Doi: 10.1109/icphm.2015.7245038.
- [47] 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. Doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.06.022.
- [48] M. Amiri and M. Khonsari, "On the Role of Entropy Generation in Processes Involving Fatigue", *Entropy*, vol. 14, no. 1, pp. 24-31, 2011. Doi: 10.3390/e14010024.
- [49] R. Idris, S. Abdullah, P. Thamburaja, and M. Z. Omar, "Evaluation of fatigue crack growth rate for iron-carbon metals based on degradation-entropy generation theorem," *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 9, no. 5S, p. 526, 2018.
- [50] J. Osara and M. Bryant, "Evaluating Degradation Coefficients from Existing System Models", *Applied Mechanics*, vol. 2, no. 1, pp. 159-173, 2021. Doi: 10.3390/applmech2010010.
- [51] Breitbarth E, Besel M. Energy based analysis of crack tip plastic zone of AA2024-T3 under cyclic loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017,100:263-273.
- [52] Vormwald M. Effect of cyclic plastic strain on fatigue crack growth [J]. *International Journal of Fatigue*, 2016,82:80-88.
- [53] Skelton R P, Vilhelmsen T, Webster G A. Energy criteria and cumulative damage during fatigue crack growth[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998,20(9):641-649.
- [54] Klingbeil N W. A total dissipated energy theory of fatigue crack growth in ductile solids [J]. 2003, 25 (2):117-128.
- [55] Pandey K N, Chand S. An energy based fatigue crack growth model [J]. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25 (8):771-778.

- [56] Zuo J Z, Kermanidis A T, Pantelakis S G. Strain energy density prediction of fatigue crack growth from hole of aging aircraft structures [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2002,38 (1):37-51.
- [57] Wang, J., Jiang, W., Wang, Q., Experimental and numerical evaluation of fatigue crack growth rate based on critical plastically dissipated energy, *International Journal of Fatigue* (2018), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.09.003>
- [58] T. Anderson, *Fracture mechanics*. Boca Raton; London; New York: Taylor & Francis, 2017.
- [59] Bryant, M.D.; Khonsari, M.M.; Ling, F.F. On the thermodynamics of degradation. *Proc. R. Soc. A* 2008, 464, 2001–2014.
- [60] M. Naderi, M. Amiri, and M. M. Khonsari, “On the thermodynamic entropy of fatigue fracture,” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 466, no. 2114, pp. 423–438, 2009.
- [61] J. Park, “Evaluation of an energy-based approach and a critical plane approach for predicting constant amplitude multiaxial fatigue life,” *International Journal of Fatigue*, vol. 22, no. 1, pp. 23–39, 2000.
- [62] G. Glinka, “A notch stress-strain analysis approach to fatigue crack growth,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, no. 2, pp. 245–261, 1985.
- [63] J. W. Hutchinson, “Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 16, no. 1, pp. 13–31, 1968.
- [64] J. R. Rice and G. F. Rosengren, “Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 16, no. 1, pp. 1–12, 1968.
- [65] F. Ellyin, *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction*, Chapman & Hall, London, 1997.
- [66] D. L. Davidson and J. Lankford, “Fatigue crack growth in metals and alloys: Mechanisms and micromechanics,” *International Materials Reviews*, vol. 37, no. 1, pp. 45–76, 1992.
- [67] D. M. Li, W. J. Nam, and C. S. Lee, “An improvement on prediction of fatigue crack growth from low cycle fatigue properties,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 60, no. 4, pp. 397–406, 1998.
- [68] S. Chand and K. N. Pandey, “A model of fatigue crack growth based on damage accumulation,” *23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 2*, 2004.

- [69] M. Klesnil and P. Lukáš, "Effect of stress cycle asymmetry on Fatigue Crack Growth," *Materials Science and Engineering*, vol. 9, pp. 231–240, 1972.
- [70] ASM International. *Asm Handbook. Volume 19 Fatigue and Fracture*. Materials Park Ohio: ASM International, 1996.
- [71] ASTM A29/A29M, "Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought", 2015.
- [72] P. K. Liaw, "Long fatigue cracks — microstructural effects and crack closure," *MRS Bulletin*, vol. 14, no. 8, pp. 25–36, 1989.
- [73] E04 Committee, Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [74] K. Shi, L. Cai and C. Bao, "Crack Growth Rate Model under Constant Cyclic Loading and Effect of Different Singularity Fields", *Procedia Materials Science*, vol. 3, pp. 1566-1572, 2014. Doi: 10.1016/j.mspro.2014.06.253.
- [75] R. Idris, S. Abdullah, P. Thamburaja, and M. Z. Omar, "Evaluation of fatigue crack growth rate for iron-carbon metals based on degradation-entropy generation theorem," *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 9, no. 5S, p. 526, 2018.
- [76] [76] D. C. Frechtling, *Practical tourism forecasting*. Oxford: Butterworth Heinemann, 1996.
- [77] D. Simunek, M. Leitner, J. Maierhofer and H. Gänser, "Fatigue Crack Growth Under Constant and Variable Amplitude Loading at Semi-elliptical and V-notched Steel Specimens", *Procedia Engineering*, vol. 133, pp. 348-361, 2015. Doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.670.
- [78] H. Richard and M. Sander, "Fatigue Crack Growth Under Cyclic Loading with Constant Amplitude", *Fatigue Crack Growth*, pp. 113-151, 2016. Doi: 10.1007/978-3-319-32534-7\_4.
- [79] B. Boardman, "Fatigue Resistance of Steels", *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, pp. 673-688, 1990. Doi: 10.31399/asm.hb.v01.a0001038.

# ANEXO A: Fabricación de muestras

---

Para la elaboración de las probetas C (T), se realizó el siguiente proceso de fabricación:

1. Se utilizó una cortadora de sierra cinta, donde a partir de una placa de 10 pulgadas de largo, 8 pulgadas de ancho y 3/8 de espesor se cortaron piezas de 50 x 54 mm (ver Figura A.1 a). En cada corte se usó refrigerante para evitar calentamiento en las piezas, y los cortes se realizaron de manera manual (ver Figura A.1b).



**Figura A.1** Corte de placa de 10 x 8 x 3/8 pulgadas de material AISI 1018. a) Medición de dimensiones de corte. b) Proceso de corte con refrigerante.

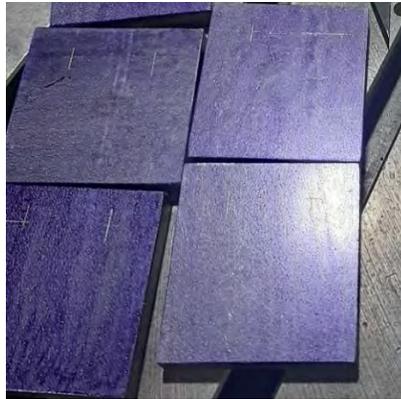
2. Después, cada pieza se pasó a una cortadora metalográfica (ver Figura A.2). Se agregó refrigerante a cada corte y se ajustaron a las medidas propuestas de cada probeta.



**Figura A.2** Cortadora metalográfica.

3. Para obtener el espesor deseado, se utilizó una fresadora debido a la geometría de las probetas C (T). El desbaste de material se realizó en ambas caras de las probetas para evitar cualquier

irregularidad o defecto en las superficies del material. Después se marcaron los centros para barrenar en cada pieza (ver Figura A.3a) y posteriormente se realizó con un taladro industrial la perforación de cada marca (ver Figura A.3b).



a)



b)

**Figura A.3** Proceso de perforación. a) Marcas de centros. b) Taladro industrial.

4. Finalmente, se realizó la ranura de la muesca en la fresadora universal marca Elliot. Mediante una fresa tipo disco de 48 dientes y con diámetro de 184 mm (ver Figura A.4), se realizó el corte hasta dejar la entalla en V y las medidas propuestas de longitud. Este proceso está permitido debido a que la norma ASTM E-647-15 [55] señala que en el proceso de fresado se recomienda usar aceros de resistencia media o baja, y el acero AISI 1018 pertenece a este rango de resistencias.



**Figura A.4** Proceso de ranura de la muesca.

# ANEXO B: Dimensiones de sujetadores y pernos

En las Figura B.1 y Figura B.2, se presentan las dimensiones de los sujetadores y pernos respectivamente.

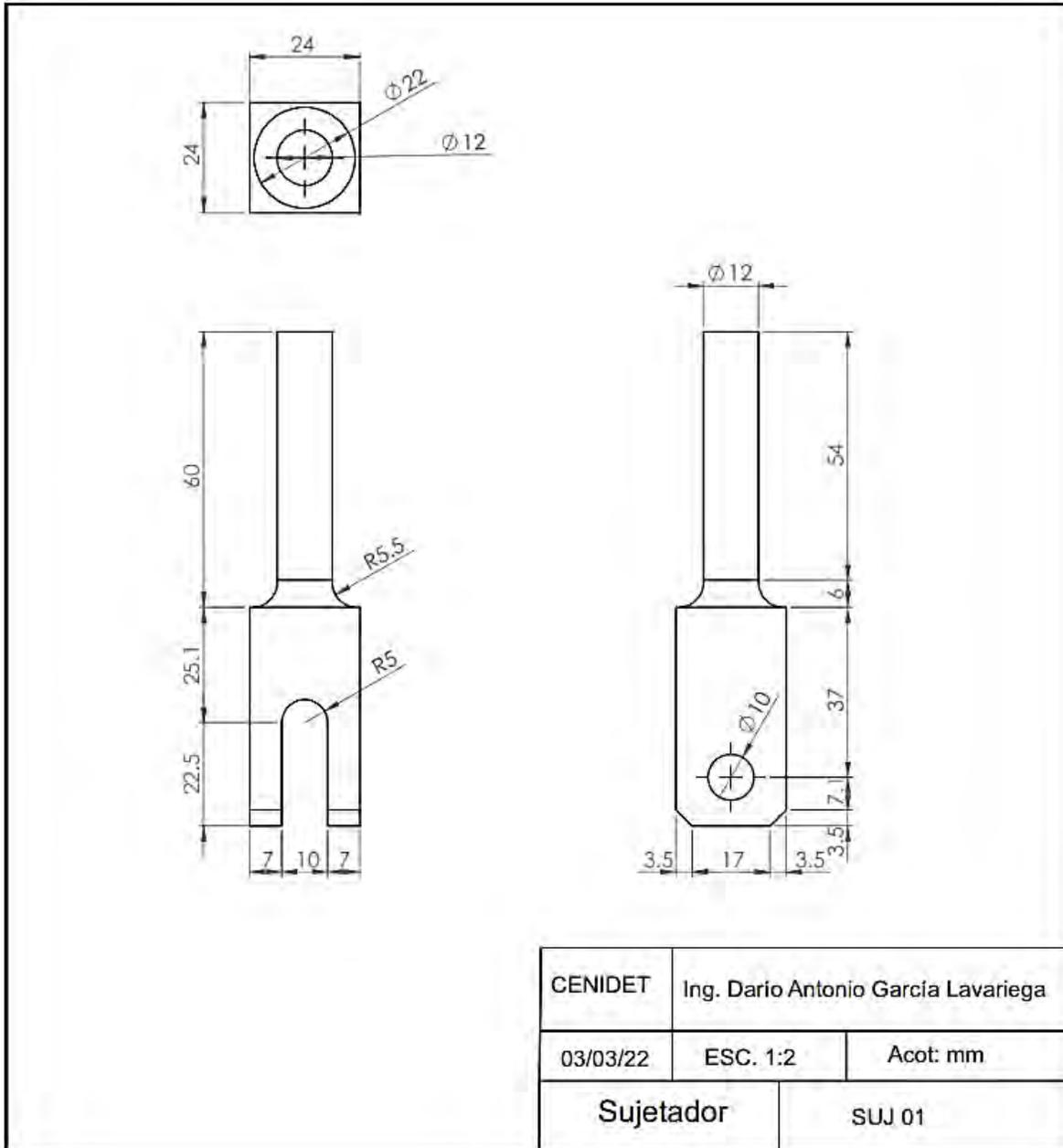
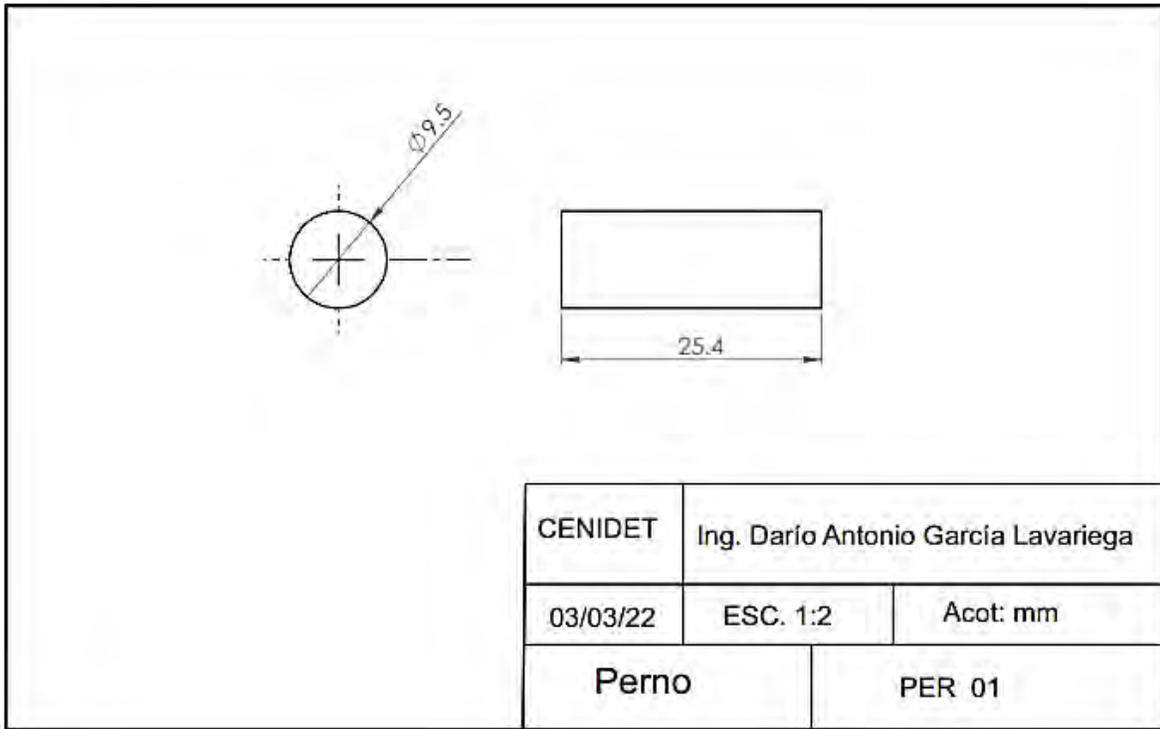


Figura B.1 Dimensiones de los sujetadores en mm.



**Figura B.2** Dimensiones de los pernos en mm.

## ANEXO C: Comparación de modelos

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{real} - y}{y_{real}} \right| \times 100$$

### MAPE PARA MODELO PROPUESTO

No.	$\Delta K$	$\frac{da}{dN}$		% Error absoluto $\left  \frac{y_{real} - y}{y_{real}} \right  \times 100$
		Experimental $y_{real}$	Propuesto $y$	
1	40	7.76656E-07	9.17E-07	18.01%
2	50	1.601E-06	1.62E-06	1.24%
3	60	2.89122E-06	2.52E-06	12.68%
4	70	4.76551E-06	3.63E-06	23.88%
SUMA =				55.81%
n =				4
<b>MAPE =</b>				<b>13.95%</b>

### MAPE PARA MODELO DE IDRIS

No.	$\Delta K$	$\frac{da}{dN}$		% Error absoluto $\left  \frac{y_{real} - y}{y_{real}} \right  \times 100$
		Experimental $y_{real}$	Idris $y$	
1	40	7.76656E-07	6.57E-07	15.44%
2	50	1.601E-06	1.6E-06	0.06 %
3	60	2.89122E-06	3.32E-06	14.81%
4	70	4.76551E-06	6.15E-06	28.97%
TOTAL =				59.29%
n =				4
<b>MAPE =</b>				<b>14.82%</b>

# ANEXO D: Datos experimentales

## CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

### Método Secante

Muestra 1 - AISI 1018, R = 0.1, f = 10 Hz

B = 0.0092 m

w = 0.040 m

a<sub>0</sub> = 11.3 m

N (ciclos)	a (mm)	da/dN (m/ciclos)	log (da/dN)	a <sub>prom</sub>	α = a <sub>prom</sub> / w	F(α)	ΔK (Mpa√m)	log (ΔK)
0	11.33							
13711	12.00	4.89E-08	-4.31	11.67	0.29	5.42	17.41	1.24
22511	12.33	3.75E-08	-4.43	12.17	0.30	5.60	17.98	1.25
32916	12.66	3.17E-08	-4.50	12.50	0.31	5.72	18.37	1.26
40010	13.00	4.79E-08	-4.32	12.83	0.32	5.85	18.77	1.27
47848	13.33	4.21E-08	-4.38	13.17	0.33	5.97	19.18	1.28
57970	13.66	3.26E-08	-4.49	13.50	0.34	6.10	19.59	1.29
68064	14.00	3.37E-08	-4.47	13.83	0.35	6.23	20.01	1.30
76872	14.33	3.75E-08	-4.43	14.17	0.35	6.37	20.45	1.31
84838	14.66	4.14E-08	-4.38	14.50	0.36	6.51	20.89	1.32
92119	15.00	4.67E-08	-4.33	14.83	0.37	6.65	21.34	1.33
98255	15.33	5.38E-08	-4.27	15.17	0.38	6.79	21.81	1.34
103050	15.66	6.88E-08	-4.16	15.50	0.39	6.94	22.28	1.35
109398	16.00	5.36E-08	-4.27	15.83	0.40	7.10	22.78	1.36
112653	16.33	1.01E-07	-3.99	16.17	0.40	7.25	23.29	1.37
118608	16.66	5.54E-08	-4.26	16.50	0.41	7.42	23.81	1.38
123660	17.00	6.73E-08	-4.17	16.83	0.42	7.58	24.35	1.39
126775	17.33	1.06E-07	-3.97	17.17	0.43	7.76	24.91	1.40
131931	17.66	6.40E-08	-4.19	17.50	0.44	7.94	25.48	1.41
136191	18	7.98E-08	-4.10	17.83	0.45	8.12	26.08	1.42
138807	18.33	1.26E-07	-3.90	18.17	0.45	8.32	26.70	1.43
142732	18.66	8.41E-08	-4.08	18.50	0.46	8.51	27.33	1.44
145276	19	1.34E-07	-3.87	18.83	0.47	8.72	28.00	1.45
147951	19.33	1.23E-07	-3.91	19.17	0.48	8.94	28.69	1.46
150725	19.66	1.19E-07	-3.92	19.50	0.49	9.16	29.41	1.47

153243	20	1.35E-07	-3.87	19.83	0.50	9.39	30.16	1.48
155394	20.33	1.53E-07	-3.81	20.17	0.50	9.64	30.95	1.49
157369	20.66	1.67E-07	-3.78	20.50	0.51	9.89	31.76	1.50
159369	21	1.70E-07	-3.77	20.83	0.52	10.16	32.61	1.51
161615	21.33	1.47E-07	-3.83	21.17	0.53	10.44	33.51	1.53
162818	21.66	2.74E-07	-3.56	21.50	0.54	10.73	34.44	1.54
164573	22	1.94E-07	-3.71	21.83	0.55	11.03	35.42	1.55
165889	22.33	2.51E-07	-3.60	22.17	0.55	11.36	36.46	1.56
166804	22.66	3.61E-07	-3.44	22.50	0.56	11.69	37.53	1.57
168040	23	2.75E-07	-3.56	22.83	0.57	12.05	38.67	1.59
168687	23.33	5.10E-07	-3.29	23.17	0.58	12.42	39.88	1.60
169509	23.66	4.01E-07	-3.40	23.50	0.59	12.81	41.13	1.61
170401	24	3.81E-07	-3.42	23.83	0.60	13.23	42.47	1.63
170967	24.33	5.83E-07	-3.23	24.17	0.60	13.67	43.88	1.64
171592	24.66	5.28E-07	-3.28	24.50	0.61	14.13	45.36	1.66
172295	25	4.84E-07	-3.32	24.83	0.62	14.62	46.94	1.67

## CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

### Método Secante

Muestra 2 - AISI 1018, R = 0.1, f = 10 Hz

B = 0.0092 m

w = 0.040 m

a<sub>0</sub> = 11.3 m

N (ciclos)	a (mm)	da/dN (m/ciclos)	log (da/dN)	a <sub>prom</sub>	α = a <sub>prom</sub> / w	F(α)	ΔK (Mpa√m)	log (ΔK)
0	11.33							
7693	11.66	4.29E-08	-4.37	11.50	0.29	5.36	17.22	1.24
14763	12.00	4.81E-08	-4.32	11.83	0.30	5.48	17.60	1.25
21334	12.33	5.02E-08	-4.30	12.17	0.30	5.60	17.98	1.25
27187	12.66	5.64E-08	-4.25	12.50	0.31	5.72	18.37	1.26
34624	13.00	4.57E-08	-4.34	12.83	0.32	5.85	18.77	1.27
42710	13.33	4.08E-08	-4.39	13.17	0.33	5.97	19.18	1.28
56087	13.66	2.47E-08	-4.61	13.50	0.34	6.10	19.59	1.29
62005	14.00	5.75E-08	-4.24	13.83	0.35	6.23	20.01	1.30
71770	14.33	3.38E-08	-4.47	14.17	0.35	6.37	20.45	1.31
79957	14.66	4.03E-08	-4.39	14.50	0.36	6.51	<b>20.89</b>	1.32
84505	15	7.48E-08	-4.13	14.83	0.37	6.65	21.34	1.33
92801	15.33	3.98E-08	-4.40	15.17	0.38	6.79	21.81	1.34
97096	15.66	7.68E-08	-4.11	15.50	0.39	6.94	22.28	1.35
102840	16	5.92E-08	-4.23	15.83	0.40	7.10	22.78	1.36
107483	16.33	7.11E-08	-4.15	16.17	0.40	7.25	23.29	1.37
116941	16.66	3.49E-08	-4.46	16.50	0.41	7.42	23.81	1.38
120403	17	9.82E-08	-4.01	16.83	0.42	7.58	24.35	1.39
124530	17.33	8.00E-08	-4.10	17.17	0.43	7.76	24.91	1.40
130677	17.66	5.37E-08	-4.27	17.50	0.44	7.94	25.48	1.41
135722	18	6.74E-08	-4.17	17.83	0.45	8.12	26.08	1.42
138985	18.33	1.01E-07	-4.00	18.17	0.45	8.32	26.70	1.43
141668	18.66	1.23E-07	-3.91	18.50	0.46	8.51	27.33	1.44
147059	19	6.31E-08	-4.20	18.83	0.47	8.72	28.00	1.45
152866	19.33	5.68E-08	-4.25	19.17	0.48	8.94	28.69	1.46
155775	19.66	1.13E-07	-3.95	19.50	0.49	9.16	29.41	1.47
156532	20	4.49E-07	-3.35	19.83	0.50	9.39	30.16	1.48

158574	20.33	1.62E-07	-3.79	20.17	0.50	9.64	30.95	1.49
159856	20.66	2.57E-07	-3.59	20.50	0.51	9.89	31.76	1.50
162275	21	1.41E-07	-3.85	20.83	0.52	10.16	32.61	1.51
164658	21.33	1.38E-07	-3.86	21.17	0.53	10.44	33.51	1.53
166123	21.66	2.25E-07	-3.65	21.50	0.54	10.73	34.44	1.54
167666	22	2.20E-07	-3.66	21.83	0.55	11.03	35.42	1.55
169443	22.33	1.86E-07	-3.73	22.17	0.55	11.36	36.46	1.56
170768	22.66	2.49E-07	-3.60	22.50	0.56	11.69	37.53	1.57
171686	23	3.70E-07	-3.43	22.83	0.57	12.05	38.67	1.59
172468	23.33	4.22E-07	-3.37	23.17	0.58	12.42	39.88	1.60
173386	23.66	3.59E-07	-3.44	23.50	0.59	12.81	41.13	1.61
174089	24	4.84E-07	-3.32	23.83	0.60	13.23	42.47	1.63
174838	24.33	4.41E-07	-3.36	24.17	0.60	13.67	43.88	1.64
175491	24.66	5.05E-07	-3.30	24.50	0.61	14.13	45.36	1.66
176194	25	4.84E-07	-3.32	24.83	0.62	14.62	46.94	1.67
176702	25.33	6.50E-07	-3.19	25.17	0.63	15.15	48.63	1.69
177171	25.66	7.04E-07	-3.15	25.50	0.64	15.69	50.40	1.70

## CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

### Método Secante

Muestra 3 - AISI 1018, R = 0.1, f = 10 Hz

B = 0.0092 m

w = 0.040 m

a<sub>0</sub> = 11.3 m

N (ciclos)	a (mm)	da/dN (m/ciclos)	log (da/dN)	a <sub>prom</sub>	α = a <sub>prom</sub> / w	F(α)	ΔK (Mpa√m)	log (ΔK)
0	11.33							
7423	11.66	4.45E-08	-4.35	11.50	0.29	5.36	17.22	1.24
14215	12	5.01E-08	-4.30	11.83	0.30	5.48	17.60	1.25
20745	12.33	5.05E-08	-4.30	12.17	0.30	5.60	17.98	1.25
26442	12.66	5.79E-08	-4.24	12.50	0.31	5.72	18.37	1.26
35153	13	3.90E-08	-4.41	12.83	0.32	5.85	18.77	1.27
46445	13.33	2.92E-08	-4.53	13.17	0.33	5.97	19.18	1.28
56399	13.66	3.32E-08	-4.48	13.50	0.34	6.10	19.59	1.29
69328	14	2.63E-08	-4.58	13.83	0.35	6.23	20.01	1.30
73938	14.33	7.16E-08	-4.15	14.17	0.35	6.37	20.45	1.31
79504	14.66	5.93E-08	-4.23	14.50	0.36	6.51	20.89	1.32
86125	15	5.14E-08	-4.29	14.83	0.37	6.65	21.34	1.33
91513	15.33	6.12E-08	-4.21	15.17	0.38	6.79	21.81	1.34
97490	15.66	5.52E-08	-4.26	15.50	0.39	6.94	22.28	1.35
105454	16	4.27E-08	-4.37	15.83	0.40	7.10	22.78	1.36
109419	16.33	8.32E-08	-4.08	16.17	0.40	7.25	23.29	1.37
111977	16.66	1.29E-07	-3.89	16.50	0.41	7.42	23.81	1.38
114438	17	1.38E-07	-3.86	16.83	0.42	7.58	24.35	1.39
118090	17.33	9.04E-08	-4.04	17.17	0.43	7.76	24.91	1.40
120922	17.66	1.17E-07	-3.93	17.50	0.44	7.94	25.48	1.41
124184	18	1.04E-07	-3.98	17.83	0.45	8.12	26.08	1.42
126430	18.33	1.47E-07	-3.83	18.17	0.45	8.32	26.70	1.43
129555	18.66	1.06E-07	-3.98	18.50	0.46	8.51	27.33	1.44
132016	19	1.38E-07	-3.86	18.83	0.47	8.72	28.00	1.45
134631	19.33	1.26E-07	-3.90	19.17	0.48	8.94	28.69	1.46
136486	19.66	1.78E-07	-3.75	19.50	0.49	9.16	29.41	1.47
138283	20	1.89E-07	-3.72	19.83	0.50	9.39	30.16	1.48

140842	20.33	1.29E-07	-3.89	20.17	0.50	9.64	30.95	1.49
142519	20.66	1.97E-07	-3.71	20.50	0.51	9.89	31.76	1.50
145002	21	1.37E-07	-3.86	20.83	0.52	10.16	32.61	1.51
146430	21.33	2.31E-07	-3.64	21.17	0.53	10.44	33.51	1.53
148770	21.66	1.41E-07	-3.85	21.50	0.54	10.73	34.44	1.54
151430	22	1.28E-07	-3.89	21.83	0.55	11.03	35.42	1.55
153594	22.33	1.52E-07	-3.82	22.17	0.55	11.36	36.46	1.56
155174	22.66	2.09E-07	-3.68	22.50	0.56	11.69	37.53	1.57
156053	23	3.87E-07	-3.41	22.83	0.57	12.05	38.67	1.59
156561	23.33	6.50E-07	-3.19	23.17	0.58	12.42	39.88	1.60
157850	23.66	2.56E-07	-3.59	23.50	0.59	12.81	41.13	1.61
158768	24	3.70E-07	-3.43	23.83	0.60	13.23	42.47	1.63
159510	24.33	4.45E-07	-3.35	24.17	0.60	13.67	43.88	1.64
160368	24.66	3.85E-07	-3.41	24.50	0.61	14.13	45.36	1.66
160758	25	8.72E-07	-3.06	24.83	0.62	14.62	46.94	1.67
161188	25.33	7.67E-07	-3.11	25.17	0.63	15.15	48.63	1.69
161696	25.66	6.50E-07	-3.19	25.50	0.64	15.69	50.40	1.70
162164	26	7.26E-07	-3.14	25.83	0.65	16.29	52.31	1.72
162516	26.33	9.37E-07	-3.03	26.17	0.65	16.92	54.34	1.74
162924	26.66	8.09E-07	-3.09	26.50	0.66	17.58	56.48	1.75
163275	27	9.69E-07	-3.01	26.83	0.67	18.29	58.79	1.77
163490	27.33	1.53E-06	-2.81	27.17	0.68	19.06	61.27	1.79
163600	27.66	3.00E-06	-2.52	27.50	0.69	19.87	63.88	1.81

## CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA

### Método Secante

Muestra 3 - AISI 1018, R = 0.1, f = 10 Hz

B = 0.0092 m

w = 0.040 m

a<sub>0</sub> = 11.3 m

N (ciclos)	a (mm)	da/dN (m/ciclos)	log (da/dN)	a <sub>prom</sub>	α = a <sub>prom</sub> / w	F(α)	ΔK (Mpa√m)	log (ΔK)
0	11.33							
10285	11.66	3.21E-08	-4.49	11.50	0.29	5.36	17.22	1.24
21513	12	3.03E-08	-4.52	11.83	0.30	5.48	17.60	1.25
30960	12.33	3.49E-08	-4.46	12.17	0.30	5.60	17.98	1.25
44648	12.66	2.41E-08	-4.62	12.50	0.31	5.72	18.37	1.26
56932	13	2.77E-08	-4.56	12.83	0.32	5.85	18.77	1.27
66288	13.33	3.53E-08	-4.45	13.17	0.33	5.97	19.18	1.28
75915	13.66	3.43E-08	-4.46	13.50	0.34	6.10	19.59	1.29
88938	14	2.61E-08	-4.58	13.83	0.35	6.23	20.01	1.30
94817	14.33	5.61E-08	-4.25	14.17	0.35	6.37	20.45	1.31
98468	14.66	9.04E-08	-4.04	14.50	0.36	6.51	20.89	1.32
105069	15	5.15E-08	-4.29	14.83	0.37	6.65	21.34	1.33
110987	15.33	5.58E-08	-4.25	15.17	0.38	6.79	21.81	1.34
118136	15.66	4.62E-08	-4.34	15.50	0.39	6.94	22.28	1.35
123814	16	5.99E-08	-4.22	15.83	0.40	7.10	22.78	1.36
129107	16.33	6.23E-08	-4.21	16.17	0.40	7.25	23.29	1.37
134459	16.66	6.17E-08	-4.21	16.50	0.41	7.42	23.81	1.38
141177	17	5.06E-08	-4.30	16.83	0.42	7.58	24.35	1.39
145609	17.33	7.45E-08	-4.13	17.17	0.43	7.76	24.91	1.40
148421	17.66	1.17E-07	-3.93	17.50	0.44	7.94	25.48	1.41
152367	18	8.62E-08	-4.06	17.83	0.45	8.12	26.08	1.42
155768	18.33	9.70E-08	-4.01	18.17	0.45	8.32	26.70	1.43
158224	18.66	1.34E-07	-3.87	18.50	0.46	8.51	27.33	1.44
161173	19	1.15E-07	-3.94	18.83	0.47	8.72	28.00	1.45
163840	19.33	1.24E-07	-3.91	19.17	0.48	8.94	28.69	1.46
165821	19.66	1.67E-07	-3.78	19.50	0.49	9.16	29.41	1.47
169159	20	1.02E-07	-3.99	19.83	0.50	9.39	30.16	1.48

171073	20.33	1.72E-07	-3.76	20.17	0.50	9.64	30.95	1.49
172948	20.66	1.76E-07	-3.75	20.50	0.51	9.89	31.76	1.50
174159	21	2.81E-07	-3.55	20.83	0.52	10.16	32.61	1.51
175663	21.33	2.19E-07	-3.66	21.17	0.53	10.44	33.51	1.53
176737	21.66	3.07E-07	-3.51	21.50	0.54	10.73	34.44	1.54
179176	22	1.39E-07	-3.86	21.83	0.55	11.03	35.42	1.55
180074	22.33	3.67E-07	-3.43	22.17	0.55	11.36	36.46	1.56
181090	22.66	3.25E-07	-3.49	22.50	0.56	11.69	37.53	1.57
181851	23	4.47E-07	-3.35	22.83	0.57	12.05	38.67	1.59
182611	23.33	4.34E-07	-3.36	23.17	0.58	12.42	39.88	1.60
183217	23.66	5.45E-07	-3.26	23.50	0.59	12.81	41.13	1.61
183900	24	4.98E-07	-3.30	23.83	0.60	13.23	42.47	1.63
184350	24.33	7.33E-07	-3.13	24.17	0.60	13.67	43.88	1.64
184799	24.66	7.35E-07	-3.13	24.50	0.61	14.13	45.36	1.66
185131	25	1.02E-06	-2.99	24.83	0.62	14.62	46.94	1.67
185575	25.33	7.43E-07	-3.13	25.17	0.63	15.15	48.63	1.69
185832	25.66	1.28E-06	-2.89	25.50	0.64	15.69	50.40	1.70
186027	26	1.74E-06	-2.76	25.83	0.65	16.29	52.31	1.72