

Fatiga por ludimiento

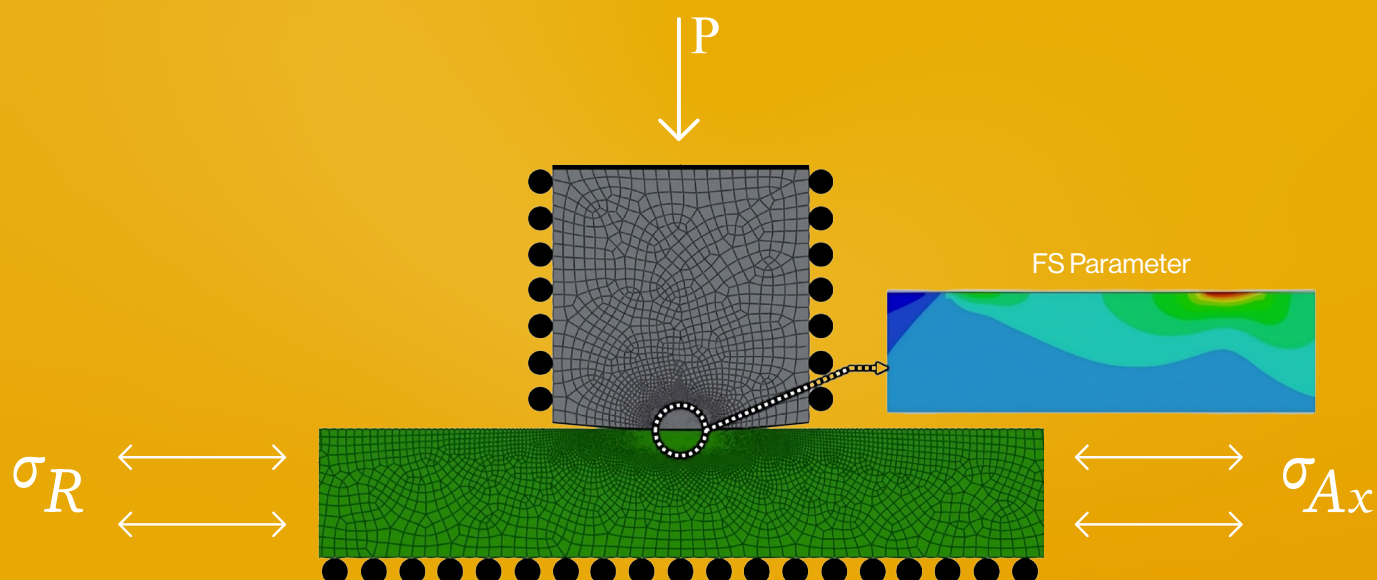
Avances y modelamiento computacional
del comportamiento friccional

Libardo Vicente Vanegas Useche

Carlos Andrés Mesa Montoya

Nicolás Díez Molina

Magd Abdel Wahab



Fatiga por ludimiento:

**Avances y modelamiento computacional
del comportamiento friccional**

Libardo Vicente Vanegas Useche

Carlos Andrés Mesa Montoya

Nicolás Diez Molina

Magd Abdel Wahab



**Facultad de Mecánica Aplicada
Colección Trabajo de Investigación
2025**

Fatiga por ludimiento : Avances y modelamiento computacional del comportamiento friccional / Libardo Vicente Vanegas Useche y otros. -- Pereira : Editorial Universidad Tecnológica de Pereira, 2025.

141 páginas. -- (Colección Trabajos de investigación).

e-ISBN: 978-628-501-024-8

1. Fatiga de materiales 2. Mecánica aplicada 3. Aprendizaje automático (inteligencia artificial)

CDD. 620.1126

Fatiga por ludimiento: Avances y modelamiento computacional del comportamiento friccional

© Libardo Vicente Vanegas Useche

© Carlos Andrés Mesa Montoya

© Nicolás Diez Molina

© Magd Abdel Wahab

© Universidad Tecnológica de Pereira

eISBN: 978-628-501-024-8

Proyecto: Accurate simulations of fretting fatigue frictional behavior

Código: 8-22-1

Universidad Tecnológica de Pereira

Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión

Editorial Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Colombia

Coordinador editorial:

Luis Miguel Vargas Valencia

luismvargas@utp.edu.co

Teléfono (606) 313 7381

Edificio 9, Biblioteca Central Jorge Roa Martínez

Cra. 27 No. 10-02 Los Álamos, Pereira, Colombia

www.utp.edu.co

Montaje y producción

Jonathan Morales Montes

Universidad Tecnológica de Pereira

Pereira, Risaralda, Colombia.

©2024, todos los derechos reservados, Editorial Universidad Tecnológica de Pereira.

Contenido

Lista de figuras	9
Lista de tablas	10
Introducción	13
CAPÍTULO 1	
FUNDAMENTOS DE LA FATIGA POR LUDIMIENTO	17
1.1 ¿QUE ES LA FATIGA POR LUDIMIENTO?	19
1.1.1 <i>Superficies de contacto</i>	22
1.2 EFECTOS DEBIDO A LA PRESIÓN	24
1.2.1 <i>Microgrietas y fallos</i>	25
1.2.2 <i>Análisis de esfuerzos</i>	26
1.3 CICLO DE VIDA ÚTIL	29
1.3.1 <i>Fases del ciclo de vida útil</i>	30
1.3.2 <i>Modelado, monitoreo Y optimización de la vida útil</i>	31
1.4 RESUMEN	32

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE PREDICCIÓN ·····	35
2.1 CRITERIO DE FATEMI-SOCIE (FS) ·····	37
2.1.1 Interacción de tensiones y deformaciones ·····	38
2.1.2 Criterio FS en diseño de componentes ·····	39
2.2 CRITERIO SMITH-WATSON-TOPPER (SWT) ·····	40
2.2.1 Criterio SWT en ludimiento ·····	40
2.3 MÉTODOS DE PROMEDIADO ·····	42
2.3.1 Promediado de línea ·····	43
2.3.2 Promediado de volumen ·····	43
2.3.3 Promediado de cuadrante ·····	44
2.4 ORIENTACIÓN Y CRECIMIENTO DE GRIETAS ·····	44
2.4.1 Fase I ·····	45
2.4.2 Fase II ·····	46
2.4.3 Modelos de predicción de orientación de grietas de propagación ·····	46
2.4.4 Técnicas experimentales para el estudio de orientación y crecimiento ·····	47
2.4.5 Iniciación y propagación de grietas ·····	49
2.4.6 Modelos estimadores de longitud de grietas ·····	50
2.5 CARGA DESFASADA ·····	55
2.5.1 Alteración del campo de tensiones ·····	56
2.6 MODELADO DE LA CARGA DESFASADA ·····	57
2.6.1 Enfoque analítico ·····	57
2.6.2 Análisis de elementos finitos (FEA) ·····	57
2.6.3 Criterios de fallo modificados ·····	57
2.6.4 Modelo de la propagación de grietas ·····	60
2.7 RESUMEN ·····	62

CAPÍTULO 3

MODELAMIENTO COMPUTACIONAL DE LA FATIGA POR LUDIMIENTO	65
3.1 MODELOS NUMÉRICOS	67
3.1.1 Método de elementos finitos (FEM)	68
3.1.2 Simulaciones de dinámica molecular	71
3.2 MODELADO DEL CONTACTO ENTRE SUPERFICIES	73
3.2.1 Algoritmos de contactos	76
3.3 OPTIMIZACIÓN Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO	77
3.4 ANÁLISIS MULTIESCALA	80
3.5 ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN COMPONENTES MECÁNICOS BAJO CONDICIONES DE CARGA	80
3.6 RESUMEN	84

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE INVESTIGACIÓN	87
4.1 MODELOS NUMÉRICOS	89
4.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)	90
4.3 CONDICIONES DE CARGA Y ZONA COHESIVA	91
4.3.1 Aplicación de la zona cohesiva	92
4.3.2 Aplicación del parámetro de FATEMI-SOCIE	93
4.3.3 Posprocesamiento	93
4.3.4 Aplicación del FEM	94
4.3.5 Resultados	95
4.3.6 Teoría de Hertz	97
4.3.7 Teoría de Cattaneo-Mindlin	97
4.4 ÁNGULOS DE ROTACIÓN Y COEFICIENTES DE FRICCIÓN	99
4.4.1 Mecánica de la fatiga por ludimiento	100
4.4.2 Selección del parámetro de daño del plano crítico	102
4.4.3 Modelo FEM	102

4.4.4 Resultados	105
4.5 ANÁLISIS DE LA NUCLEACIÓN Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN VARIABLE	109
4.5.1 Descripción del modelo	109
4.5.2 Implementación del modelo de coeficiente de fricción variable (<i>VCoF</i>)	110
4.5.3 Parámetro de daño de plano crítico	111
4.5.4 Parámetro de acumulación de daño	113
4.5.5 Implementación del script	113
4.5.6 Resultados	114
4.6 PERSPECTIVAS EN LA SIMULACIÓN DE LA FATIGA POR LUDIMIENTO	119
4.7 CONSIDERACIONES SOBRE LA ROBUSTEZ DEL MODELO	121
4.7.1 Proyecciones futuras	123
4.8 RESUMEN	125

CAPÍTULO 5

GLOSARIO	129
----------------	-----

Referencias	135
--------------------------	------------

Lista de figuras

1.1 ¿Fuerza aplicada y acumulación de daño por fatiga	23
1.2 Deformación elástica	25
1.3 Evolución de una microgrieta	25
1.4 Propagación de microgrietas	26
1.5 Variación de la amplitud de microdeslizamiento	28
1.6 ¿Fases del ciclo de la vida útil	30
2.1 Propagación de grietas en la fatiga por ludimiento	49
2.2 Modelo de Kitagawa-Takahashi	52
2.3 Variación de tensiones en función del tiempo para diferentes ángulos de fase	60
3.1 Gráficas de error de esfuerzo a tracción máximo (a) y tiempo de simulación (b) vs tamaño de malla	70
3.2 Diagrama de proceso del método de elementos finitos	71
3.3 Diagrama de proceso de simulaciones de dinámica molecular	73
3.4 Diagrama de proceso de modelado del contacto entre superficies	75
3.5 Diagrama de proceso de modelado de interacciones entre superficies	76
3.6 Representación gráfica de una red	78
3.7 Diagrama de proceso de aprendizaje automático en análisis de materiales	79
3.8 Confiabilidad vs fallo	83
4.1 Sistema prueba de fatiga por ludimiento tipo cilindro-plano	92
4.2 Representación zona de ataque y zona de fuga	93
4.3 Condiciones de frontera del modelo	95
4.4 DCiclos de carga del modelo	95
4.5 Distribución de la presión normal (a) y esfuerzo cortante (b) en la superficie de contacto: Teórico vs FEM	96
4.6 Distribución del esfuerzo cortante superficial para diferentes cargas	97
4.7 Distribución del parámetro de daño a lo largo de la superficie para diferentes valores de carga	98
4.8 Criterio de iniciación de zona cohesiva	99
4.9 Condiciones de frontera del modelo	104
4.10 Ciclos de carga aplicados en el modelo FEM	105
4.11 Distribución de la presión normal (a) y esfuerzo cortante (b) en la superficie de contacto	106
4.12 Comportamiento del esfuerzo cortante superficial con diferentes ángulos de rotación	107
4.13 Condiciones de frontera y mallado del modelo FE	110
4.14 Distribución de los parámetros de daño FS (a) y FP (b) para tres valores de CoF	117

Lista de tablas

I. Ejemplo de algunos parámetros utilizados en el análisis fem para el estudio de fatiga por ludimiento	69
II. Ejemplo de algunos parámetros utilizados en las simulaciones de dinámica molecular para el estudio de fatiga por ludimiento	72
III. Ejemplo de algunos parámetros utilizados en el modelado del contacto entre superficies	75
IV. Comparación de métodos para modelar interacciones entre superficies	77
V. Comparación de técnicas de aprendizaje automático para el análisis de materiales	79
VI. Niveles de análisis en el enfoque multiescala	80
VII. Propiedades mecánicas de la aleación ai 7075-t651	100
VIII. Datos experimentales	100
IX. Resultados de pruebas realizadas para diferentes ángulos de rotación	108
X. Resultados de pruebas para diferentes coeficientes de fricción	109
XI. Resultados de la nucleación de grietas con método del punto crítico	115
XII. Resultados de la nucleación de grietas con método del cuadrante	116
XIII. Resultados estadísticos normalizados de la vida útil de nucleación para ambos parámetros de daño y ambos métodos de promediado	118

INTRODUCCIÓN

El presente libro, enmarcado en el proyecto *Accurate Simulations of Fretting Fatigue Frictional Behavior* de la Universidad Tecnológica de Pereira, aborda temáticas esenciales para la integridad estructural de componentes que operan bajo cargas cíclicas. La fatiga por ludimiento ocurre cuando dos superficies en contacto, sometidas a una fuerza normal, experimentan deslizamientos relativos de pequeña amplitud. Este fenómeno puede reducir considerablemente la vida útil de los componentes, lo que exige el desarrollo de modelos precisos capaces de predecir su comportamiento y ofrecer soluciones en el diseño de sistemas mecánicos.

Durante las últimas décadas, se han propuesto numerosos enfoques numéricos para modelar la fatiga por ludimiento, desde modelos básicos de propagación de grieta simplificada hasta análisis de contacto más sofisticados, pero manteniendo siempre un coeficiente de fricción constante. Esta limitación puede ser responsable de las desviaciones encontradas entre las predicciones numéricas y los resultados experimentales, puesto que la fricción es un parámetro que depende de la velocidad de deslizamiento y puede variar durante el proceso de ludimiento debido a factores como el desgaste y la plasticidad entre las superficies de contacto. A diferencia de estos enfoques previos, este libro presenta tres contribuciones de investigación que mejoran significativamente la precisión predictiva.

El texto comienza con una revisión del estado del arte y una descripción detallada de la investigación, incluyendo estudios experimentales y comparaciones con datos empíricos. La primera contribución incorpora un análisis de vida de nucleación de grieta mediante elementos cohesivos enriquecidos, comparándolo directamente con resultados experimentales y predicciones obtenidas mediante métodos de daño clásicos como los parámetros de plano crítico. La segunda contribución analiza el efecto computacional de una almohadilla con rigidez finita que presenta cierta rotación durante el proceso de ludimiento bajo diferentes valores de coeficiente de fricción, obteniendo resultados más con-

servadores y precisos respecto a los experimentales. Finalmente, la tercera contribución incorpora en el proceso de ludimiento un coeficiente de fricción variable que evoluciona según avanza el desgaste superficial.

Esta última aproximación representa una contribución metodológica innovadora, ya que, a diferencia de la mayoría de las investigaciones que utilizan coeficientes de fricción constantes o de las escasas que han propuesto variabilidad en este parámetro, este trabajo desarrolla una metodología estadística para evaluar la conveniencia del modelo de fricción variable. El análisis estadístico no solo considera la desviación estándar y exactitud de los resultados frente a datos experimentales, sino que también evalúa cuán conservadores son estos modelos en comparación con las predicciones de coeficiente constante, aportando una base sólida para seleccionar el enfoque más adecuado según las condiciones de la aplicación.

El libro también aborda la relevancia de este fenómeno en el contexto industrial, destacando su impacto en sectores estratégicos como la generación energética, la industria aeronáutica y el transporte ferroviario. Se enfatiza la importancia de esta investigación para Colombia y la región, considerando la necesidad de posicionar al país en la vanguardia de la investigación internacional.

Este proyecto no solo avanza en la comprensión del comportamiento de la fatiga por ludimiento, sino que desarrolla herramientas numéricas aplicables a la realidad industrial regional. El objetivo final es proporcionar metodologías que mejoren la toma de decisiones en el diseño y mantenimiento de componentes críticos, reduciendo así los riesgos de fallos catastróficos.

Cápítulo 1

Fundamentos de la fatiga por ludimiento

A. ¿QUE ES LA FATIGA POR LUDIMIENTO?

La fatiga por ludimiento es un fenómeno de deterioro en materiales, que ocurre cuando dos superficies en contacto experimentan pequeños movimientos relativos mientras están sometidas a cargas de compresión normales; Es comparable a tener dos piezas de metal presionadas una contra la otra, que se frotan suavemente, repetidamente millones de veces. Aunque cada desplazamiento es insignificante, el daño acumulado puede llegar a ser devastador.

Este fenómeno es especialmente preocupante en componentes mecánicos y estructurales, donde las condiciones de contacto y las cargas aplicadas son comunes; Ejemplos típicos incluyen conexiones con pernos, uniones entre ejes y agujeros, rodamientos, implantes médicos, intercambiadores de calor, turbinas de gas y componentes automotrices [1]. El ludimiento, no solo puede reducir la vida útil de los componentes, sino también, puede llevar a fallos irreparables si no se detecta y maneja adecuadamente.

La fatiga por ludimiento, también conocida como *fretting fatigue*, ha sido ampliamente estudiada debido a su impacto en la confiabilidad y seguridad de componentes sometidos a condiciones severas de carga; Este fenómeno combina elementos de desgaste y fatiga mecánica, lo que lo convierte en un caso complejo dentro de la mecánica de materiales. A diferencia de la fatiga clásica, el ludimiento ocurre en zonas muy localizadas, en interfaces

de contacto sometidas a deslizamientos cíclicos de muy baja amplitud, como se mencionó en el párrafo anterior. Estos deslizamientos pueden inducir concentraciones de esfuerzo muy elevadas en la superficie o subsuperficie, lo que acelera la iniciación de grietas. Además, el ambiente (como la humedad o la temperatura) y el tipo de carga (amplitud, frecuencia, dirección) pueden modificar significativamente el comportamiento del daño.

Desde una perspectiva de análisis del daño, el ludimiento representa un caso particular de interacción tribo-mecánica, es decir, se trata de un fenómeno en el que intervienen simultáneamente aspectos tribológicos (como fricción, desgaste y transferencia de material) y mecánicos (como la acumulación de daño por carga cíclica). Esta dualidad ha llevado al desarrollo de distintos enfoques para su estudio: desde modelos analíticos simplificados, hasta simulaciones numéricas avanzadas, así como ensayos experimentales normalizados para caracterizar la resistencia de los materiales frente a este tipo de fatiga. Comprender el fenómeno, en su totalidad, requiere integrar conocimientos de mecánica del contacto, teoría del daño acumulativo, y metalurgia de superficies, entre otros campos.

El mecanismo de la fatiga por ludimiento involucra generalmente tres etapas: la iniciación del daño superficial, la propagación de grietas y finalmente la falla del material. La iniciación del daño puede ocurrir por desgaste, deslizamiento y oxidación en la superficie de contacto. Una vez que se forma una grieta, puede propagarse bajo el efecto de las cargas cíclicas, hasta que eventualmente cause la fractura.

Para mitigar los efectos de la fatiga por ludimiento, se pueden considerar varias estrategias. Una opción es la aplicación de recubrimientos lubricantes para disminuir el coeficiente de fricción entre las superficies en contacto. Otra estrategia es el diseño de componentes para minimizar los movimientos relativos o para distribuir mejor las cargas aplicadas. La selección de materiales con mayor resistencia al ludimiento también puede ser una solución efectiva.

Cargas cíclicas

Son aquellas que varían con el tiempo de manera repetitiva o periódica, generando una secuencia de cargas en un sistema mecánico o estructural.

A diferencia de la fatiga convencional, donde las tensiones provienen principalmente de ciclos de carga repetitivos a nivel global (doblar una hoja de papel una y otra vez hasta que se rompa), el ludimiento se caracteriza por movimientos microscópicos en la interfaz

de contacto. Estos movimientos provocan la concentración de tensiones y la aparición de microgrietas en las zonas de contacto.

Hertz [2] y, luego, Cattaneo [3] y Mindlin [4] determinaron soluciones analíticas para dos cuerpos elásticos en contacto. Estas ecuaciones son muy útiles para estudios de fatiga por ludimiento, pero se basan en simplificaciones que en muchos casos no reflejan las características reales del problema. En cambio, los métodos numéricos permiten estudiar problemas de gran complejidad, y son muy populares debido a sus ventajas. Por lo tanto, muchos investigadores han utilizado métodos numéricos, particularmente el Método de Elementos Finitos (FEM), para estudiar problemas complejos. Por ejemplo, en [5] investigaron mediante FEM la fatiga por ludimiento en condiciones de carga desfasada, evaluando la eficacia de distintos criterios de daño de plano crítico (CP) en la predicción de la orientación y vida de nucleación de grietas.

Otros estudios, como los de [6] y [7], exploraron numéricamente el efecto de heterogeneidades en configuraciones cilindro-plano. Estos trabajos introdujeron poros, ya sea en forma de agujeros cercanos a la zona de contacto o distribuidos de manera regular y aleatoria, revelando que la presencia de discontinuidades puede alterar la vida de iniciación de grietas e, incluso, incrementarla en algunos casos, lo que sugiere su posible uso como paliativo.

En cuanto a los ensayos experimentales, estos permiten probar materiales reales en condiciones similares a condiciones prácticas. Aunque pueden resultar costosos y demandar mucho tiempo, son necesarios para validar modelos analíticos y numéricos. Existen diferentes configuraciones experimentales para la fatiga por ludimiento. La configuración más estudiada es la de cilindro-plano. Consiste en una almohadilla (indentador) de superficie cilíndrica en contacto con una probeta de superficie plana. Muchos investigadores han realizado estudios experimentales para determinar el comportamiento de diversos materiales (por ejemplo [8],[9], [10], [11], [12]), metales en su gran mayoría.

Para concluir, la fatiga por ludimiento se ha estudiado durante más de 50 años [13]. Una revisión de la literatura sobre este tema indica que las investigaciones se han centrado, entre otros temas, en: (a) soluciones analíticas, (b) criterios de daño para la iniciación de grietas, (c) posición, orientación y longitud de la grieta de nucleación, (d) promediado de esfuerzos, (e) heterogeneidad, (f) cargas en desfase, (g) desgaste, (h) interacción entre las caras de la grieta, (i) criterios de orientación de grietas, (j) tasa de crecimiento de grietas de etapa 2 y (k) orientación de grano. Además, muy recientemente, se han comenzado a

aplicar técnicas de aprendizaje de máquina (Machine Learning, ML). Algunas aplicaciones estudiadas incluyen ejes con ajustes a presión [14],[15],[16], cables de acero en contacto cruzado [17] y recubrimientos [18], [19].

1) *Superficies de contacto*: El rozamiento microscópico es un fenómeno que se produce mediante la interacción de superficies en contacto a nivel de las microestructuras de los materiales. A diferencia del rozamiento macroscópico, que se estudia con base en fuerzas aplicadas a superficies aparentes, el rozamiento microscópico se centra en las irregularidades y microtopografía de las superficies, las cuales influyen en la fatiga del material, la formación de microfisuras y el desgaste por pitting o micropitting.

Pitting

Es una forma localizada de corrosión que produce pequeños agujeros o cavidades en la superficie de un material metálico.

Uno de los principales factores que afecta el rozamiento microscópico es la rugosidad superficial. A escala microscópica, las crestas y valles de una superficie se entrelazan con la contraparte, generando puntos de concentración de esfuerzo. Estos puntos, en condiciones de contacto repetitivo, son propensos a la formación de microfisuras y, posteriormente, al desgaste severo conocido como micropitting. La mejora de las propiedades de la superficie mediante tratamientos como la lubricación adecuada, el pulido y el uso de recubrimientos puede disminuir el impacto del rozamiento microscópico.

El estudio de estos fenómenos es fundamental en componentes mecánicos de alta precisión, como los engranajes, donde la fricción a nivel microscópico influye directamente en la vida útil y el rendimiento de los sistemas de transmisión. Además, las técnicas de análisis, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis de elementos finitos (FEA), permiten la evaluación detallada del impacto del rozamiento microscópico en la degradación de los materiales y la formación de fallas como el micropitting.

Las principales causas de la fatiga por ludimiento incluyen:

- Vibraciones en maquinaria: los equipos mecánicos, como motores o turbinas, están expuestos a vibraciones constantes. Estas vibraciones generan pequeños movimientos relativos entre las superficies en contacto, favoreciendo el desgaste y la aparición de grietas.

- Fluctuaciones de temperatura: los ciclos de calentamiento y enfriamiento provocan expansiones y contracciones repetitivas en los materiales. Estas variaciones térmicas pueden generar microdesplazamientos entre las superficies en contacto, especialmente cuando los coeficientes de expansión térmica de los materiales son diferentes.
- Cargas cíclicas: las estructuras sometidas a cargas repetitivas, como componentes de aviones, trenes o puentes, experimentan deformaciones elásticas continuas en sus materiales. Aunque pequeñas, estas deformaciones producen movimientos relativos entre las superficies en contacto, lo que desencadena el proceso de fatiga por ludimiento.

La Figura 1.1 es una representación visual de la carga cíclica de alta frecuencia y amplitud, a la que se encuentra sometido determinado material. La forma de la onda podría indicar la presencia de múltiples fuentes de carga o un entorno de operación complejo. También se observa un aumento gradual y no lineal del daño por fatiga a lo largo del tiempo, indicando que el daño se acumula a un ritmo creciente, es decir, existe una aceleración del proceso de fatiga. Lo anterior, acelera el proceso de fatiga por ludimiento y puede causar fallas estructurales.

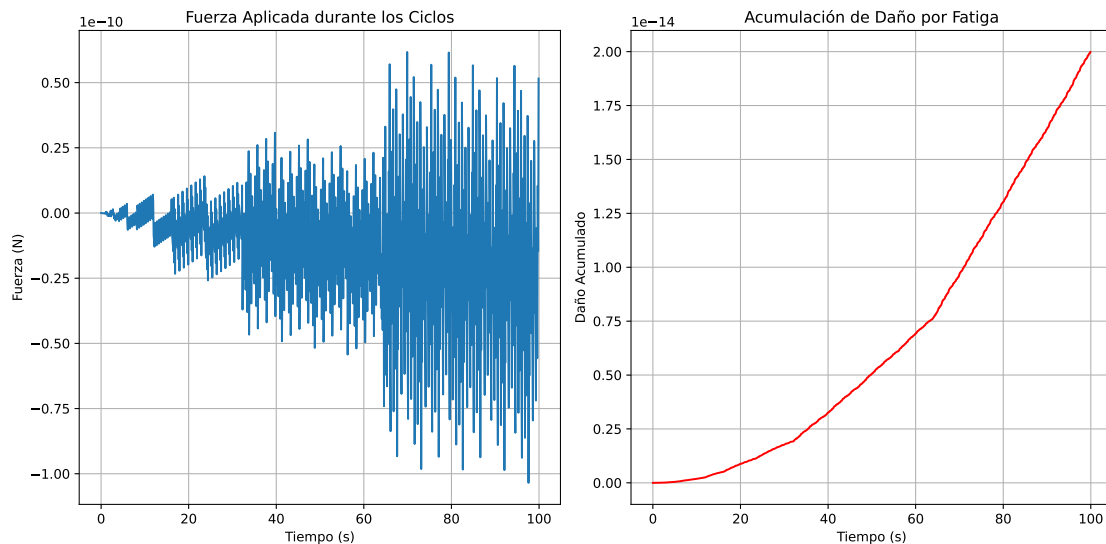


Figura 1.1. Fuerza aplicada y acumulación de daño por fatiga

Dado que este es un libro resultado de investigación, y por limitaciones de espacio, este trabajo no tiene como objeto presentar en gran detalle los conceptos fundamentales de

la fatiga por ludimiento, ni abarcar todas las técnicas de modelado o de experimentación. El lector puede consultar, por ejemplo, a Dinni y Liskiewicz [20], quienes suministran al lector una comprensión fundamental de la fatiga y desgaste por ludimiento; además, presentan diversas técnicas de modelado y experimentación, métodos de mitigación y ejemplos prácticos de aplicación. También, Hills and Nowell [21] tratan el tema de fatiga por ludimiento, enfocándose en la mecánica aplicada, estudiando tanto la nucleación como la propagación de grietas. Hattori [22] ofrece una visión integral del daño por ludimiento bajo diferentes tipos de carga (axial, flexión y torsión), integrando la mecánica de sólidos, la ciencia de materiales y la tribología, todo respaldado por análisis FEM y casos prácticos.

B. EFECTOS DEBIDO A LA PRESIÓN

La presión es un factor que participa en este fenómeno. Las superficies no solo se rozan de forma microscópica, sino que lo hacen bajo una intensa presión. Esta combinación de movimiento y presión crea condiciones ideales para el desgaste y la formación de grietas. La presión normal entre las superficies puede variar dependiendo de la aplicación, pero incluso presiones relativamente bajas pueden ser suficientes para iniciar el proceso de fatiga por ludimiento si las condiciones son las adecuadas.

La presión aplicada puede ocasionar dos efectos principales: primero, deformaciones elásticas o plásticas en las superficies de contacto, las cuales generan zonas de alta tensión propensas a la nucleación de grietas; segundo, el movimiento cíclico bajo presión promueve la iniciación y propagación de estas grietas, resultando en el desgaste progresivo conocido como fatiga por ludimiento.

Nucleación de grietas

Es un proceso que ocurre cuando las tensiones locales en el material superan su resistencia interna en ciertos puntos específicos, provocando la aparición de pequeñas fisuras o microgrietas.

Este fenómeno es particularmente crítico en componentes de maquinaria que operan bajo cargas variables, como los rodamientos y las juntas de acoplamiento, donde incluso pequeñas fluctuaciones en la presión pueden tener un impacto en la vida útil del material. Un ejemplo de las deformaciones elásticas, se puede ver en la Figura 1.2.

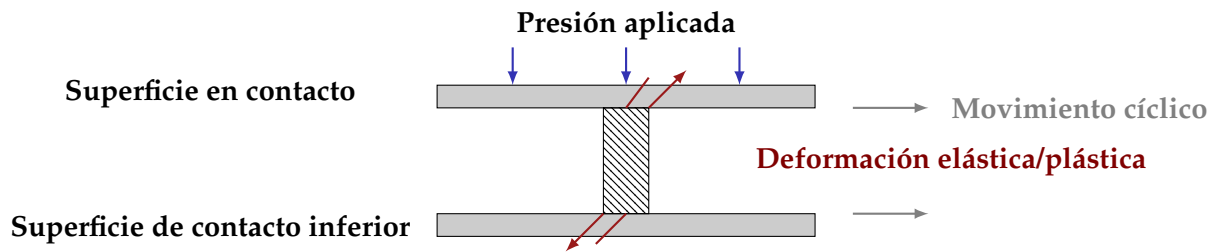


Figura 1.2. Deformación elástica

1) *Microgrietas y fallos*: El verdadero peligro de la fatiga por ludimiento radica en su naturaleza progresiva. Lo que comienza como un daño microscópico puede evolucionar a problemas mucho más graves:

- Formación de microgrietas: el movimiento repetitivo y la presión causan pequeñas grietas en la superficie del material.
- Propagación de grietas: con el tiempo, estas grietas pueden crecer y extenderse más profundamente en el material.
- Debilitamiento estructural: a medida que las grietas se propagan, la integridad estructural del componente se ve comprometida.
- Fallo catastrófico: si no se detecta y trata a tiempo, puede llevar a la falla completa del componente.

Este proceso puede ocurrir de manera tan gradual que puede pasar desapercibido hasta que es demasiado tarde, lo que hace que la fatiga por ludimiento sea particularmente insidiosa (ver Figura 1.3).

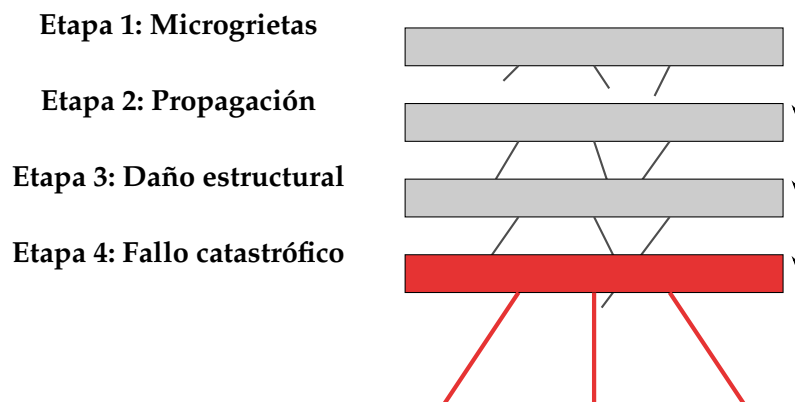


Figura 1.3. Evolución de una microgrieta

La propagación de microgrietas en un material sometido a tensiones puede resultar en un fallo total e irreversible, debido a la pérdida irreversible de la integridad estructural del material. Estas microgrietas, que comienzan como pequeñas imperfecciones localizadas, tienden a crecer y conectarse a medida que el material se deforma, formando una grieta principal que puede comprometer completamente la estructura. Una vez que las microgrietas alcanzan una cierta magnitud y se propagan a través del cuerpo del material, las posibilidades de reparación son extremadamente limitadas, ya que la pérdida de material es significativa y no puede ser restaurada sin comprometer las propiedades mecánicas originales.

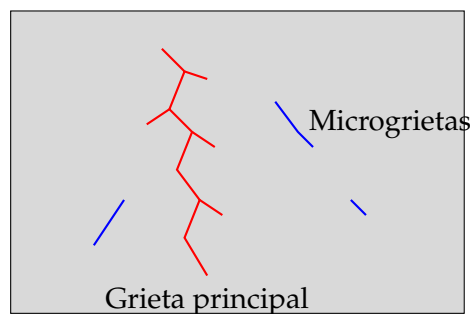


Figura 1.4. Propagación de microgrietas

La Figura 1.4 ilustra este proceso de propagación de microgrietas. En ella se observa cómo las microgrietas (representadas en azul) se originan en distintas áreas del objeto sometido a tensiones, eventualmente conectándose entre sí. La grieta principal (en rojo) surge cuando las microgrietas se unen, lo que provoca el fallo estructural catastrófico. En la Figura, se visualiza cómo las microgrietas se propagan de manera desigual en el cuerpo del objeto, lo que es característico en materiales frágiles o aquellos que han sido sometidos a cargas cíclicas o impactos.

2) *Análisis de esfuerzos*: Comprender y predecir la fatiga por ludimiento es necesario en el análisis de esfuerzos. La clave para determinar la iniciación y propagación de grietas por ludimiento radica en analizar la distribución de esfuerzos en la zona de contacto. En este contexto, el método de elementos finitos (FEM) se ha consolidado como una herramienta, permitiendo modelar estos esfuerzos complejos en geometrías realistas.

La fatiga por ludimiento se caracteriza por la interacción entre superficies en contacto sometidas a una carga cíclica, lo que produce microdeslizamientos repetidos a nivel mi-

croscópico. Este fenómeno ocurre típicamente en ensambles mecánicos donde las superficies de los componentes están en contacto bajo presión, pero no hay movimiento relativo significativo a escala macroscópica. Sin embargo, a nivel microscópico, las superficies experimentan pequeños deslizamientos locales en respuesta a las cargas aplicadas, lo que provoca la formación de microgrietas y, con el tiempo, el fallo por fatiga del material.

Uno de los parámetros más importantes en este proceso es la amplitud de deslizamiento relativo, que representa la magnitud de los microdeslizamientos entre las superficies en contacto. Este parámetro es crítico, ya que influye directamente en la vida útil de los componentes sometidos a ludimiento. A medida que la amplitud de deslizamiento aumenta, la tasa de formación de microgrietas y desgaste también se incrementa, acelerando el deterioro del material y reduciendo su capacidad para soportar cargas a largo plazo.

Cuando la amplitud de deslizamiento es baja, el contacto entre las superficies tiende a ser de tipo "stick-slip", donde las superficies permanecen adheridas durante una parte del ciclo de carga y luego experimentan deslizamientos súbitos.

Stick-slip

Movimiento espontáneo de sacudida que puede presentarse cuando un objeto se desliza sobre otro, causado, entre otros factores, por la diferencia entre los coeficientes de fricción estática y dinámica.

En estos casos, el desgaste puede ser más localizado, y el daño puede estar limitado a las áreas de deslizamiento. Sin embargo, cuando la amplitud de deslizamiento relativo es alta, el deslizamiento entre las superficies se vuelve más uniforme, lo que puede provocar la formación de microgrietas más extendidas a lo largo de la interfaz de contacto generando un desgaste progresivo.

Las consecuencias de estas microgrietas son significativas, debido a que con el tiempo y estando sometidas bajo cargas cíclicas, las grietas tienden a crecer y conectarse, lo que puede llevar a la propagación de grietas más grandes y, eventualmente, al fallo estructural del componente. Este tipo de fallo es especialmente problemático en aplicaciones donde los componentes están sometidos a vibraciones constantes o fluctuaciones de carga, como en turbinas, rodamientos, uniones atornilladas y componentes aeronáuticos.

Además, la amplitud de deslizamiento está influenciada por varios factores, como la rugosidad de las superficies en contacto, el coeficiente de fricción, la presión de contacto y las características de la carga cíclica aplicada. Por ello, en el diseño de componentes

que estarán sometidos a ludimiento, es fundamental controlar estos parámetros para minimizar la amplitud de deslizamiento y, con ello, prolongar la vida útil del sistema. La propagación en el tiempo de la amplitud de un microdeslizamiento tiene la forma de la Figura 1.5.

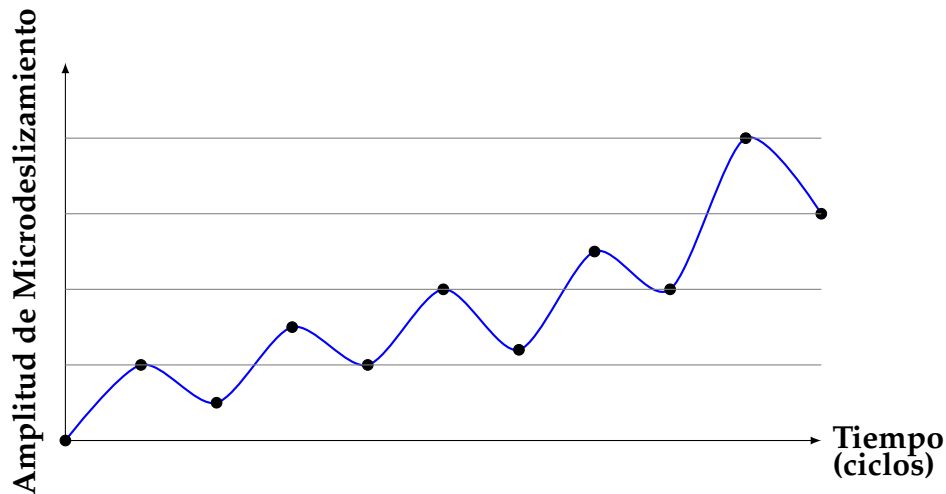


Figura 1.5. Variación de la amplitud de microdeslizamiento

El gradiente de esfuerzos cerca de la superficie de contacto tiene un impacto en la fatiga por ludimiento. Los métodos tradicionales de fatiga multiaxial pueden sobrestimar el riesgo de falla por ludimiento si no se considera adecuadamente este gradiente.

Fatiga multiaxial

Es un proceso de degradación de materiales que ocurre cuando estos están sometidos a esfuerzos cíclicos en múltiples direcciones o ejes, en lugar de en una única dirección como en la fatiga uniaxial.

La presencia de esfuerzos residuales puede influir en la fatiga por ludimiento. En algunos casos, se analiza cómo tratamientos superficiales, como el shot peening, un proceso en el que la superficie del material es bombardeada con pequeñas partículas a alta velocidad para inducir esfuerzos residuales compresivos, pueden mitigar el daño por ludimiento. Este tratamiento mejora la resistencia a la fatiga al reducir las tensiones superficiales que favorecen la formación de grietas. El fenómeno de plastificación localizada en la zona de contacto es un aspecto crítico de la fatiga por ludimiento que requiere un análisis de esfuerzos avanzado.

Los modelos de elementos finitos con plasticidad cíclica permiten estudiar cómo cambia la distribución de esfuerzos con los ciclos de carga y cómo esto afecta la iniciación y propagación de grietas por ludimiento.

La frecuencia de los ciclos de carga son necesarios en el proceso de fatiga por ludimiento. Cuando la frecuencia es alta, los ciclos de deslizamiento y adherencia ("stick-slip") se repiten a un ritmo acelerado, lo que puede generar un mayor nivel de acumulación de daño superficial. Este fenómeno es especialmente útil en aplicaciones que experimentan cargas cíclicas rápidas, como en equipos rotativos o turbinas, donde la fatiga por ludimiento tiende a ser más severa. Por otro lado, a frecuencias más bajas, el daño puede concentrarse más localmente debido a la mayor exposición de las superficies al contacto estático antes del siguiente ciclo de deslizamiento. En ambos casos, la combinación de la frecuencia y la amplitud de deslizamiento tiene un impacto directo en la velocidad a la que se forman y propagan las microgrietas, así como en la extensión del área afectada. Un control adecuado de la frecuencia de los ciclos de carga, junto con la reducción de la amplitud de deslizamiento, puede ayudar a minimizar el riesgo de fallo estructural prematuro por fatiga en ensambles mecánicos.

Materiales con alta dureza tienden a resistir mejor los microdeslizamientos y, por lo tanto, a reducir la amplitud de deslizamiento en comparación con materiales más blandos. La elasticidad del material también es un factor importante, ya que materiales más elásticos pueden absorber mejor las cargas cíclicas y distribuir las tensiones de manera más uniforme, disminuyendo la concentración de esfuerzos en puntos críticos de la superficie de contacto. Sin embargo, esta capacidad de absorber las cargas también puede llevar a una mayor deformación plástica acumulada en materiales menos rígidos, lo que incrementa el riesgo de formación de microgrietas. El uso de recubrimientos o tratamientos térmicos específicos puede mejorar las propiedades superficiales, reduciendo la fricción y controlando la amplitud de deslizamiento, lo que a su vez prolonga la vida útil del componente

C. CICLO DE VIDA ÚTIL

El ciclo de vida útil de un componente sometido a fatiga por ludimiento es un concepto crítico en el análisis de su rendimiento y durabilidad. Este ciclo abarca todas las etapas,

desde el diseño inicial y la fabricación hasta el uso y el eventual fallo del componente (ver Figura 1.6).

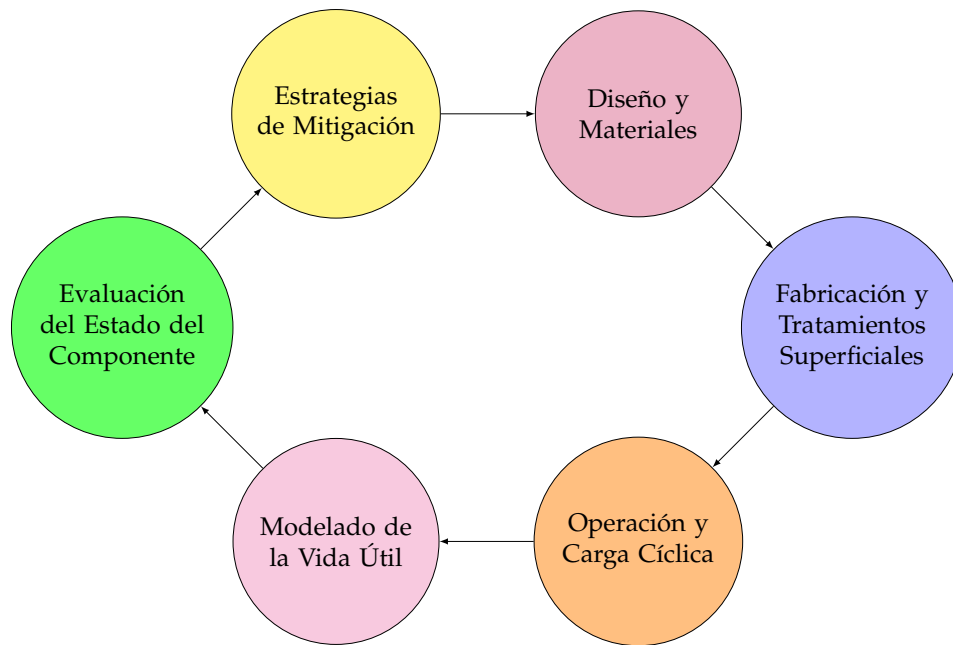


Figura 1.6. Fases del ciclo de la vida útil

1) *Fases del ciclo de vida útil*: Diseño y materiales: en la fase de diseño, es necesario considerar factores como el tipo de material, las condiciones de carga y las interacciones entre superficies en contacto. La selección de materiales con alta resistencia a la fatiga, así como la aplicación de tratamientos superficiales, puede aumentar significativamente la vida útil del componente. En esta etapa, la simulación numérica es muy importante, ya que permite predecir el comportamiento bajo condiciones de carga específicas y optimizar el diseño para minimizar el riesgo de fatiga por ludimiento.

Fabricación y tratamientos superficiales: la calidad de la fabricación influye en la integridad del componente. Procesos como el mecanizado, el tratamiento térmico y la aplicación de recubrimientos son necesarios para asegurar que el componente cumpla con las especificaciones de diseño. Los tratamientos superficiales, como el shot peening o la nitruración, pueden inducir tensiones residuales compresivas que ayudan a retrasar la nucleación de grietas.

Operación y carga cíclica: durante la operación, los componentes están expuestos a cargas cíclicas que pueden generar deslizamientos relativos en las superficies de contacto.

2) *Modelado, monitoreo Y optimización de la vida útil* : El modelado de la vida útil en la fatiga por ludimiento implica la integración de diversas técnicas avanzadas de análisis y monitoreo. Una de las técnicas clave es la aplicación de la Ley de Paris modificada, que se utiliza para predecir la tasa de crecimiento de las grietas a través del rango del factor de intensidad de tensiones. Por otro lado, para estimar la iniciación de grietas se tienen diferentes parámetros de daño, tales como el parámetro de Fidmdley o el Fatemi-Socie (Ver capítulo 2). Estas metodologías permiten determinar cómo evoluciona el daño en una estructura durante su uso. Es necesario considerar que el coeficiente de fricción entre las superficies en contacto no es constante y puede variar debido a factores como el desgaste, la acumulación de residuos y la deformación plástica de los materiales involucrados. Por lo tanto, un modelado preciso debe tener en cuenta la variabilidad en las condiciones de fricción.

La evaluación continua del estado del componente es importante para prever su vida útil y evitar fallos catastróficos. Entre las técnicas comunes para este propósito se encuentran:

- Microscopía Óptica
- Correlación Digital de Imágenes (DIC)
- Emisión Acústica

Para maximizar la vida útil de los componentes sometidos a fatiga por ludimiento, es necesario implementar un programa de mantenimiento predictivo. Este programa debe basarse en los datos obtenidos de las técnicas descritas anteriormente, permitiendo identificar problemas potenciales de manera temprana y realizar intervenciones proactivas antes de que ocurra una falla.

Además, se pueden adoptar diversas estrategias de mitigación para prolongar la vida útil de los componentes, tales como:

- Diseño optimizado
- Uso de lubricantes
- Materiales avanzados

D. RESUMEN

Este capítulo introduce el fenómeno de la fatiga por ludimiento, caracterizado por deslizamientos de baja amplitud entre superficies en contacto que se encuentran sometidas a cargas cíclicas. Se abordan las condiciones que favorecen este tipo de fallo, tales como la presión de contacto, la microgeometría superficial y la naturaleza de las cargas aplicadas. Además, se discuten los mecanismos de iniciación y propagación de grietas, destacando su relación con procesos tribológicos y microestructurales que influyen en la durabilidad de los componentes.

Se explican los conceptos asociados al contacto mecánico, incluyendo el comportamiento stick-slip y la formación de zonas críticas donde se localiza el daño. También se presentan consideraciones sobre la influencia de tratamientos superficiales, recubrimientos y parámetros geométricos que pueden ser modificados para mitigar el daño por ludimiento. El capítulo proporciona una base conceptual sólida para comprender la necesidad de modelos predictivos que integren tanto la mecánica del contacto como el daño acumulativo en componentes industriales.

Métodos de predicción

Los parámetros de daño del plano crítico (CP) son herramientas para predecir la iniciación de grietas por fatiga debido al fenómeno de ludimiento, especialmente en componentes sometidos a cargas cíclicas. Estos parámetros se centran en identificar los planos dentro de un material o estructura donde las tensiones y deformaciones inducen condiciones críticas para la nucleación de grietas. Al hacerlo, facilitan el diseño de componentes más resistentes y duraderos.

Plano Crítico (CP)

Superficie dentro de un sistema físico donde se manifiestan las primeras fallas o inestabilidades en una estructura sometida a cargas. En otras palabras, es el plano donde las tensiones y deformaciones cíclicas alcanzan niveles críticos, lo que conduce a la formación de grietas.

A. CRITERIO DE FATEMI-SOCIE (FS)

El **criterio de Fatemi-Socie** es un modelo de predicción de fatiga multiaxial ampliamente utilizado para evaluar la vida útil de componentes sometidos a cargas cíclicas complejas. Este criterio se basa en la observación de que el daño por fatiga no solo está relacionado con la amplitud de la deformación por cortante, sino también con la tensión normal máxima que actúa en el plano crítico.

El ludimiento, caracterizado por pequeños movimientos oscilatorios entre superficies en contacto, genera un estado de tensiones multiaxial y altamente localizado, lo cual pue-

de acelerar el proceso de fatiga. El criterio FS es particularmente útil en estos casos, ya que permite evaluar con mayor precisión el daño acumulado en las regiones críticas sometidas a ludimiento. A través de la combinación de las componentes de cortadura y las tensiones normales, el criterio FS captura cómo estas variables contribuyen a la apertura y cierre de microgrietas, que con el tiempo pueden llevar a la falla.

El criterio FS incorpora estos factores en la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,m\acute{a}x}}{\sigma_y} \right) \quad (2.1)$$

donde:

- $\Delta\gamma$ es el rango de deformación por cizallamiento durante el ciclo de carga,
- $\sigma_{n,m\acute{a}x}$ es la tensión normal máxima experimentada durante el ciclo,
- σ_y es el límite de fluencia del material, y
- k es una constante dependiente del material, que puede variar según su capacidad para resistir tensiones cíclicas.

Este criterio tiene como objetivo evaluar cómo las tensiones y deformaciones en el plano crítico del material interactúan para generar una grieta. El rango de deformación por cizallamiento, $\Delta\gamma$, representa la magnitud de las deformaciones cíclicas en el plano de cortadura, mientras que la tensión normal máxima, $\sigma_{n,m\acute{a}x}$, actúa para abrir y cerrar las grietas que se forman en ese plano.

El parámetro k , que es una constante del material, modula el impacto que la tensión normal tiene sobre el daño acumulado. Materiales con mayor resistencia al ludimiento, por ejemplo, suelen tener valores de k menores, indicando que el efecto de la tensión normal en la apertura de grietas es menos pronunciado. En otras palabras, los materiales más susceptibles a fatiga por ludimiento pueden tener valores de k más altos. Ejemplos típicos incluyen conexiones con pernos, uniones entre ejes y agujeros, y superficies de contacto en rodamientos.

1) *Interacción de tensiones y deformaciones*: El criterio de Fatemi-Socie (FS) tiene en cuenta tanto la deformación por cizallamiento como la tensión normal porque, en muchos casos, la fatiga multiaxial involucra complejas interacciones entre estos dos factores. En

situaciones de ludimiento, el deslizamiento microscópico entre las superficies en contacto induce altos niveles de cizallamiento. Sin embargo, es la combinación de esta deformación con la tensión normal la que puede desencadenar el proceso de nucleación de grietas.

Cuando la deformación por cizallamiento alcanza un nivel significativo, en combinación con una tensión normal alta, es más probable que ocurra la iniciación de grietas por fatiga. La tensión normal actúa como un factor que facilita la apertura de las microgrietas generadas por el cizallamiento, y su influencia se hace más notable cuando se acercan al límite de fluencia del material (σ_y). Esto explica por qué el criterio FS incluye una relación entre la tensión normal máxima y el límite de fluencia, ponderada por el parámetro k .

2) *Criterio FS en diseño de componentes*: El criterio FS se aplica en diversas industrias, especialmente en el diseño de componentes sometidos a cargas cíclicas y contactos de alta presión, como es el caso de rodamientos, engranajes y juntas mecánicas, como es discutido por Dinni y Liskiewicz [1]. Al aplicar este criterio, se pueden predecir tanto la iniciación como la propagación de grietas de fatiga, lo que permite a los ingenieros diseñar componentes más resistentes al ludimiento.

La selección de este parámetro de daño radica en su notable capacidad para predecir con bajo margen de error tanto la vida útil como el ángulo de nucleación de grietas en la fatiga por ludimiento, lo cual ha sido confirmado en diversos estudios con diferentes materiales y configuraciones de este fenómeno [23], [7]. Una ventaja significativa frente a otros parámetros es que el criterio FS se fundamenta en la deformación cortante [24], aspecto crucial ya que se ha encontrado que el crecimiento de la grieta en etapa I ocurre en el mismo plano de la máxima deformación cortante, para materiales como los aceros y las aleaciones de aluminio. Adicionalmente, este criterio contempla los efectos de cargas no proporcionales y fuera de fase, condiciones intrínsecas en los casos de fatiga por ludimiento. Evaluar el criterio FS en múltiples planos dentro de un material o componente facilita la identificación del plano crítico, el cual es la superficie dentro del material donde las tensiones y deformaciones alcanzan los niveles más peligrosos y donde es más probable que se inicie el proceso de falla.

B. CRITERIO SMITH-WATSON-TOPPER (SWT)

Otro criterio ampliamente utilizado en el análisis de la fatiga por ludimiento es el **Criterio SWT (Smith-Watson-Topper)**, el cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$SWT = \sigma_{n,m\acute{a}x} \cdot \frac{\Delta \varepsilon}{2} \quad (2.2)$$

donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ es la tensión normal máxima experimentada durante el ciclo de carga, y
- $\Delta \varepsilon$ es el rango de deformación normal en el plano crítico durante el mismo ciclo.

El criterio SWT es particularmente útil porque combina dos factores en la evaluación de la fatiga por ludimiento: la tensión máxima y el rango de deformación normal. Estos parámetros son críticos para predecir el daño acumulado en el material, ya que la fatiga no solo depende de las tensiones elevadas, sino también de las deformaciones cíclicas que el material experimenta.

Este criterio busca cuantificar el daño en función de la interacción entre la carga aplicada y la respuesta elástica-plástica del material. Al multiplicar la tensión máxima por el rango de deformación normal, se captura tanto el esfuerzo mecánico impuesto sobre el material como su capacidad de deformación. De este modo, el valor de SWT refleja el daño acumulado en el ciclo de carga, proporcionando una estimación de la propensión a la iniciación de grietas en el plano crítico.

Estimación de propensión

Se refiere a la evaluación de la probabilidad o predisposición de que ocurra fatiga debido a ludimiento.

1) *Criterio SWT en ludimiento*: En el caso del ludimiento, el SWT es particularmente relevante porque este fenómeno implica deslizamientos microscópicos entre superficies en contacto bajo carga cíclica. Estas interacciones pueden producir elevadas tensiones y deformaciones concentradas en áreas localizadas, donde es probable que se desarrollen

grietas por fatiga. El criterio SWT ayuda a identificar esas áreas críticas, basándose en el comportamiento de la tensión normal y el rango de deformación en el plano afectado.

El rango de deformación normal ($\Delta\epsilon$) es la base en este contexto, ya que en superficies sometidas a contacto repetitivo, como ocurre en el ludimiento, pequeñas variaciones en la deformación pueden acumularse con el tiempo. Esta acumulación progresiva provoca concentraciones de esfuerzo localizadas que, eventualmente, conducen a la nucleación de grietas.

Además, el criterio SWT se evalúa en diferentes planos dentro del material o componente, lo que permite identificar el *plano crítico*, es decir, la superficie donde es más probable que ocurra la falla por fatiga. En combinación con otros métodos, como el criterio de Fatemi-Socie (FS), el criterio SWT proporciona una evaluación robusta del riesgo de fatiga por ludimiento en componentes sometidos a cargas cíclicas y contactos deslizantes.

El criterio SWT es valorado por su capacidad para predecir tanto el inicio de la fatiga como la propagación de grietas bajo condiciones de carga cíclica. Entre sus ventajas destacan:

- **Simplicidad:** la ecuación del criterio SWT es relativamente simple y fácil de implementar en análisis de fatiga.
- **Relevancia física:** combina dos de los factores más importantes en la fatiga por ludimiento: la tensión máxima y la deformación, reflejando así la interacción entre carga y respuesta del material.
- **Generalidad:** se puede aplicar a una amplia gama de materiales y configuraciones geométricas.

La elección de este criterio se fundamenta en que, al igual que el criterio FS, es uno de los criterios más utilizados para determinar tanto la vida útil como la posición y orientación de grieta en fatiga por ludimiento. Su amplia aplicabilidad radica en su efectividad para predecir el comportamiento bajo condiciones de crecimiento de grieta por tracción (modo I) en entornos de carga multiaxial. Además, proporciona predicciones precisas tanto para regímenes de fatiga de alto y de bajo ciclaje, considerando simultáneamente los efectos del esfuerzo medio y condiciones de cargas no proporcionales.

Ambos criterios, FS y SWT, deben ser evaluados en diferentes planos del material para identificar el plano crítico que está más predispuesto a fallar, permitiendo así un análisis de la resistencia de los componentes sometidos a ludimiento.

C. MÉTODOS DE PROMEDIADO

Los métodos de promediado en la fatiga por ludimiento se utilizan en conjunto con los parámetros de daño para estimar la ubicación de la nucleación de grietas. Entre los métodos más comunes se incluyen:

1. **Promediado de línea:** este método evalúa el parámetro de daño a lo largo de una línea radial que parte desde el punto donde se espera la mayor concentración de tensiones, permitiendo determinar la ubicación y el ángulo de nucleación de la grieta.
2. **Promediado de volumen:** se promedia el parámetro de daño dentro de un volumen semiesférico alrededor del punto de mayor concentración de tensiones.
3. **Promediado de cuadrante:** este método divide la zona de contacto en cuadrantes y promedia el daño en cada uno de ellos, facilitando la identificación del cuadrante donde es más probable que nucleen las grietas.

Los métodos de promediado se basan en la idea de que la iniciación de grietas no depende únicamente de las condiciones en un punto singular, sino de un volumen de material alrededor de ese punto.

La elección adecuada del radio para los métodos de promediado es crucial para la precisión de estos métodos. Esta elección afecta significativamente los resultados obtenidos, ya que un valor demasiado pequeño podría dejar fuera zonas que afectan directamente en la nucleación de grietas, mientras que para un valor demasiado grande, el promedio se alejaría mucho del valor representativo real. Para determinar estos tamaños, la teoría de distancias críticas proporciona algunas pautas, usando valores basados en el parámetro de El-Haddad (l_c), que se obtiene de las propiedades fractomecánicas del material. Según esta teoría, el radio óptimo para el método de línea corresponde a $2l_c$, mientras que para el método de volumen se recomienda utilizar exactamente el valor l_c [25].

Alternativamente, el tamaño de grano del material ha demostrado ser un criterio efectivo para definir esta distancia, ofreciendo en determinados casos mejor correlación que las obtenidas mediante el parámetro de El-Haddad [26]. En aplicaciones prácticas, es frecuente emplear un enfoque iterativo, experimentando con diferentes valores hasta identificar aquella distancia que muestra mayor concordancia con los resultados experimentales. Este proceso de calibración permite ajustar los modelos numéricos a las condiciones específicas del material y la geometría del componente analizado.

1) *Promediado de línea*: Este método evalúa el parámetro de daño a lo largo de una línea que parte del punto de máxima concentración de tensiones.

Procedimiento:

1. Identificar el punto de máxima concentración de tensiones.
2. Trazar una línea radial desde este punto hacia el interior del material.
3. Calcular el parámetro de daño en varios puntos a lo largo de esta línea.
4. Promediar estos valores para obtener un único valor representativo.

Ventajas:

- Simple de implementar.
- Puede capturar gradientes de tensión cerca de la superficie.

Desventajas:

- La elección del tamaño de la línea puede afectar significativamente los resultados.

2) *Promediado de volumen*: Este método considera un volumen semiesférico alrededor del punto crítico.

Procedimiento:

1. Definir un volumen semiesférico centrado en el punto de máxima concentración de tensiones.
2. Calcular el parámetro de daño en múltiples puntos dentro de este volumen.
3. Promediar estos valores para obtener un único valor representativo.

Ventajas:

- Más representativo del comportamiento tridimensional del material.
- Menos sensible a singularidades locales.

Desventajas:

- Computacionalmente más intensivo.
- La elección del tamaño del volumen puede afectar significativamente los resultados.

3) *Promediado de cuadrante*: Este método divide la zona de contacto en cuadrantes y promedia el daño en cada uno.

Procedimiento:

1. Dividir la zona de contacto en cuadrantes.
2. Calcular el parámetro de daño en varios puntos dentro de cada cuadrante.
3. Promediar los valores para cada cuadrante.
4. Identificar el cuadrante con el valor promedio más alto.

Ventajas:

- Puede identificar múltiples zonas de posible iniciación de grietas.
- Útil para geometrías complejas o cargas no uniformes.

Desventajas:

- La elección de cómo dividir los cuadrantes puede afectar los resultados.
- Puede perder detalles finos dentro de cada cuadrante.

D. ORIENTACIÓN Y CRECIMIENTO DE GRIETAS

La orientación de la grieta en la fatiga por ludimiento es un aspecto necesario, ya que determina cómo se propaga la grieta a través del material. Inicialmente, las grietas suelen crecer en un ángulo oblicuo a la superficie de contacto debido a las tensiones combinadas. Sin embargo, una vez que la grieta alcanza una longitud crítica, cambia su orientación para

crecer perpendicularmente a la superficie, influenciada por las tensiones cíclicas axiales o normales. Este cambio de orientación está relacionado con la transición de la etapa de nucleación a la de propagación.

El crecimiento de grietas en fatiga por ludimiento se puede dividir en dos fases principales:

- Fase I: Crecimiento inicial oblicuo
- Fase II: Crecimiento perpendicular a la superficie

1) *Fase I*: En esta fase inicial, las grietas suelen crecer en un ángulo oblicuo con respecto a la superficie de contacto. A continuación se mencionan las principales características:

- Longitud de grieta típicamente entre $10 - 100 \mu m$
- Ángulo de crecimiento generalmente entre 30° y 60° respecto a la superficie
- Fuertemente influenciada por las tensiones de cizallamiento locales

Las tensiones de cizallamiento ocurren debido a las fuerzas cortantes elementales, que surgen como resultado de las tensiones distribuidas en diferentes puntos de la sección de contacto entre dos superficies que experimentan pequeños movimientos relativos repetidos:

$$T = \int_A \tau \cdot dA$$

En componentes sometidos a ciclos repetitivos de carga, como remaches, pernos, soldaduras o chavetas, donde el contacto superficial es restringido y las cargas son fluctuantes, la fatiga por ludimiento es un problema recurrente. En este contexto, se asume que la tensión cortante es constante a lo largo de la sección de contacto, facilitando la concentración de tensiones en áreas críticas y, eventualmente, la aparición de microfisuras que pueden evolucionar hacia fallos por fatiga.

$$T = \tau \cdot \int_A dA; \quad \tau = \frac{T}{A}$$

Factores que influyen en la orientación:

- Estado de tensiones local: la combinación de tensiones normales y de cizallamiento determina la dirección de máxima tensión tangencial.

- Microestructura del material: la orientación de los granos y las fronteras de grano pueden influir en la dirección de crecimiento.
- Amplitud de deslizamiento: mayores amplitudes pueden resultar en ángulos de crecimiento más pronunciados.

2) *Fase II*: Una vez que la grieta alcanza una longitud crítica, cambia su dirección de crecimiento para orientarse perpendicularmente a la superficie.

Características:

- Comienza típicamente cuando la longitud de grieta supera los $100 - 200 \mu m$.
- Crecimiento dominado por las tensiones cíclicas de tracción.
- Dirección de crecimiento generalmente perpendicular a la dirección de carga principal.

Factores que influyen en la transición de Fase I a Fase II:

- Longitud de grieta: a medida que la grieta crece, se aleja de la zona de influencia del contacto de ludimiento.
- Gradiente de tensiones: la disminución del gradiente de tensiones con la profundidad favorece el crecimiento perpendicular.
- Carga axial: las tensiones cíclicas axiales o normales ganan dominancia sobre las tensiones de contacto.

3) *Modelos de predicción de orientación de grietas de propagación*: **Criterio de la máxima tensión tangencial (MTS)**

Este criterio postula que la grieta crece en la dirección perpendicular a la máxima tensión tangencial. La ecuación es:

$$\theta_c = 2 \arctan \left[\frac{\frac{K_I}{K_{II}} - \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8}}{4} \right] \quad (2.3)$$

donde:

- θ_c : ángulo de crecimiento de la grieta.
- K_I : factor de intensidad de tensiones en modo I.
- K_{II} : factor de intensidad de tensiones en modo II.

Criterio de la mínima densidad de energía de deformación (S)

Este criterio sugiere que la grieta crece en la dirección que minimiza la densidad de energía de deformación alrededor de la punta de la grieta. La ecuación es:

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_IK_{II} + a_{22}K_{II}^2 + a_{33}K_{III}^2 \quad (2.4)$$

Donde a_{ij} son coeficientes que dependen de las propiedades del material y K_i son los factores de intensidad de tensiones en los modos I, II y III.

4) Técnicas experimentales para el estudio de orientación y crecimiento :

- Microscopía óptica in situ: permite observar el crecimiento de grietas en tiempo real durante los ensayos de fatiga por ludimiento.
- Tomografía computarizada de rayos X: proporciona imágenes 3D de alta resolución de la evolución de las grietas.
- Correlación digital de imágenes (DIC): permite medir campos de desplazamiento y deformación en la superficie, ayudando a identificar la iniciación y crecimiento de grietas.
- Emisión acústica: detecta la liberación de energía asociada con el crecimiento de grietas, permitiendo monitorear su evolución.

Ejemplo 2.4.0:

Se considera un eje de acero sometido a fatiga por ludimiento:

- Diámetro del eje: 50 mm
- Carga axial cíclica: $\sigma_a = 200$ MPa
- Presión de contacto: $p_0 = 100$ MPa

- Coeficiente de fricción: $\mu = 0.6$

Utilizando un análisis de elementos finitos, se obtienen los siguientes factores de intensidad de tensiones en el borde del contacto:

$$K_{II} = 3 \text{ MPa} \sqrt{m}$$

Aplicando el criterio MTS:

$$\theta_c = 2 \arctan \left(\frac{\frac{5}{3} - \sqrt{\left(\frac{5}{3}\right)^2 + 8}}{4} \right) \approx -60.5^\circ$$

Este resultado sugiere que la grieta inicialmente crece a un ángulo de aproximadamente 60.5° respecto a la superficie, hacia el interior del eje. La orientación y el crecimiento de grietas en fatiga por ludimiento, están ligados a procesos complejos que dependen de múltiples factores.

La comprensión de las fases de crecimiento y la aplicación de modelos predictivos adecuados son necesarias para evaluar la integridad estructural de componentes sometidos a ludimiento. Las técnicas experimentales validan estos modelos y ofrecen insights valiosos sobre el comportamiento real de las grietas.

Insights

Son percepciones o entendimientos profundos que ayudan a clarificar o explicar un fenómeno complejo, en este caso, el comportamiento de las grietas en condiciones reales.

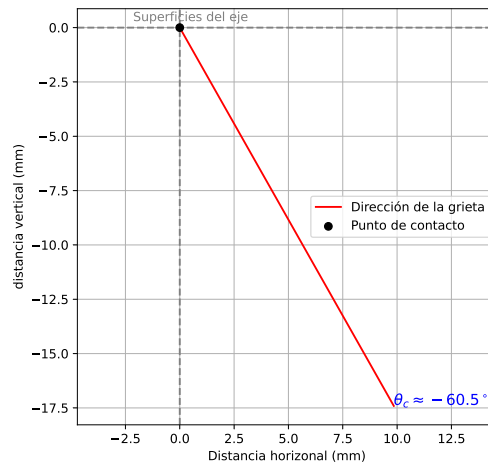


Figura 2.1. Propagación de grietas en la fatiga por ludimiento

Una representación de esa propagación con respecto al ángulo obtenido es la que se observa en la figura 2.1.

5) *Iniciación y propagación de grietas*: La longitud de las grietas que se inician debido a la fatiga por ludimiento se define mediante modelos basados en la mecánica de fractura. Durante la etapa de nucleación, las grietas son pequeñas y no afectan significativamente la integridad estructural. Sin embargo, a medida que crecen, su longitud y orientación tienen un impacto crítico en la vida residual del componente. Es común utilizar FEM para estimar cómo estas grietas iniciales se propagan hasta alcanzar una longitud crítica que pueda comprometer la pieza.

La longitud de la grieta se puede definir de varias maneras, lo que permite evaluar diferentes aspectos del daño y la progresión de la falla en los componentes. Algunas formas de definirlas son las siguientes:

Longitud superficial: es la extensión visible de la grieta en la superficie del componente. Es la más fácil de medir en muchas aplicaciones industriales, pero puede subestimar la gravedad del daño si la grieta tiene una propagación más profunda.

Longitud efectiva: incluye no solo la longitud física de la grieta, sino también la zona de proceso delante de la punta de la grieta, donde ocurre daño microestructural.

Longitud proyectada: es la proyección de la grieta en una dirección específica, generalmente perpendicular a la carga principal.

El crecimiento de grietas en fatiga se divide generalmente en tres fases, cada una caracterizada por una longitud específica de grieta y su interacción con la microestructura del material. A continuación se explica brevemente en qué consiste cada fase:

Fase de iniciación: en esta fase inicial, la grieta es corta, generalmente menor a $100\ \mu m$, y altamente influenciada por la microestructura del material, como los bordes de grano, inclusiones o fases secundarias. El crecimiento de la grieta es irregular y depende de los detalles microestructurales. La mecánica de fractura lineal elástica (LEFM) no es aplicable debido al tamaño pequeño de la grieta y la significativa influencia de la microestructura local.

Mecánica de Fractura Lineal Elástica (LEFM)

Es un modelo que permite describir el comportamiento de materiales que fallan o se fracturan bajo carga cuando presentan grietas. Asume que el material es elástico y que las deformaciones antes de la fractura siguen la ley de Hooke (comportamiento lineal).

Fase de propagación temprana: la grieta ha crecido lo suficiente para ser considerada físicamente corta, con una longitud entre $100\ \mu m$ y $1\ mm$. En esta fase, la LEFM comienza a ser aplicable, pero su validez debe ajustarse por la interacción microestructural y la presencia de zonas plastificadas cercanas a la punta de la grieta.

Fase de propagación estable: en esta fase, la grieta ha alcanzado una longitud mayor a $1\ mm$ y se comporta como una grieta larga. La LEFM es plenamente aplicable y el crecimiento de la grieta puede ser modelado mediante la Ley de Paris, que relaciona la tasa de crecimiento de grieta con el rango del factor de intensidad de tensiones (ΔK).

6) *Modelos estimadores de longitud de grietas*: Modelo de El Haddad: El modelo de El Haddad es ampliamente utilizado para describir el comportamiento de grietas cortas en materiales sujetos a fatiga. Este modelo se basa en el concepto de longitud de grieta intrínseca (a_0), que representa una longitud de transición entre el comportamiento de grietas cortas y largas.

El Haddad propone que la longitud efectiva de la grieta (a_{eff}) no solo depende de la longitud física observada de la grieta (a), sino también de esta longitud intrínseca del material. De este modo, la ecuación para la longitud efectiva es:

$$a_{\text{eff}} = a + a_0$$

Donde a_{eff} es la longitud efectiva de la grieta, a es la longitud física de la grieta y a_0 es la longitud de grieta intrínseca, que depende del material.

grieta (a). Este modelo es especialmente útil en situaciones donde se necesita determinar si una grieta pequeña crecerá bajo condiciones de carga cíclica. Para grietas muy pequeñas, el crecimiento puede estar limitado por el umbral de intensidad de tensiones (ΔK_{th}), que es menor que para grietas más grandes.

La ecuación que describe esta transición es:

$$\Delta K_{th} = \Delta K_0 \cdot \sqrt{\frac{a}{a + a_0}}$$

Donde ΔK_{th} es el umbral de crecimiento de grietas, ΔK_0 es el umbral de crecimiento de grietas largas, a_0 es la longitud de grieta característica del material y a es la longitud física de la grieta.

Este modelo permite representar gráficamente (ver figura 2.2) la relación entre el umbral de crecimiento de grietas y la longitud de grieta y es útil para predecir el comportamiento de fatiga en componentes con grietas pequeñas.

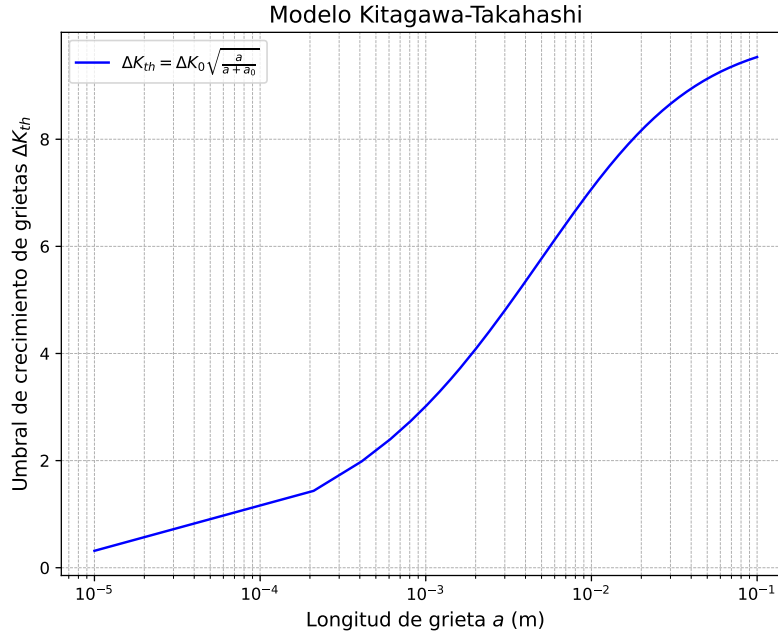


Figura 2.2. Modelo de Kitagawa-Takahashi

Modelo de crecimiento basado en la deformación plástica cíclica: este modelo aborda el crecimiento de grietas en la fase de iniciación, especialmente relevante para las grietas cortas. El crecimiento de las grietas en esta fase está controlado por la deformación plástica cíclica en la zona alrededor de la grieta.

El modelo se describe mediante la ecuación:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta \varepsilon_p \cdot a)^m$$

Donde $\frac{da}{dN}$ es la tasa de crecimiento de la grieta por ciclo, $\Delta \varepsilon_p$ es el rango de deformación plástica cíclica, y C y m son constantes del material.

Técnicas experimentales para medir la longitud de grieta

- Réplicas de acetato: permiten capturar la superficie de la grieta sin interrumpir el ensayo, proporcionando una imagen precisa del daño superficial.
- Microscopía óptica de alta resolución: utilizada para medir grietas superficiales con gran precisión.
- Caída de potencial eléctrico: mide el cambio en la resistencia eléctrica debido al crecimiento de la grieta, útil para grietas subsuperficiales.
- Ultrasonidos: se utiliza para detectar y medir grietas debajo de la superficie del material.
- Tomografía computarizada de rayos X: proporciona mediciones tridimensionales precisas de la longitud y forma de la grieta.

Longitud de grieta y vida de fatiga

La relación entre la longitud de la grieta y la vida de fatiga se expresa comúnmente mediante la curva de la tasa de crecimiento de grieta por ciclo ($\frac{da}{dN}$) frente al rango del factor de intensidad de tensiones (ΔK), conocido como el diagrama de Paris:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

donde:

- $\Delta K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ es el rango del factor de intensidad de tensiones.
- C y m son constantes del material.
- a longitud de la grieta.
- Y factor geométrico.
- σ tensión aplicada.

La vida remanente de un componente puede estimarse integrando esta ecuación desde la longitud de grieta inicial (a_i) hasta la longitud crítica de grieta (a_f):

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m}$$

Donde N_f es el número de ciclos hasta el fallo, a_i es la longitud de grieta inicial y a_f es la longitud crítica de la grieta.

Ejemplo 2.4.0:

Considérese un componente de aluminio sometido a fatiga por ludimiento con las siguientes características:

- Longitud de grieta detectada: $a = 0.5 \text{ mm}$
- Longitud de grieta crítica: $a_f = 10 \text{ mm}$
- Constantes del material: $C = 1 \times 10^{-11}$, $m = 3$
- Rango de tensión aplicada: $\Delta\sigma = 100 \text{ MPa}$
- Factor geométrico: $Y = 1.12$ (para una grieta superficial)

A continuación se muestran los pasos para estimar la vida remanente:

1. Calcular el rango del factor de intensidad de tensiones inicial, ΔK , para la longitud de grieta detectada:

$$\Delta K = Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi a}$$

Sustituyendo los valores:

$$\Delta K = 1.12 \cdot 100 \cdot \sqrt{\pi \cdot 0.0005} = 4.43 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

2. Estimar la tasa de crecimiento inicial de la grieta utilizando la ley de Paris:

La ley de Paris se expresa como:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$

Sustituyendo los valores conocidos:

$$\frac{da}{dN} = 1 \times 10^{-11} \cdot (4.43)^3 = 8.68 \times 10^{-10} \text{ m/ciclo}$$

3. Integración numérica para obtener la vida remanente N_f :

La vida remanente del componente se estima integrando la ley de Paris desde la longitud de grieta inicial ($a_i = 0.5 \text{ mm}$) hasta la longitud crítica de grieta ($a_f = 10 \text{ mm}$):

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C \cdot (\Delta K)^m}$$

Utilizando un método numérico de integración, se obtiene:

$$N_f \approx 230,000 \text{ ciclos}$$

Esto significa que el componente puede soportar aproximadamente 230,000 ciclos de carga adicionales antes de que la grieta alcance su longitud crítica y provoque el fallo.

E. CARGA DESFASADA

Las cargas fuera de fase, es decir, aquellas en las que las tensiones axiales y de contacto no están sincronizadas, pueden influir en la nucleación y propagación de grietas en la fatiga por ludimiento. Este fenómeno, aunque no ha sido ampliamente estudiado, sugiere que en condiciones de carga desfasada, el crecimiento de las grietas puede acelerarse. Esto se debe a que las tensiones de corte y normales no actúan de manera lineal sobre las superficies en contacto, generando patrones de daño que requieren un análisis para comprender su impacto en la integridad estructural.

La carga desfasada ocurre cuando hay un desfase temporal entre:

- La carga axial aplicada al componente principal.
- La carga normal o tangencial en la zona de contacto.

Este desfase afecta el comportamiento del material bajo condiciones de fatiga, ya que modifica el ciclo de carga experimentado por el componente.

A continuación se presentan los siguientes parámetros de análisis:

- Ángulo de fase (φ): representa la diferencia de fase entre las cargas axiales y de contacto.
- Amplitud de la carga axial (σ_a): indica la magnitud de la carga axial aplicada.
- Amplitud de la carga de contacto (P): mide la presión de contacto que se genera entre las superficies.
- Frecuencia de las cargas (f): define cuántas veces por unidad de tiempo se aplica el ciclo de carga.

1) *Alteración del campo de tensiones*: La carga desfasada altera el campo de tensiones en las superficies en contacto, lo que afecta la nucleación de grietas:

- En fase ($\varphi = 0^\circ$): las tensiones axiales y de contacto alcanzan sus máximos simultáneamente, produciendo un patrón de daño más localizado.
- **Fuera de fase** ($0^\circ < \varphi < 360^\circ$): los máximos de tensión axial y de contacto ocurren en momentos diferentes, lo que resulta en una distribución más compleja y extendida del daño.

La carga desfasada puede alterar la extensión y el comportamiento de las zonas de adhesión y deslizamiento. Esto lleva a un aumento del área sometida a deslizamiento parcial, potenciando así la nucleación de grietas, ya que las condiciones de contacto se vuelven más propensas a generar fallos.

Las grietas tienden a nuclearse en la dirección de máxima tensión tangencial. La carga desfasada puede modificar la dirección de esta tensión a lo largo del ciclo, resultando en una posible nucleación de grietas en múltiples orientaciones, lo que complica aún más la predicción de su comportamiento. La carga desfasada puede modificar el umbral de tensión necesario para la iniciación de grietas. En ciertos casos, esto puede llevar a una iniciación más temprana de las grietas, lo que es crítico para la evaluación de la vida útil de componentes sometidos a fatiga.

F. MODELADO DE LA CARGA DESFASADA

1) *Enfoque analítico*: Para analizar el impacto de la carga desfasada, se considera una carga axial sinusoidal y una carga de contacto también sinusoidal, expresadas como:

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t)$$

$$P(t) = P_m + P_a \sin(\omega t + \varphi)$$

donde:

- σ_m, P_m : componentes medias de las cargas.
- σ_a, P_a : amplitudes de las cargas.
- ω : frecuencia angular.
- φ : ángulo de fase.

2) *Análisis de elementos finitos (FEA)*: Se requiere un análisis transitorio para capturar el efecto del desfase. Los pasos típicos incluyen:

1. Aplicar precarga de contacto.
2. Aplicar cargas cíclicas con el desfase apropiado.
3. Analizar múltiples ciclos para capturar el comportamiento estabilizado.

3) *Criterios de fallo modificados*: Los criterios de fallo estándar deben adaptarse para considerar la variación temporal de las tensiones. Un ejemplo es el criterio de Smith-Watson-Topper (SWT) modificado:

$$SWT_{\max} = \max \left[\sigma_{n,\max}(t) \cdot \frac{\Delta \varepsilon(t)}{2} \right]$$

donde:

- $\sigma_{n,\max}(t)$: tensión normal máxima en función del tiempo.
- $\Delta \varepsilon(t)$: rango de deformación en función del tiempo.

Para validar los modelos teóricos, se utilizan diversas técnicas experimentales, tales como:

- **Ensayos de fatiga multiaxial:** utilizando máquinas de ensayo capaces de aplicar cargas axiales y de contacto con control de fase independiente.
- **Correlación digital de imágenes (DIC):** para mapear los campos de deformación en la superficie y detectar la iniciación de grietas.
- **Emisión acústica:** para detectar la nucleación de grietas en tiempo real.
- **Microscopía in-situ:** para observar la evolución de la superficie durante el ensayo.

Ejemplo 2.6.0:

Se considera un eje de acero sometido a fatiga por ludimiento bajo las siguientes condiciones:

- Diámetro del eje: 50 mm.
- Carga axial: $\sigma(t) = 200 + 150 \sin(\omega t)$ MPa.
- Presión de contacto: $P(t) = 100 + 50 \sin(\omega t + \varphi)$ MPa.
- Frecuencia: $f = 10$ Hz.
- Coeficiente de fricción: $\mu = 0.6$.

El análisis para diferentes ángulos de fase muestra:

- En fase ($\varphi = 0^\circ$): nucleación de grietas predominantemente en el borde de contacto, con una orientación inicial de grietas aproximada a 45° respecto a la superficie.
- Fuera de fase ($\varphi = 90^\circ$): zona de nucleación más extendida y múltiples orientaciones de grietas iniciales observadas, con una reducción del umbral de iniciación en aproximadamente un 15 %.
- Completamente fuera de fase ($\varphi = 180^\circ$): cambio significativo en la ubicación de nucleación de grietas, con un aumento de la vida de iniciación en aproximadamente un 30 %.

La carga desfasada en fatiga por ludimiento introduce complejidades adicionales en el análisis y predicción de la nucleación de grietas. Estas complejidades incluyen la alteración de la distribución espacial de tensiones, ya que las tensiones axiales y de

contacto ya no actúan de manera sincronizada, creando zonas de concentración de esfuerzos más irregulares. También modifican la distribución temporal de las tensiones, generando fluctuaciones en los ciclos de carga que pueden dificultar la predicción de la respuesta material. Además, afectan las zonas de deslizamiento y adhesión, variando los puntos en los que ocurren estos fenómenos en las superficies en contacto. Estas cargas pueden cambiar la orientación y ubicación de las grietas iniciales, haciendo que su crecimiento siga trayectorias no previstas bajo condiciones de carga sincronizada.

Por tanto, la consideración adecuada de la carga desfasada es necesaria para la evaluación de la vida a fatiga en componentes sometidos a ludimiento.

Los gráficos que se presentan en la figura 2.3 enseñan la variación de tensiones en función del tiempo para diferentes ángulos de fase ($\varphi = 0^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, $\varphi = 180^\circ$) en el análisis de la carga axial y la presión de contacto. Cada gráfico compara cómo estas dos tensiones (carga axial en azul y presión de contacto en rojo) se comportan bajo distintos grados de desfase, lo que tiene implicaciones importantes en la evaluación de la fatiga por ludimiento y la propagación de grietas.

En el primer gráfico ($\varphi = 0^\circ$), la carga axial y la presión de contacto están completamente en fase. Esto significa que ambas tensiones alcanzan sus máximos y mínimos al mismo tiempo. En este caso, las tensiones están sincronizadas, lo que indica una situación donde la carga axial y la presión de contacto actúan de manera coherente sobre la superficie del material. Esta condición genera un patrón de tensiones más predecible en términos de propagación de grietas.

En el segundo gráfico ($\varphi = 90^\circ$), se observa un desfase de 90 grados entre la carga axial y la presión de contacto. Aquí, la carga axial alcanza su máximo cuando la presión de contacto está en un punto intermedio y viceversa. Este desfase parcial crea un comportamiento más complejo en las tensiones que actúan sobre el material. Las tensiones no están completamente sincronizadas, lo que implica que los picos de esfuerzo de una tensión ocurren cuando la otra tensión no está en su máximo. Esto puede generar complejidades en la forma en que las grietas nucleas y crecen en el material.

Respecto al tercer gráfico ($\varphi = 180^\circ$), la carga axial y la presión de contacto están completamente desfasadas, es decir, cuando la carga axial está en su punto máximo, la presión de contacto está en su mínimo, y viceversa. Este desfase completo impli-

ca que las tensiones actúan de manera opuesta en términos de tiempo, creando una situación en la que las tensiones máximas nunca ocurren simultáneamente. Esta condición puede generar efectos únicos en la iniciación y crecimiento de grietas, ya que las tensiones de corte y normales ejercen sus efectos en momentos opuestos, afectando el comportamiento del material de una manera distinta a los casos anteriores.

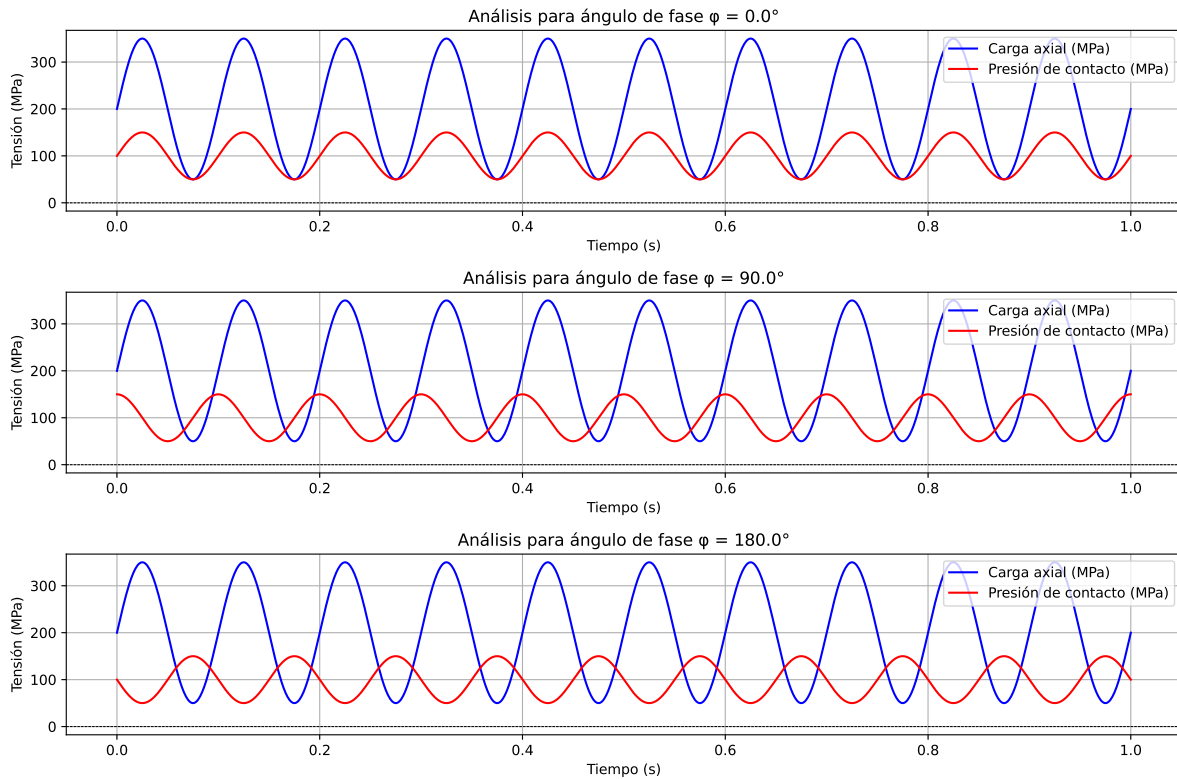


Figura 2.3. Variación de tensiones en función del tiempo para diferentes ángulos de fase.

4) *Modelo de la propagación de grietas*: En el análisis de la durabilidad de componentes sometidos a fatiga, particularmente en condiciones de ludimiento, se requiere entender y predecir este comportamiento. Para ello, se utilizan diversos modelos y teorías que permiten describir de manera efectiva la tasa de crecimiento de las grietas y los factores que la afectan.

1. Ley de Paris modificada: la Ley de Paris modificada permite modelar la tasa de crecimiento de grietas por ciclo de carga. Se expresa matemáticamente como:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{\text{eff}})^m$$

En esta ecuación, $\frac{da}{dN}$ representa la tasa de crecimiento de la grieta por ciclo de carga, mientras que ΔK_{eff} es el rango efectivo del factor de intensidad de tensiones. Las constantes C y m dependen del material específico y de su microestructura, reflejando la sensibilidad del material a la fatiga.

Este modelo permite calcular la vida de fatiga de los componentes, proporcionando una base para el diseño y la evaluación de estructuras sometidas a condiciones de carga cíclica.

2. Modelos de cierre de grieta: la consideración del cierre de grietas es crucial para una y rugosidad en las superficies de contacto. La modificación del rango de intensidad de tensiones se describe mediante la siguiente relación:

$$\Delta K_{\text{eff}} = U \cdot \Delta K$$

Donde U es el factor de cierre de grieta, que cuantifica cómo la geometría y las condiciones de contacto afectan la intensidad de las tensiones.

3. Modelos de elementos finitos extendidos (XFEM): los modelos de Elementos Finitos Extendidos (XFEM) facilitan la simulación de la propagación de grietas. Esto permite modelar el crecimiento de grietas sin necesidad de remallar la geometría, lo que resulta de utilidad en geometrías complejas (superficies irregulares, zonas con múltiples discontinuidades, entre otras), y bajo condiciones de carga variables. A través de XFEM, se pueden capturar de manera más efectiva los cambios en el campo de tensiones alrededor de las grietas, facilitando un análisis más detallado y realista.

La propagación de grietas está influenciada por una variedad de factores:

1. Gradiente de tensiones: el gradiente de tensiones cercano a la superficie es un factor determinante en la tasa de propagación de la grieta. A medida que la grieta se aleja de la zona de contacto, es común observar una disminución en la tasa de crecimiento, lo que sugiere que el entorno mecánico es relevante en la dinámica de la grieta.

2. Microestructura del material: las características microestructurales, como los límites de grano y la presencia de inclusiones, afectan la dirección y velocidad de propagación de la grieta. Estas heterogeneidades pueden actuar como concentradores de tensiones, favoreciendo la nucleación y el crecimiento de grietas en sus proximidades.

3. Ambiente: los factores ambientales, como la corrosión y la exposición a agentes agresivos, pueden acelerar la propagación de grietas. Por el contrario, la presencia de lubricantes puede modificar las condiciones de contacto y reducir la fricción, lo que puede tener un efecto positivo en la durabilidad del componente.

4. Carga multiaxial: las condiciones de carga multiaxial complican la predicción de la propagación de grietas, requiriendo el uso de criterios de fallo multiaxiales para obtener estimaciones de la vida útil del material. La interacción entre diferentes componentes de carga puede llevar a respuestas que deben ser consideradas en el análisis.

G. RESUMEN

En este capítulo se analizan los principales criterios utilizados para predecir la iniciación de grietas bajo condiciones de carga multiaxial. Se explican los modelos de Fatemi-Socie (FS) y Smith-Watson-Topper (SWT), los cuales permiten evaluar la severidad del daño considerando la deformación cíclica y la tensión máxima normal en el plano crítico. Estos enfoques son fundamentales para estimar la vida a la fatiga en contextos donde las condiciones de carga no se distribuyen de manera uniaxial.

Se presentan, además, técnicas de promediado que permiten estimar de forma más robusta la localización del daño, mejorando la precisión del análisis. El capítulo finaliza con la revisión de modelos como Kitagawa-Takahashi y El Haddad, que integran la transición entre grietas cortas y largas, y su relación con la resistencia a la fatiga. Estas herramientas permiten establecer conexiones entre resultados experimentales, simulaciones numéricas y comportamiento real de materiales sometidos a ciclos de carga complejos.

Modelamiento computacional de la fatiga por ludimiento

A. *MODELOS NUMÉRICOS*

El uso de modelos numéricos es fundamental para comprender el fenómeno de la fatiga por ludimiento, ya que permite simular y predecir el comportamiento de materiales bajo condiciones de carga cíclica. Entre los enfoques más comunes, el método de elementos finitos se destaca por su capacidad para resolver problemas complejos de mecánica estructural. Este método divide el dominio en elementos finitos interconectados, facilitando el análisis de tensiones y deformaciones a lo largo de la estructura (como se mencionó en el capítulo 2). Al aplicar cargas cíclicas, el FEM permite evaluar cómo se distribuyen las tensiones en la zona de contacto, lo que permite entender la nucleación y propagación de fisuras.

Las Simulaciones de Dinámica Molecular (MD) ofrecen un enfoque complementario al permitir el estudio de interacciones a nivel atómico. A través de la simulación del movimiento de átomos y moléculas, se puede observar cómo las cargas externas afectan la estructura a escalas nanométricas. Este nivel de detalle es útil para identificar mecanismos de fallo que podrían no ser evidentes en simulaciones macroscópicas. Al integrar datos de MD con modelos de FEM, se pueden obtener predicciones mejores sobre el comportamiento friccional y la vida útil de los materiales.

Además, los modelos numéricos se enriquecen con algoritmos de contacto que simulan interacciones entre superficies rugosas. Estos algoritmos consideran factores como el coeficiente de fricción, la presión de contacto y la deformación elástica. Al modelar el contacto, es posible predecir no solo el desgaste, sino también el desarrollo de fisuras bajo condiciones de fricción.

1) *Método de elementos finitos (FEM)*: El FEM es una herramienta computacional ampliamente utilizada para simular el comportamiento mecánico de materiales sometidos a cargas cíclicas, como las que se presentan en el fenómeno de fatiga por ludimiento. Este método se basa en la discretización del dominio de la estructura en elementos más simples, que pueden ser de forma triangular, cuadrada, tetraédrica, entre otros. Esta discretización permite que las ecuaciones que rigen el comportamiento mecánico se resuelvan de manera eficiente.

Al dividir el dominio en elementos finitos, se obtiene un sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del material bajo condiciones específicas. Cada elemento se caracteriza por un conjunto de propiedades mecánicas, como el módulo de elasticidad, la densidad y el coeficiente de Poisson, que son fundamentales para determinar la deformación y la distribución de tensiones en la estructura. Esta representación facilita el análisis de áreas críticas, donde es más probable que ocurran nucleaciones de fisuras debido al esduerzo cíclico.

En la Tabla I, se presentan algunos de los parámetros fundamentales utilizados en el análisis por el Método de los Elementos Finitos (FEM) para el estudio de la fatiga por ludimiento. Los parámetros incluyen el Módulo de Elasticidad, que mide la resistencia del material, el Coeficiente de Poisson, que indica la relación entre las deformaciones. También se considera la Carga Cíclica, que corresponde a la fuerza aplicada repetidamente en el análisis y el Número de Elementos, que representa la cantidad de elementos en la malla FEM.

TABLA I.
EJEMPLO DE ALGUNOS PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS FEM PARA EL ESTUDIO DE FATIGA POR LUDIMIENTO

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
Módulo de Elasticidad	Resistencia del material a la deformación	GPa	200
Coefficiente de Poisson	Relación entre deformaciones	-	0.3
Carga Cíclica	Fuerza aplicada repetidamente	N	500
Número de Elementos	Cantidad de elementos en la malla	-	10.000

El proceso de modelado mediante FEM se puede describir en varias etapas, cada una fundamental para asegurar la precisión y efectividad del análisis:

- **Definición del modelo geométrico:** En esta etapa inicial, se crea una representación digital detallada de la estructura que se desea analizar. Esto implica utilizar software de diseño asistido por computadora (CAD) para desarrollar una geometría que represente con exactitud la forma y dimensiones del objeto en estudio. Es esencial que el modelo geométrico sea lo más fiel posible al objeto real, ya que cualquier inexactitud podría influir negativamente en los resultados del análisis.
- **Discretización:** Una vez que se ha definido el modelo geométrico, se procede a discretizar la geometría, lo que implica dividirla en un conjunto de elementos finitos. Cada elemento es una pequeña parte del modelo que puede ser analizada de forma independiente. La calidad de la discretización es crucial; elementos más pequeños pueden proporcionar una mejor resolución y precisión en los resultados, aunque también aumentan el costo computacional.

Por ejemplo, al analizar el esfuerzo a tracción superficial máximo de un experimento de fatiga por ludimiento, se puede observar el comportamiento presentado en la Figura 3.1a, donde a medida que disminuye el tamaño de elemento, se reduce el error porcentual del esfuerzo con respecto a su valor experimental. Sin embargo, como muestra la Figura 3.1b, donde se evalúa el tiempo de simulación respecto al tamaño de elemento, se evidencia un aumento exponencial en el consumo computacional al reducir el tamaño de malla.

Paradójicamente, al utilizar un mallado extremadamente fino de $2 \mu\text{m}$, se observa un incremento en el error, posiblemente debido a concentradores de esfuerzo artificiales generados por la simulación. Esto demuestra que el menor tamaño de malla no siempre produce los mejores resultados, a pesar de su mayor costo computacio-

nal. Adicionalmente, la forma y el tipo de los elementos (triangulares, cuadriláteros, tetraédricos, etc.) se eligen en función de la geometría y los requisitos del análisis.

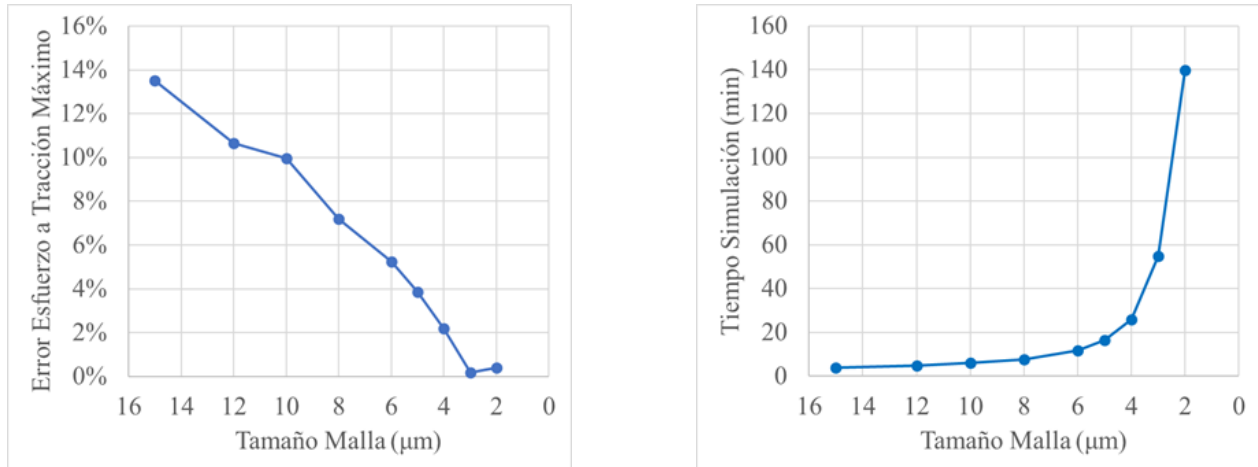


Figura 3.1. Gráficas de error de esfuerzo a tracción máximo (a) y tiempo de simulación (b) vs tamaño de malla.

- **Asignación de propiedades materiales:** En esta etapa, se definen las propiedades mecánicas de cada elemento. Esto incluye parámetros fundamentales como el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y la densidad, entre otros. Estas propiedades son vitales para simular el comportamiento físico de los materiales bajo diferentes condiciones de carga. La correcta asignación de estas propiedades garantiza que el modelo refleje de manera precisa las características del material real.
- **Aplicación de condiciones de contorno:** Se establecen las restricciones y cargas aplicadas al modelo en esta fase. Las condiciones de contorno son esenciales para simular el entorno real del objeto analizado, incluyendo fijaciones, apoyos, y cargas externas. Esto asegura que el análisis considere las interacciones del objeto con su entorno y simule con precisión cómo responde a diferentes condiciones operativas.
- **Resolución:** En esta etapa, se utiliza un software de análisis especializado para resolver el sistema de ecuaciones resultante de la discretización. Este software aplica métodos numéricos para calcular las tensiones y deformaciones en cada uno de los elementos finitos. La resolución puede requerir un considerable poder computacional, especialmente para modelos complejos con una gran cantidad de elementos.

- **Post-procesamiento:** Finalmente, en la etapa de post-procesamiento, se analizan los resultados obtenidos del análisis. Esto incluye la visualización de la distribución de tensiones y deformaciones a través de herramientas gráficas que permiten identificar áreas críticas donde pueden ocurrir fallos. También se pueden realizar comparaciones con datos experimentales para validar el modelo. En esta fase, los ingenieros pueden tomar decisiones informadas sobre modificaciones en el diseño o recomendaciones para mejorar la resistencia y durabilidad del objeto analizado.

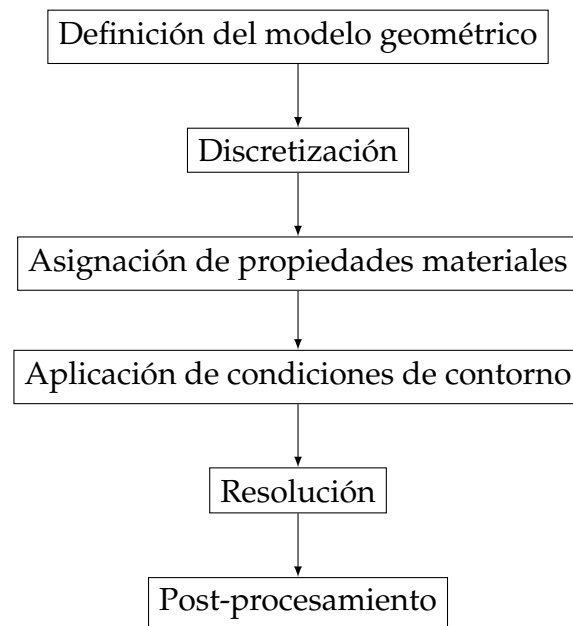


Figura 3.2. Diagrama de proceso del método de elementos finitos

A través de este enfoque representado en la Figura 3.2, el FEM permite evaluar de manera efectiva el comportamiento de materiales bajo condiciones de carga cíclica, proporcionando información valiosa sobre la vida útil de los componentes y la evolución de la fatiga por ludimiento.

2) *Simulaciones de dinámica molecular*: Las simulaciones de dinámica molecular son una herramienta computacional utilizada para estudiar las interacciones a nivel atómico. Este enfoque permite modelar el comportamiento de materiales bajo diversas condiciones, incluyendo el esfuerzo mecánico, permitiendo comprender cómo los átomos interactúan y se organizan en estructuras complejas. En el contexto de la fatiga por ludimiento, las simulaciones MD permiten analizar el proceso de nucleación de grietas en escalas na-

nométricas, proporcionando información valiosa sobre la mecánica de la ruptura a nivel atómico.

El proceso de simulación MD se basa en la resolución de las ecuaciones de movimiento de Newton para cada átomo en el sistema, lo que permite predecir su trayectoria en el tiempo. A través de esta metodología, se pueden estudiar fenómenos como la deformación plástica, la propagación de grietas y la respuesta de materiales bajo condiciones de carga cíclica. A medida que los átomos se someten a tensiones, las simulaciones pueden revelar cómo se producen cambios en la estructura atómica y cómo estos cambios influyen en la formación de defectos y grietas. Un ejemplo de esto, se puede observar en la Tabla II, donde se especifica el modelo de potencial atómico empleado, que es el modelo Lennard-Jones, el cual describe las interacciones entre los átomos del sistema. La simulación se lleva a cabo a una temperatura de 300 K y tiene una duración total de 100 nanosegundos, lo que permite observar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo.

TABLA II.
EJEMPLO DE ALGUNOS PARÁMETROS UTILIZADOS EN LAS SIMULACIONES DE DINÁMICA MOLECULAR PARA EL ESTUDIO DE FATIGA POR LUDIMIENTO

Parámetro	Descripción	Valor
Potencial atómico	Modelo utilizado para describir interacciones atómicas	Lennard-Jones
Temperatura	Condición de operación durante la simulación	300 K
Tiempo de simulación	Duración total de la simulación	100 ns
Número de átomos	Cantidad total de átomos en el sistema	10.000
Intervalo de tiempo	Paso temporal para la integración de las ecuaciones	1 fs

El proceso de simulación en dinámica molecular se lleva a cabo en varias etapas:

- **Construcción del modelo atómico:** Se crea un modelo inicial que representa la disposición de los átomos en el material.
- **Selección del potencial atómico:** Se elige un modelo de potencial que describa adecuadamente las interacciones entre los átomos.
- **Equilibración:** Se llevan a cabo simulaciones iniciales para equilibrar el sistema en condiciones de temperatura y presión deseadas.
- **Aplicación de esfuerzo:** Se aplica una carga mecánica al sistema, simulando condiciones de esfuerzo.

- Simulación de producción: Se ejecuta la simulación principal para estudiar la evolución del sistema bajo condiciones de esfuerzo.
- Análisis de resultados: Se analizan las trayectorias atómicas y las propiedades del material, identificando la nucleación y propagación de grietas.

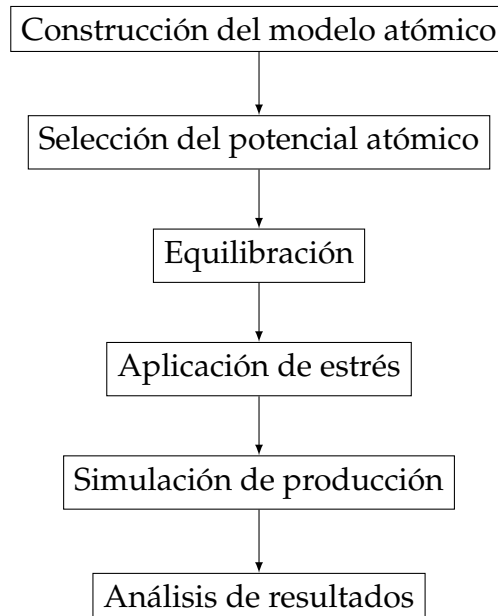


Figura 3.3. Diagrama de proceso de simulaciones de dinámica molecular

A través de este enfoque representado en la Figura 3.3, las simulaciones de dinámica molecular proporcionan una comprensión del comportamiento atómico de los materiales bajo estrés, facilitando la identificación de mecanismos de fallo y la evaluación de la fatiga por ludimiento en escalas nanométricas.

B. MODELADO DEL CONTACTO ENTRE SUPERFICIES

El modelado del contacto entre superficies ha experimentado avances en los últimos años, impulsados por el desarrollo de algoritmos que consideran factores críticos como la rugosidad, el coeficiente de fricción y las condiciones de carga.

Los modelos modernos de contacto utilizan enfoques matemáticos y computacionales para simular las interacciones complejas que ocurren en la interface de dos superficies. La rugosidad de las superficies, que puede variar considerablemente, se modela a través de

representaciones matemáticas que describen las características geométricas de las irregularidades en las superficies. Estas representaciones pueden incluir modelos estocásticos, donde la rugosidad se considera como un fenómeno aleatorio, o modelos deterministas que describen patrones específicos.

El coeficiente de fricción también es un parámetro que influye significativamente en el comportamiento del contacto entre superficies. Su variabilidad es crucial, ya que las condiciones de carga, la velocidad de deslizamiento y la temperatura pueden afectar drásticamente este coeficiente. Los modelos actuales permiten que este coeficiente sea variable y dependiente de las condiciones de carga, lo que proporciona una mayor precisión en la simulación de situaciones del mundo real, en contraste con los enfoques más simplificados que asumen un coeficiente constante. Esta capacidad de modelar la fricción de manera dinámica mejora la validez de las simulaciones al reflejar más fielmente las condiciones operativas a las que están sometidos los componentes mecánicos.

Los algoritmos utilizados en estos modelos incorporan ecuaciones complejas que relacionan la fricción con la deformación plástica, la temperatura, la presencia de contaminantes y otros factores ambientales. Por ejemplo, la deformación plástica puede incrementar el área de contacto efectivo entre las superficies, lo que a su vez puede alterar el coeficiente de fricción. Además, las variaciones de temperatura durante el funcionamiento pueden influir en la viscosidad de los lubricantes utilizados y, por ende, en el comportamiento de la fricción. Este enfoque multifacético permite así un análisis más completo del proceso de desgaste y la interacción de los materiales involucrados.

En la Tabla III, se observan ejemplos de algunos parámetros utilizados en el modelado de contacto, los cuales ilustran la diversidad de factores que se tienen en cuenta en estas simulaciones. Estos parámetros no solo ayudan a establecer un marco teórico sólido, sino que también guían la experimentación y la validación de los modelos, asegurando que sean capaces de predecir con precisión el rendimiento de los materiales en condiciones reales de operación.

TABLA III.
EJEMPLO DE ALGUNOS PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL MODELADO DEL CONTACTO ENTRE SUPERFICIES

Parámetro	Descripción	Valor
Rugosidad	Descripción geométrica de la superficie	R_a, R_z
Coefficiente de fricción	Relación entre la fuerza de fricción y la carga normal	Variable
Carga normal	Fuerza aplicada perpendicularmente a las superficies	F_n
Carga tangencial	Fuerza aplicada paralelamente a las superficies	F_t

El modelado del contacto también abarca la evolución del daño en las superficies. Los algoritmos avanzados permiten simular la propagación de fisuras y la acumulación de desgaste a lo largo del tiempo.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que ilustra el proceso de modelado del contacto entre superficies, destacando las etapas clave involucradas en la simulación (ver Figura 3.4):

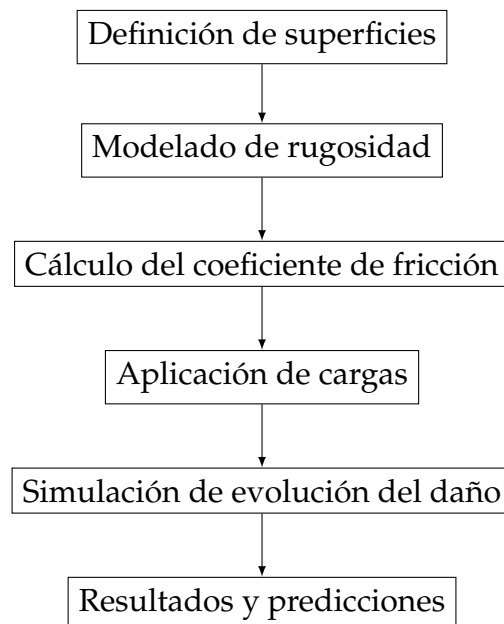


Figura 3.4. Diagrama de proceso de modelado del contacto entre superficies

Mediante estos enfoques computacionales, el modelado del contacto entre superficies no solo mejora la comprensión del comportamiento friccional, sino que también permite la optimización del diseño de materiales y componentes que operan bajo condiciones de contacto, contribuyendo así a la mitigación de fallos por fatiga.

1) *Algoritmos de contactos* : Para modelar interacciones entre superficies en contacto, se emplean algoritmos que facilitan el cálculo de fuerzas de contacto y deslizamiento. Dos de los enfoques más destacados son el método de penalización y el método de Lagrange.

El método de penalización es un enfoque que introduce un término de penalización en las ecuaciones de movimiento para restringir el deslizamiento entre las superficies en contacto. Este método utiliza un factor de penalización que simula la rigidez de la interfaz, lo que permite calcular la fuerza de contacto de manera efectiva. A medida que las superficies se acercan, la fuerza de penalización aumenta, impidiendo el deslizamiento y asegurando que las superficies mantengan contacto hasta que se alcance un cierto límite de carga.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo representado en la Figura 3.5 que resume el proceso de modelado de interacciones entre superficies utilizando estos métodos:

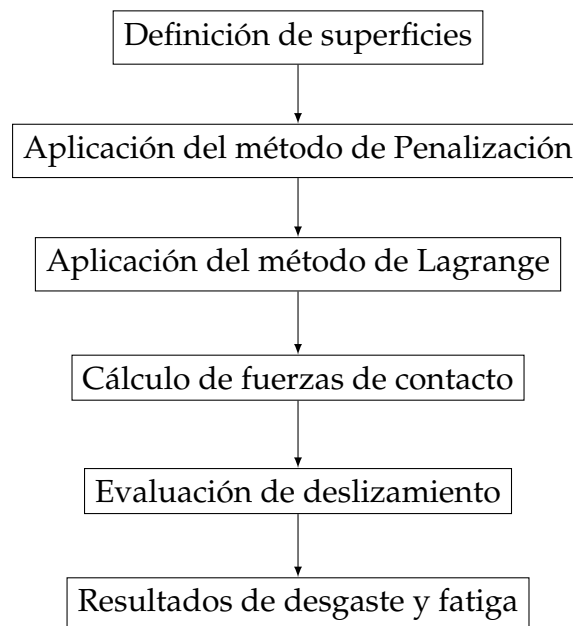


Figura 3.5. Diagrama de proceso de modelado de interacciones entre superficies

Por otro lado, el método de Lagrange utiliza multiplicadores de Lagrange para incorporar restricciones en el sistema. Este enfoque permite resolver problemas de optimización donde las fuerzas de contacto y el deslizamiento son condiciones críticas. Al aplicar este método, se obtienen ecuaciones que relacionan las fuerzas internas y externas, lo que

proporciona un marco robusto para el análisis de la interacción entre las superficies. En la Tabla IV, se puede visualizar una comparación de descripción de ambos métodos.

Ambos métodos son necesarios para la simulación del comportamiento mecánico en condiciones de contacto, y su correcta implementación permite predecir el desgaste y la fatiga de materiales.

TABLA IV.
COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA MODELAR INTERACCIONES ENTRE SUPERFICIES

Método	Descripción	Aplicación
Penalización	Introduce un término de penalización para evitar el deslizamiento.	Fuerzas de contacto.
Lagrange	Utiliza multiplicadores para incorporar restricciones en el sistema.	Optimización de fuerzas de contacto.

Estos métodos no solo son útiles para modelar el comportamiento de las superficies, sino que también permiten optimizar el rendimiento y la durabilidad de los componentes mecánicos, contribuyendo a la prevención de fallos por fatiga y al aumento de la vida útil de los materiales en diversas aplicaciones industriales.

C. OPTIMIZACIÓN Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

Las técnicas de aprendizaje automático (ML) han cambiado el paradigma del análisis de datos en diversas disciplinas, incluida la ingeniería de materiales. Las técnicas son importantes y robustas para identificar patrones en grandes volúmenes de datos generados por simulaciones, lo que permite optimizar las propiedades de los materiales y predecir su rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.

Uno de los enfoques más comunes en este ámbito es el uso de modelos de regresión, que permiten establecer relaciones entre variables de entrada y salida. Estos modelos son especialmente útiles para predecir propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción o la dureza, a partir de parámetros de diseño y condiciones de carga. Mediante el ajuste de parámetros, se pueden obtener modelos que minimizan el error de predicción, mejorando la precisión de los resultados.

En la Figura 3.6, se ilustra una red neuronal totalmente conectada diseñada para predecir la vida útil de componentes sometidos a fatiga por ludimiento. La red consta de tres capas principales: la capa de entrada, la capa oculta y la capa de salida. La capa de entrada está compuesta por cuatro neuronas que representan parámetros críticos en el análisis de fatiga, tales como: la carga aplicada, que refleja la magnitud de la carga ejercida sobre el componente; la frecuencia de carga, que indica la periodicidad de la aplicación de la carga; el material, que se refiere al tipo de material del componente; y el estado de superficie, que evalúa la condición superficial del componente. La capa oculta contiene cinco neuronas responsables de aprender las relaciones complejas y no lineales entre las variables de entrada, permitiendo a la red identificar patrones en los datos para predecir el comportamiento del material. Finalmente, la capa de salida presenta una única neurona que proporciona la vida útil estimada del componente, un valor fundamental para la toma de decisiones en aplicaciones de ingeniería. Esta red neuronal se configura como una herramienta poderosa para la predicción de la fatiga por ludimiento, optimizando el diseño y la selección de materiales en aplicaciones industriales, y mejorando su precisión a medida que se alimenta con datos de pruebas y simulaciones.

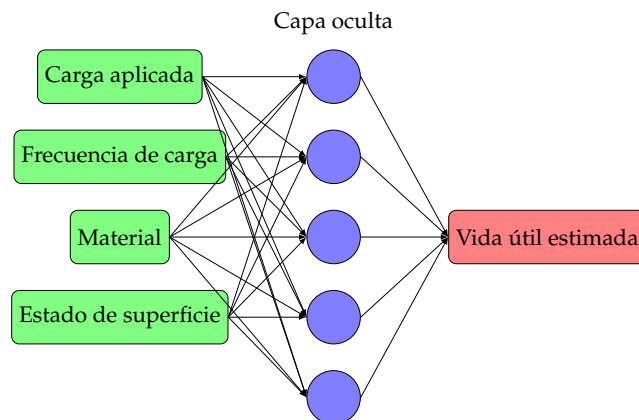


Figura 3.6. Representación gráfica de una red

Las redes neuronales se han consolidado como herramientas efectivas para abordar problemas complejos con relaciones no lineales. Este enfoque resulta especialmente útil en la predicción del comportamiento de los materiales bajo diversas condiciones de carga, ya que las redes neuronales pueden aprender de los datos obtenidos en simulaciones y generalizar patrones de comportamiento que son difíciles de identificar mediante méto-

dos tradicionales. Además, algunas técnicas de aprendizaje automático también presentan características no lineales, a diferencia de los modelos convencionales (ver Tabla V).

TABLA V.
COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE MATERIALES

Técnica	Descripción	Aplicación
Regresión	Establece relaciones lineales entre variables.	Predicción de propiedades mecánicas.
Redes neuronales	Modela relaciones no lineales complejas.	Predicción de rendimiento bajo cargas variables.

El uso de estas técnicas permite un enfoque más eficiente y preciso para el diseño y análisis de materiales, facilitando la identificación de combinaciones óptimas de propiedades que cumplan con los requisitos específicos de aplicación. A continuación, se presenta un diagrama de flujo representado en la Figura 3.7 que resume el proceso de aplicación de aprendizaje automático en el análisis de materiales.

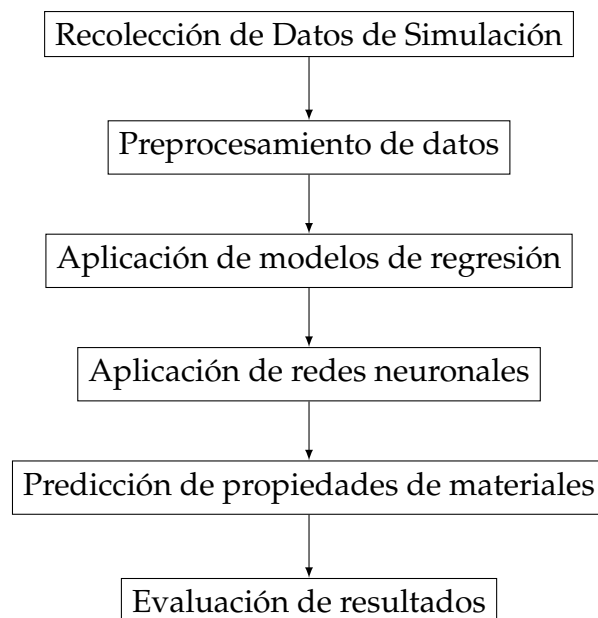


Figura 3.7. Diagrama de proceso de aprendizaje automático en análisis de materiales

D. ANÁLISIS MULTIESCALA

El análisis multiescala es una metodología en la investigación de materiales, que permite integrar diferentes niveles de análisis, desde el comportamiento atómico hasta la respuesta macroscópica del material. Esta técnica es útil en el estudio de la fatiga por ludimiento, ya que proporciona detalles de los mecanismos de fallo que pueden surgir en condiciones de carga cíclica.

A través de la utilización de modelos a diferentes escalas, es posible captar las interacciones y fenómenos que ocurren en cada nivel. Por ejemplo, las simulaciones a nivel atómico pueden revelar cómo los átomos individuales se comportan bajo esfuerzo, mientras que los modelos a escala mesoscópica pueden describir la formación de microfisuras y la evolución del daño.

TABLA VI.
NIVELES DE ANÁLISIS EN EL ENFOQUE MULTIESCALA

Escala	Descripción	Técnicas Utilizadas
Atómica	Estudio de interacciones entre átomos y moléculas.	Dinámica Molecular, Métodos Cuánticos
Mesoscópica	Análisis de microestructuras y defectos.	Elementos Finitos, Modelos Continuos
Macroscópica	Comportamiento general del material bajo cargas.	Modelos Estructurales, Análisis de Tensiones

El análisis multiescala también permite la retroalimentación entre las diferentes escalas (ver Tabla VI), donde los resultados obtenidos en un nivel pueden influir en los modelos de otros niveles. Por ejemplo, los parámetros obtenidos a partir de simulaciones atómicas pueden ser utilizados para ajustar los modelos mesoscópicos, mejorando así la precisión de las predicciones macroscópicas.

E. ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL Y ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN COMPONENTES MECÁNICOS BAJO CONDICIONES DE CARGA

A través de la simulación de ciclos de carga y el análisis de acumulación de daño, los modelos computacionales permiten predecir el comportamiento de los materiales y optimizar el diseño para mejorar la durabilidad.

La estimación de la vida útil comienza con la simulación de condiciones de carga realistas, que pueden incluir cargas cíclicas, torsión y presión. Estos ciclos se aplican a los modelos computacionales, que pueden ser creados utilizando métodos como el de elementos finitos o dinámicas moleculares. A medida que se aplican las cargas, se analiza la respuesta del material, identificando áreas de concentración de tensiones y potenciales puntos de fallo.

La acumulación de daño se puede modelar utilizando enfoques como la regla de Miner, que establece que la vida útil se reduce a medida que se acumulan ciclos de carga. Este enfoque permite identificar cómo diferentes magnitudes y frecuencias de carga afectan la durabilidad del componente.

La confiabilidad de un componente mecánico es un parámetro crítico que define su capacidad para operar de manera efectiva durante un tiempo especificado y bajo condiciones predefinidas. Esta capacidad no solo depende de la calidad del diseño y de los materiales utilizados, sino también de la forma en que el componente interactúa con su entorno. Por lo tanto, la confiabilidad se puede evaluar considerando factores como las condiciones de carga, las temperaturas operativas y la presencia de agentes corrosivos. Un componente con alta confiabilidad debe ser capaz de resistir estas condiciones sin comprometer su funcionamiento.

Los fallos en componentes mecánicos pueden clasificarse en diversas categorías, cada una con causas y consecuencias específicas. Por ejemplo, el desgaste es un tipo de fallo que resulta de la fricción y el contacto continuo entre superficies. Este fenómeno puede llevar a una disminución del rendimiento y, eventualmente, a la falla del componente si no se gestiona adecuadamente. Del mismo modo, la fatiga, que se produce por la aplicación repetida de cargas cíclicas, puede acumular microdaños en el material, llevando a la formación de fisuras que podrían resultar en un fallo catastrófico.

La corrosión es otro factor significativo que afecta la confiabilidad de los componentes mecánicos. Este proceso químico puede debilitar la estructura del material, disminuyendo su resistencia a cargas externas. La comprensión de los mecanismos de corrosión y el uso de recubrimientos protectores son esenciales para prolongar la vida útil de componentes expuestos a ambientes agresivos.

La sobrecarga, que ocurre cuando un componente se somete a fuerzas que superan su capacidad de diseño, también es un aspecto crucial a considerar. Este tipo de fallo

puede resultar de un diseño inadecuado, selección incorrecta de materiales o condiciones operativas imprevistas. La monitorización constante de las condiciones de operación y el mantenimiento preventivo son medidas importantes para evitar sobrecargas que puedan comprometer la integridad del componente.

Los fallos pueden clasificarse en varias categorías, incluyendo:

- **Fallo por fatiga:** ocurre debido a la aplicación repetida de cargas cíclicas que llevan a la acumulación de daño en el material. Este tipo de fallo es crítico en componentes que experimentan variaciones de carga a lo largo del tiempo, como ejes, engranajes y estructuras de soporte.
- **Fallo por sobrecarga:** se produce cuando un componente es sometido a fuerzas que superan sus capacidades de diseño. Esto puede ser el resultado de errores en la selección del material, condiciones operativas no anticipadas o errores en el proceso de fabricación.
- **Fallo por corrosión:** la corrosión puede debilitar significativamente la integridad de los materiales, especialmente en entornos agresivos. Los modelos computacionales pueden simular cómo la corrosión afecta la vida útil de un componente, ayudando a los ingenieros a diseñar barreras de protección adecuadas.
- **Fallo por desgaste:** este tipo de fallo se produce por la interacción continua entre superficies en contacto, lo que lleva a la pérdida de material. Los modelos que analizan el comportamiento friccional son esenciales para predecir el desgaste y su impacto en la vida útil de los componentes.

La confiabilidad de un sistema puede evaluarse a través de análisis estadísticos que consideran la distribución de tiempos de fallo y el comportamiento bajo diferentes condiciones de carga. La metodología de análisis de confiabilidad se basa en la recopilación de datos de fallos históricos y en el desarrollo de modelos que permitan predecir la probabilidad de fallo en el futuro. Un aspecto crítico en la evaluación de la confiabilidad es el análisis de los modos de fallo. Este enfoque sistemático identifica posibles modos de fallo en un sistema y evalúa sus efectos y causas. La implementación del Análisis de Modos y Efectos de Fallo (FMEA) permite a los ingenieros priorizar esfuerzos de mitigación y mejorar el diseño y la fabricación de componentes.

Para integrar la confiabilidad en el diseño, se emplean enfoques como el Análisis de Vida Útil (LCA) y el Análisis de Confiabilidad.

La Figura 3.8 ilustra de manera típica la relación inversa entre el fallo y la confiabilidad: a medida que aumenta el número de fallos, la confiabilidad disminuye. Esta relación destaca la importancia de establecer criterios de revisión como parte de un enfoque de mantenimiento predictivo.

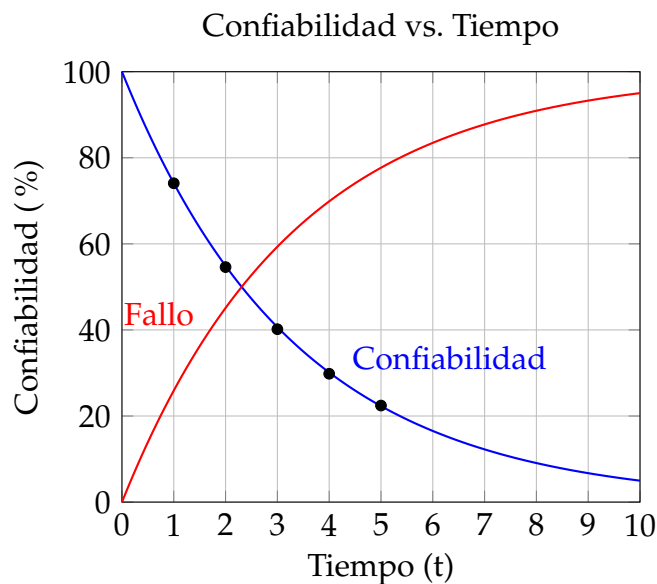


Figura 3.8. Confiabilidad vs fallo

Estos enfoques permiten modelar la vida útil de un componente no solo en términos de resistencia a fallos, sino también en relación con su rendimiento en condiciones operativas específicas.

Por último, la interacción entre modelos computacionales y análisis de confiabilidad proporciona un enfoque para la predicción de fallos. Los modelos pueden simular el comportamiento de los materiales bajo diferentes condiciones de carga y ambientales, permitiendo a los ingenieros ajustar el diseño para maximizar la vida útil y minimizar el riesgo de fallo.

F. RESUMEN

Este capítulo está enfocado en el uso de herramientas computacionales para analizar la fatiga por ludimiento desde un enfoque numérico. Se presenta el método de elementos finitos (FEM) como la técnica principal para resolver los campos de esfuerzo y deformación en componentes con contacto superficial. La construcción del modelo incluye la definición de materiales, condiciones de frontera, contacto y malla, con énfasis en aspectos que afectan la estabilidad y la precisión del análisis.

Adicionalmente, se incluyen técnicas como dinámica molecular, análisis multiescala y aprendizaje automático, que aportan nuevas perspectivas al estudio del daño por fatiga. Estas metodologías permiten ampliar el rango de aplicación de los modelos, incluyendo el análisis de materiales compuestos, superficies tratadas y componentes sometidos a condiciones ambientales variables. El capítulo sienta las bases para comprender la importancia de la simulación en la predicción del comportamiento mecánico y la integración de nuevas herramientas de análisis computacional.

Resultados de investigación

En el marco del proyecto denominado *Accurate Simulations of Fretting Fatigue Frictional Behavior* de la Universidad Tecnológica de Pereira, el presente capítulo presenta los resultados obtenidos en la investigación sobre la integridad estructural de componentes sometidos a cargas cíclicas, con un enfoque particular en la fatiga por ludimiento. Se ha observado que este fenómeno se produce cuando dos superficies en contacto experimentan deslizamientos relativos de pequeña amplitud bajo una fuerza normal, lo que puede reducir considerablemente la vida útil de los componentes. Durante el desarrollo de esta investigación, se han explorado diversos enfoques numéricos para modelar la fatiga por ludimiento. Inicialmente, se emplearon modelos con un coeficiente de fricción constante, lo que limitaba la precisión en la representación del fenómeno. No obstante, al incorporar un coeficiente de fricción variable, los resultados obtenidos han sido más representativos de la dinámica del ludimiento, ofreciendo una descripción más ajustada al comportamiento real del sistema.

Asimismo, se han analizado diferentes materiales y condiciones de operación, considerando variables tales como la presión de contacto y la frecuencia de oscilación, lo que ha permitido profundizar en la comprensión del proceso.

A. *MODELOS NUMÉRICOS*

Antes de proceder a detallar los resultados específicos obtenidos en este proyecto, es importante destacar el proceso riguroso que se siguió para asegurar la validez de los

hallazgos. El desarrollo del modelo numérico mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), junto con la implementación de los parámetros de daño críticos y las simulaciones con un coeficiente de fricción variable, ha permitido abordar de manera efectiva las complejidades inherentes al fenómeno de la fatiga por ludimiento.

Los resultados que se presentan a continuación se obtuvieron después de una extensa fase de simulación y validación experimental, con el fin de proporcionar un análisis exhaustivo del comportamiento de los materiales bajo condiciones cíclicas de contacto. Este análisis incluye tanto la comparación de diferentes configuraciones de modelado, como la influencia de variables críticas, tales como el tamaño de la malla y el tipo de elementos finitos.

A lo largo de las siguientes secciones, se describen en detalle los hallazgos clave, haciendo especial énfasis en los parámetros que determinaron la vida útil de los componentes, así como la comparación entre los métodos numéricos y experimentales. Estos resultados no solo permiten una mejor comprensión del fenómeno de la fatiga por ludimiento, sino que también aportan directrices claras para la optimización de futuras simulaciones.

B. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

El método de elementos finitos (FEM) tiene sus orígenes a mediados del siglo XX, cuando Richard Courant utilizó un enfoque basado en el método de diferencias finitas para obtener soluciones aproximadas a problemas de vibración. Este desarrollo inicial sentó las bases para la evolución del FEM, que se consolidó en la década de 1960 como un método relevante en la ingeniería. En ese momento, el FEM se comenzó a aplicar de manera sistemática para resolver problemas de diseño estructural y análisis de materiales, permitiendo abordar cálculos que, de otro modo, serían extremadamente complejos.

El FEM es un método numérico que facilita la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, los cuales son fundamentales en muchos problemas de ingeniería. Estos problemas abarcan desde la mecánica de sólidos y fluidos hasta el análisis térmico y electromagnético. A diferencia de los métodos analíticos tradicionales, que buscan soluciones exactas dividiendo el dominio en un número infinito de partes infinitesimales, el FEM discretiza el dominio en un número finito de subregiones o elementos de tamaño

controlado. Esta discretización permite obtener soluciones aproximadas que son adecuadas para aplicaciones prácticas, donde la precisión absoluta rara vez es necesaria.

Una de las grandes ventajas del FEM es su flexibilidad para adaptarse a geometrías complejas y condiciones de contorno variables. Al dividir el dominio en elementos finitos, se obtiene un control sobre la precisión del modelo, ya que aumentar el número de elementos pequeños generalmente mejora la exactitud de la solución. Sin embargo, existe un equilibrio crítico entre la precisión del modelo y los recursos computacionales. Un número excesivo de elementos puede aumentar significativamente el tiempo de cómputo sin ofrecer mejoras considerables en los resultados, lo que hace que la elección del tamaño y distribución de la malla sea una parte esencial del proceso de modelado.

Para dar validez a las temáticas, se describen a continuación los resultados obtenidos mediante el desarrollo de los siguientes artículos.

- Effect of pad rotation angle and coefficient of friction on fretting fatigue crack nucleation behavior
- Fretting fatigue crack nucleation analysis under a variable coefficient of friction
- Effect of the Uncertainty of the Friction Coefficient on fretting Fatigue Initiation Life

Las metodologías implementadas en cada estudio se presentan en las siguientes secciones:

C. CONDICIONES DE CARGA Y ZONA COHESIVA

La configuración que se estudió en esta investigación consistió en la implementación de dos indentadores cilíndricos en contacto con una probeta plana, como se ilustra en la Figura 4.1. Para llevar a cabo el análisis del sistema propuesto, se utilizó el software de elementos finitos ABAQUS. En este caso, se definieron los parámetros de nucleación de grietas utilizando el modelo de plano crítico, con énfasis en el parámetro de Fatemi-Socie (FS), que permite analizar los efectos de las cargas no proporcionales y los esfuerzos principales involucrados en la fatiga por ludimiento, resultando ideal para las condiciones de este estudio.

Se creó un par de contacto tipo superficie a superficie, definiendo la superficie de la probeta como la superficie maestra y la almohadilla como superficie esclava, configurando la formulación de deslizamiento como deslizamiento finito.

Para modelar el comportamiento del contacto, se contó con un comportamiento tangencial con formulación de multiplicador de Lagrange, manteniendo un coeficiente de fricción de Coulomb constante. Por otro lado, para definir el comportamiento normal, se aplicó el método de Lagrange aumentado con contacto duro.

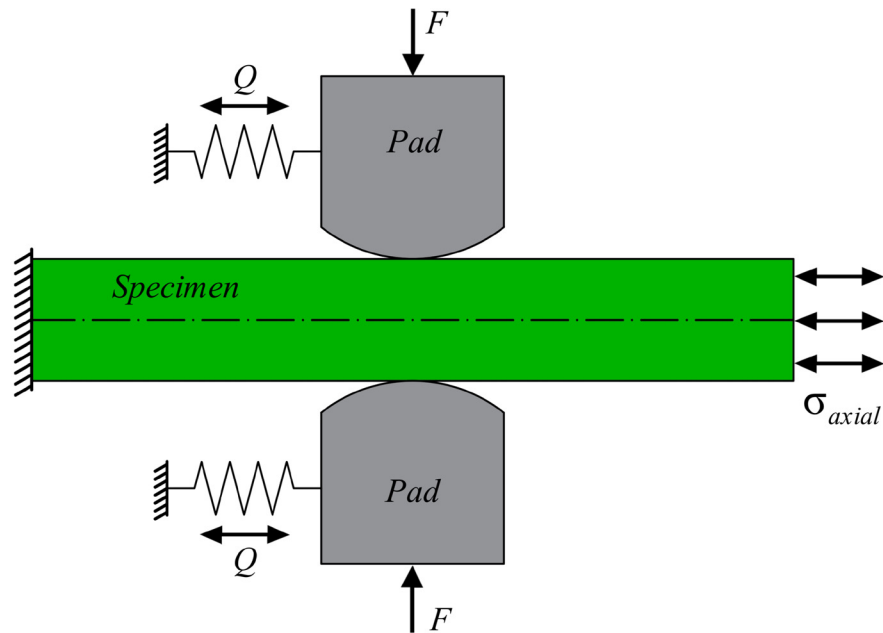


Figura 4.1. Sistema prueba de fatiga por ludimiento tipo cilindro-plano

1) *Aplicación de la zona cohesiva*: El criterio de nucleación de grieta basado en la zona cohesiva se fundamenta en una ley local de tracción y separación transferida a través de la zona. Aunque ABAQUS ofrece opciones predefinidas para la zona cohesiva, se optó por implementar un criterio personalizado mediante la subrutina UDMGINI, lo cual brindó mayor flexibilidad para la formulación de la nucleación de la grieta. Esta subrutina se aplicó a elementos enriquecidos con la técnica XFEM, permitiendo predecir con precisión tanto la ubicación como la dirección de las grietas, sin la necesidad de un remallado durante la propagación de las grietas.

Se seleccionó el parámetro de tracción-separación cuadrática como criterio, debido a su comprobada eficacia en estudios previos para predecir el daño por fatiga. En la Fi-

gura 4.2 se presenta una distribución típica del esfuerzo cortante de contacto, donde se observan los bordes de ataque y fuga, que marcan los límites de la zona de contacto.

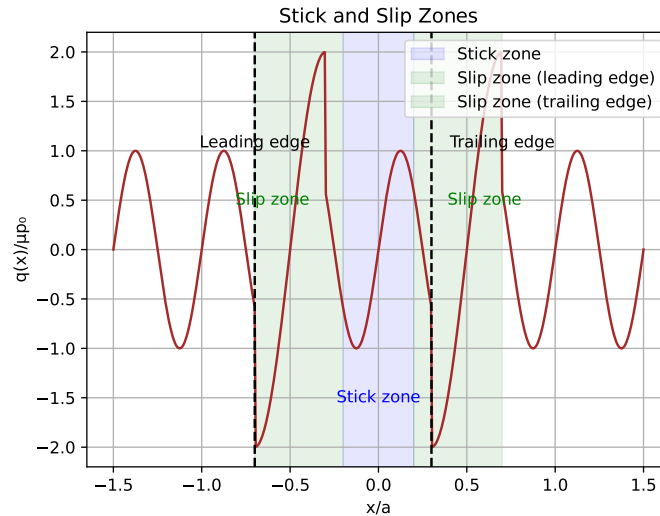


Figura 4.2. Representación zona de ataque y zona de fuga

2) *Aplicación del parámetro de FATEMI-SOCIE* : El parámetro FS fue implementado mediante un script en Python que procesa los resultados del archivo proporcionado por ABAQUS. Este script permite identificar el parámetro de daño máximo y la dirección del plano crítico a partir de los esfuerzos principales en la zona de contacto. Utilizando la transformación del círculo de Mohr, se evaluaron los esfuerzos en planos rotados en incrementos de 1° , almacenando los valores máximos obtenidos para cada ciclo de carga. Este procedimiento se realizó para asegurar la correcta identificación del plano crítico, donde ocurrirá la falla por fatiga. Los resultados obtenidos se analizaron utilizando herramientas de análisis de datos, como Excel y Python.

3) *Posprocesamiento* : Para identificar el plano crítico, se empleó el método del punto crítico, uno de los métodos más utilizados para el análisis de fallas por fatiga. Este método asume que la fractura se iniciará en la posición donde el parámetro de daño es máximo, y la dirección de la fractura estará asociada con la mayor magnitud de dicho parámetro. Aunque el método del punto crítico es adecuado para muchas aplicaciones, en algunos casos puede sobreestimar el daño en la superficie, lo que lleva a resultados inexactos. Para mitigar este efecto, se considera el uso de métodos de promediado, tales como el

método del volumen o del cuadrante, que tienden a proporcionar resultados más precisos en situaciones donde los esfuerzos son elevados.

4) *Aplicación del FEM*: Teniendo en cuenta la simetría del problema, el modelo se simplificó representando solo la mitad de la probeta y un indentador cilíndrico. El indentador tiene un radio de 50 mm y una longitud de 10 mm, mientras que la probeta se modeló con dimensiones de 40 mm x 5 mm, implementando un espesor de 4 mm para ambos elementos.

Las condiciones de frontera se definieron de acuerdo con la configuración experimental. Se aplicó una restricción de desplazamiento a lo largo del eje X en las aristas laterales de la almohadilla, y se restringió el movimiento en el eje Y, y rotación respecto al eje Z en la superficie inferior de la probeta. Para la condición de contacto, se emplearon las propiedades descritas en al principio de la sección 4.3, estableciendo, un coeficiente de fricción constante de 0.65, basado en los resultados experimentales. Para aplicar las fuerzas externas, la simulación se dividió en tres pasos:

Primer paso: se aplicó en la superficie superior de la almohadilla la carga normal de compresión hasta su valor máximo.

Segundo paso: se aplicaron el esfuerzo axial y la carga tangencial del resorte de forma simultánea. Esta última fue representada mediante un esfuerzo de reacción en el empostramiento de la probeta, la cual se calcula mediante la expresión:

$$\sigma_{reaccion} = \sigma_{axial} - \frac{Q}{bt} \quad (4.1)$$

donde Q es la carga tangencial, b es el alto de la probeta y t el espesor de la probeta.

Tercer paso: las cargas axial y tangencial se redujeron según la relación de cargas, siendo estas de 0.1 y -1, respectivamente.

Las condiciones de frontera y ciclo de carga se describen en las Figuras 4.3 y 4.4, respectivamente. El material utilizado fue aluminio 2024-T3, cuyo módulo de Young es de 72.1 GPa y su coeficiente de Poisson de 0.33.

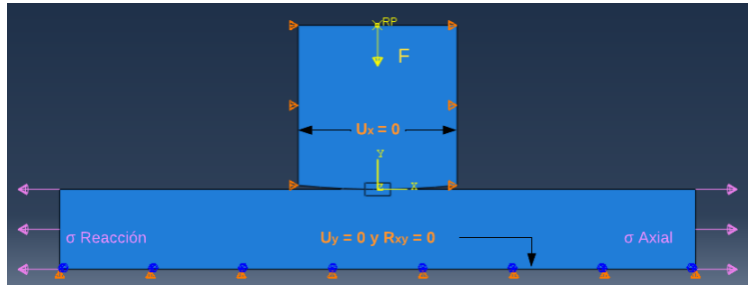


Figura 4.3. Condiciones de frontera del modelo

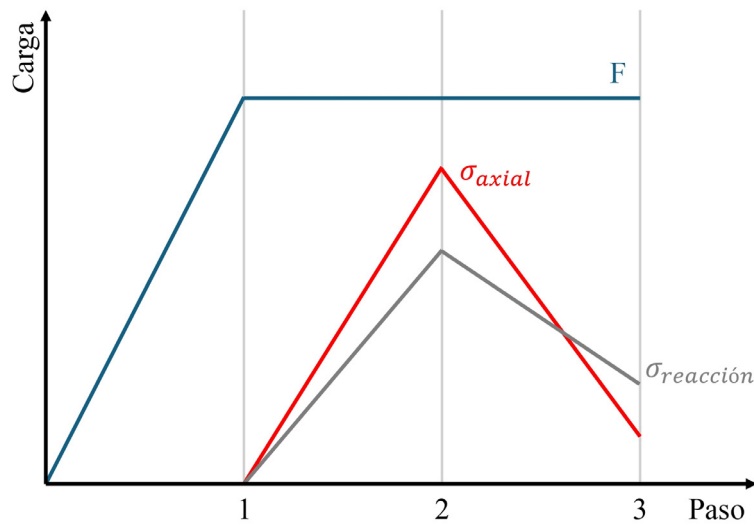


Figura 4.4. Ciclos de carga del modelo

El mallado del modelo se realizó utilizando elementos 2D tipo plane strain de integración completa, también conocidos como elementos tipo CPE4, seleccionados por su buena representación de la distribución de esfuerzos en contacto. Se emplearon elementos más pequeños en las áreas cercanas al contacto (tamaño de $5 \mu\text{m}$), donde se esperaba la mayor concentración de esfuerzos, y elementos más grandes en las zonas menos críticas. Además, se enriqueció la zona de contacto con elementos XFEM para capturar la iniciación de la fractura, utilizando la subrutina UDMGINI para implementar el criterio de zona cohesiva.

5) *Resultados*: A continuación, se presentan y analizan los resultados obtenidos del modelo de elementos finitos (FEM), evaluando su precisión en comparación con la literatura relevante:

- **Análisis del contacto:** se inició el análisis comparando los resultados de presión normalizada (donde p es la presión a lo largo del contacto y p_0 es la presión máxima) en la superficie obtenidos mediante FEM con los valores analíticos esperados bajo las condiciones especificadas.

En la Figura 4.5(a), se muestran los resultados del modelo FEM comparados con valores teóricos obtenidos de las ecuaciones de Hertz. La línea azul representa la curva teórica, mientras que la roja corresponde a los resultados obtenidos con el software ABAQUS. En $x/a = 0$, donde a es el semiancho de contacto, se observó una diferencia del 0.1025 %, y de 1.2 % cerca a los bordes del contacto, lo que indica que el modelo es capaz de predecir con precisión la distribución de presión normal.

En cuanto a los esfuerzos cortantes, la Figura 4.5(b) compara la distribución del esfuerzo cortante superficial normalizado (donde q es el esfuerzo cortante) obtenida por el modelo con los resultados analíticos de Cattaneo-Mindlin. El error máximo entre los resultados FEM y teóricos fue de 0.1023 %, presentando un comportamiento muy similar al teórico.

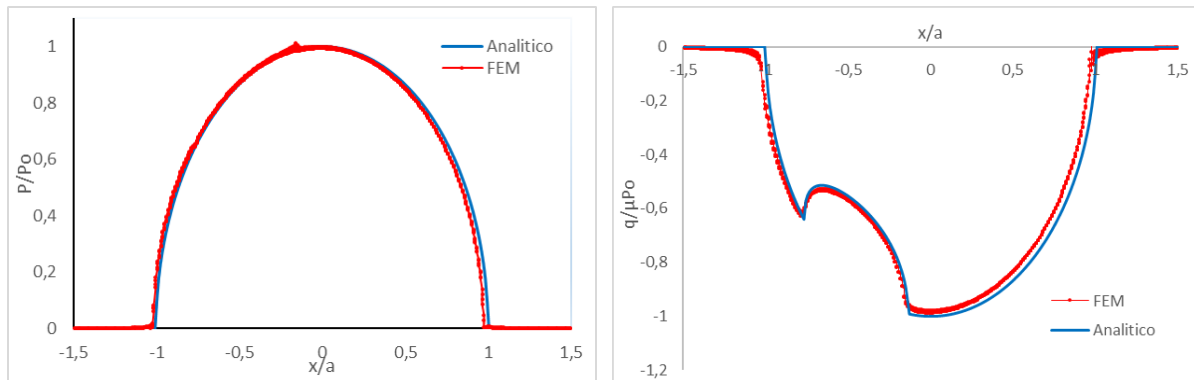


Figura 4.5. Distribución de la presión normal (a) y esfuerzo cortante (b) en la superficie de contacto: Teórico vs FEM

Los resultados obtenidos para la distribución de la presión y esfuerzo cortante superficial son consistentes con la teoría de Hertz y Cattaneo-Mindlin, mostrando una buena correlación con los estudios. Esto confirma que el modelo FEM puede capturar con precisión el comportamiento del contacto mediante simulaciones.

6) *Teoría de Hertz*: Describe como dos cuerpos elásticos entran en contacto sin fricción. Se aplica a situaciones en las que las fuerzas aplicadas no generan un deslizamiento significativo entre las superficies y supone que el contacto entre los cuerpos es elástico, es decir, que la deformación causada por el contacto es completamente reversible.

7) *Teoría de Cattaneo-Mindlin*: Extiende la teoría de Hertz para incluir los efectos de fricción en el contacto entre cuerpos elásticos. Mientras que la teoría de Hertz considera un contacto sin fricción, la teoría de Cattaneo-Mindlin toma en cuenta las fuerzas tangenciales que pueden producir deslizamiento parcial entre las superficies en contacto.

Durante esta etapa, se evaluó el efecto de 9 diferentes valores de esfuerzo axial y carga tangencial en la distribución del esfuerzo cortante superficial. En la Figura 4.6 se pueden encontrar los resultados de estas pruebas, donde aquellas pruebas en que la carga tangencial Q es mayor, se tiene una zona de deslizamiento más grande, tal y como se explica en la teoría.

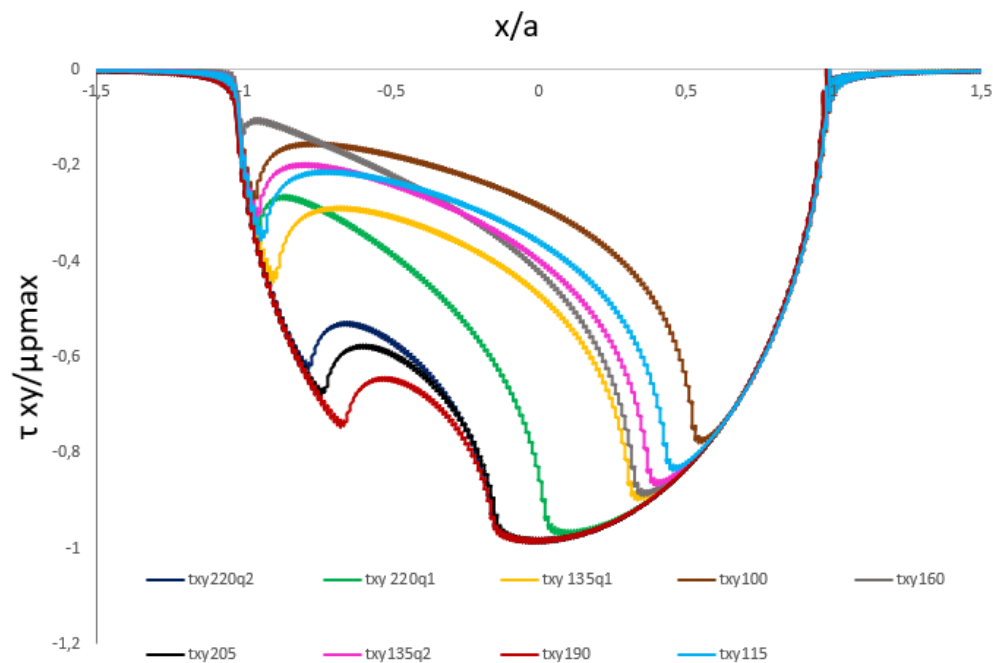


Figura 4.6. Distribución del esfuerzo cortante superficial para diferentes cargas

- **Análisis del plano crítico:** en estudios previos, la nucleación de grietas por fatiga en sistemas de contacto se ha observado, típicamente, cerca del borde de salida del contacto. Los resultados obtenidos con el modelo FEM indican que la posición donde

se encuentra el máximo valor del parámetro FS, donde se espera que ocurra la iniciación de la grieta, se localiza entre $x/a = 0.96$ y 0.98 para los diferentes valores de esfuerzo axial y carga tangencial analizados, es decir, en la posición predicha.

La Figura 4.7 ilustra la distribución del parámetro de daño a lo largo de la superficie de contacto para las 9 pruebas analizadas. Se observa claramente un valor máximo cerca del borde de salida del contacto ($x/a = 1$). Estas curvas permiten caracterizar el comportamiento del contacto, puesto que se pueden identificar las zonas donde ocurre deslizamiento. Adicionalmente, se evidencia la correlación entre la magnitud de las cargas aplicadas y el daño superficial generado: las curvas que presentan valores más elevados del parámetro de daño corresponden a los casos donde se aplicaron mayores esfuerzos axiales y cargas tangenciales.

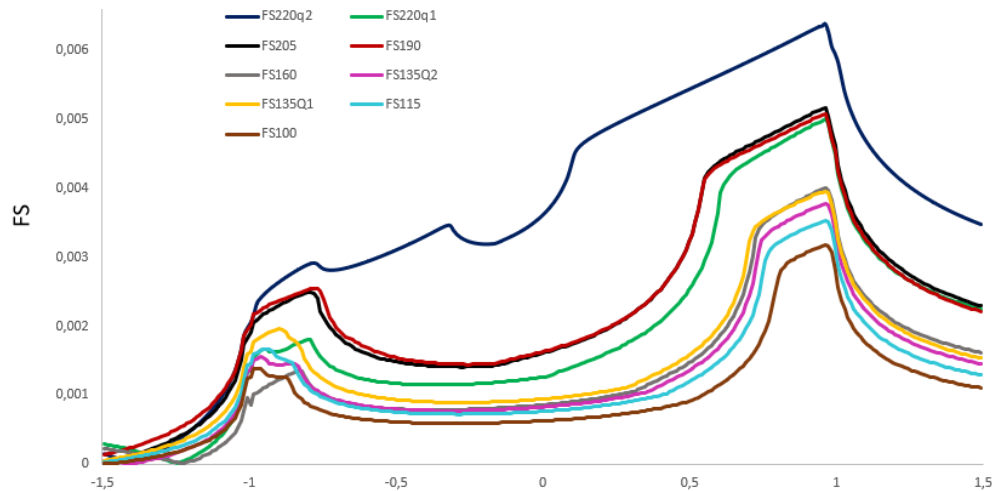


Figura 4.7. Distribución del parámetro de daño a lo largo de la superficie para diferentes valores de carga

En la posición donde se nuclea la grieta, se puede realizar un análisis del ángulo de nucleación al evaluar cómo se comporta el parámetro respecto al plano analizado. En este se presentan dos picos alrededor de los 37° y -44° , determinando que la grieta se nuclearía oblicua a la superficie. Según la literatura, el ángulo en que la grieta nuclea puede ser influenciada por la distribución del grano en su microestructura.

- **Análisis de la zona cohesiva:** en el análisis de zonas cohesivas, se aplicó un criterio personalizado de iniciación de falla mediante el uso de elementos finitos enriquecidos en ABAQUS. Los resultados, los cuales se pueden observar en la Figura 4.8,

muestran que la ubicación de la nucleación de grietas es coherente con el método del plano crítico, y que la magnitud de este parámetro se aproxima bastante a los valores reportados en la literatura. Sin embargo, la precisión en la determinación de las direcciones no fue tan alta.

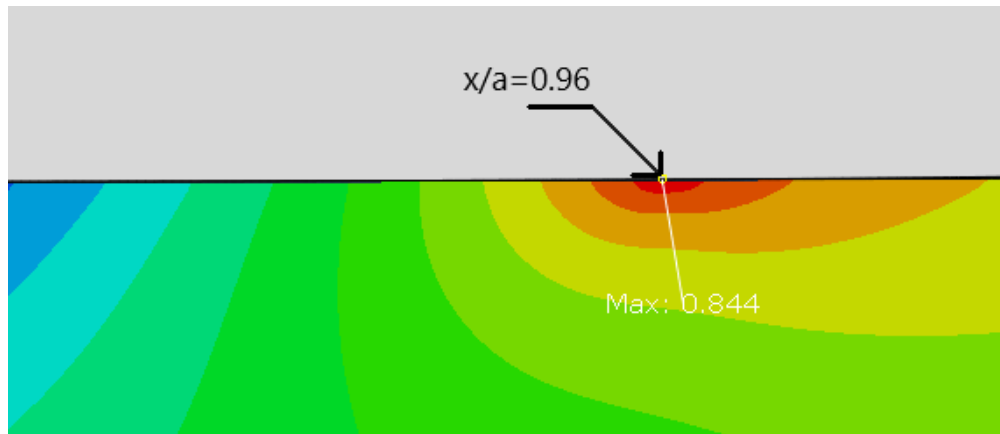


Figura 4.8. Criterio de iniciación de zona cohesiva

D. ÁNGULOS DE ROTACIÓN Y COEFICIENTES DE FRICCIÓN

Esta investigación describe los conceptos fundamentales empleados en el desarrollo del trabajo, el proceso de construcción del modelo computacional, el método de extracción de los resultados y el cálculo del parámetro de falla.

El montaje experimental utilizado en este estudio siguió una configuración específica que permitió extraer los datos necesarios para construir el modelo computacional. Este modelo tiene la capacidad de reproducir y validar los resultados obtenidos, así como de analizar los efectos de diferentes coeficientes de fricción y ángulos de rotación del indentedor.

El dispositivo de prueba utilizado por Erena [27] simula las cargas involucradas en el fenómeno de fatiga por ludimiento. El par de contacto estudiado es cilindro-plano, en el cual un par de almohadillas de contacto cilíndricas, de cierto radio, se presionan contra las superficies planas de una probeta tipo hueso de perro con una carga normal constante N . Luego, un esfuerzo axial cíclico σ completamente invertido se aplica directamente a la muestra por medio de un actuador hidráulico. Finalmente, se aplica una carga tangencial Q en el contacto entre los elementos, mediante unos soportes ajustables que actúan como

resortes de láminas; el valor de Q se puede ajustar moviendo dichos soportes. Tanto las almohadillas de contacto como las probetas se fabricaron en aleación de aluminio Al 7075-T651, ampliamente utilizada en la industria aeronáutica [28]. Debido a la flexibilidad del dispositivo de fatiga por ludimiento y a la geometría del contacto, se observan pequeñas rotaciones de la almohadilla durante las pruebas, lo cual da origen al estudio presentado a continuación. Una descripción detallada del ensayo experimental se encuentra en [27].

Ambos elementos en contacto están fabricados con la aleación de aluminio Al 7075-T651. Las propiedades mecánicas de esta aleación se suministran en la Tabla VII.

TABLA VII.
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN AI 7075-T651

Propiedad	Valor
Módulo de elasticidad E	71 GPa
Coeficiente de Poisson ν	0.33
Límite de fluencia σ_y	503 MPa
Esfuerzo último σ_u	572 MPa
Coeficiente de resistencia a la fatiga σ'_f	995 MPa
Coeficiente de ductilidad a la fatiga ϵ'_f	0.0994
Exponente de resistencia a la fatiga b'	-0.09413
Exponente de ductilidad a la fatiga c'	-0.5778

Los datos experimentales utilizados para el desarrollo del modelo incluyen magnitudes específicas de carga y fricción. En el experimento, el coeficiente de fricción μ reportado es igual a 0.75. Los datos se presentan en la Tabla VIII.

TABLA VIII.
DATOS EXPERIMENTALES

Prueba	N (N)	Q (N)	σ (MPa)	a (mm)	p_o (MPa)	N_f (ciclos)	θ_R (°)
1	5429	1543	150	1.47	293.45	268	20.19

1) *Mecánica de la fatiga por ludimiento*: Las ecuaciones empleadas para calcular la presión de contacto $p(x)$ y el esfuerzo cortante superficial $q(x)$, que serán validadas mediante

el modelo de elementos finitos, se basan en la teoría de Hertz para contacto cilindro-plano. Primero, se deben determinar el semiancho de contacto a y la presión máxima p_o , definidos por las siguientes ecuaciones:

$$a = 2\sqrt{\frac{NR}{\pi t E^*}} \quad (4.2)$$

$$p_o = \sqrt{\frac{NE^*}{\pi t R}} \quad (4.3)$$

Donde t es el espesor de la almohadilla, R el radio de curvatura de esta y E^* el módulo de elasticidad combinado, la cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{2(1 - \nu^2)}{E} \quad (4.4)$$

Una vez calculados a y p_o , la presión de contacto $p(x)$ se determina mediante:

$$p(x) = -p_o \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad (4.5)$$

El esfuerzo cortante superficial $q(x)$ se calcula considerando el coeficiente de fricción μ , el semiancho de la zona de adherencia c , y la excentricidad de la zona de adherencia e :

$$q(x) = \begin{cases} -\mu p_o \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} & ; |x| \leq a; |x + e| \geq c \\ -\mu p_o \left[\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{c}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{x+e}{c}\right)^2} \right] & ; |x + e| < c \end{cases} \quad (4.6)$$

Donde c y e se calculan así:

$$c = a \sqrt{1 - \frac{Q}{\mu N}} \quad (4.7)$$

$$e = a \frac{\sigma_{axial}}{4\mu p_o} \quad (4.8)$$

2) *Selección del parámetro de daño del plano crítico*: Para determinar la vida de nucleación de grieta durante el estudio de la fatiga multiaxial, particularmente en el fenómeno de fatiga por ludimiento, comúnmente se emplea la teoría del plano crítico. Esta teoría resulta efectiva para predecir tanto la vida útil por fatiga en casos de cargas proporcionales y no proporcionales, así como la posición y el ángulo de nucleación de grietas. La selección del parámetro de falla se realizó mediante una revisión bibliográfica relacionada con la presente prueba de ludimiento. Entre los diversos parámetros analizados, destaca el de Fatemi-Socie (FS) como el más apropiado para materiales que exhiben comportamiento de falla por cortante, ya que considera tanto los efectos de la carga no proporcional como del esfuerzo medio.

El parámetro FS, elegido para este estudio, incorpora dos variables fundamentales: el rango máximo de la deformación unitaria cortante ($\Delta\gamma_{\max}$), y el esfuerzo normal máximo (σ_n) en el plano de máxima deformación cortante:

$$FS = \frac{\Delta\gamma_{\max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,\max}}{\sigma_y} \right) \quad (4.9)$$

Donde k es una constante que depende del material. A partir del valor encontrado se puede calcular la vida de nucleación de grietas mediante la siguiente ecuación:

$$FS = \frac{\tau'_f}{G} (2N_i)^{b'} + \gamma'_f (2N_i)^{c'} \quad (4.10)$$

Donde τ'_f es el coeficiente de resistencia a la fatiga en cortante, γ'_f es el coeficiente de ductilidad en cortante y G es el módulo de rigidez.

3) *Modelo FEM*: Al igual que en la sección 4.3, se analizó una configuración de fatiga por ludimiento en un sistema tipo cilindro-plano, el cual permite estudiar de manera precisa los fenómenos de contacto y desgaste que se presentan en aplicaciones industriales bajo cargas repetitivas y multiaxiales. Para esta prueba, las almohadillas se modelaron con un radio de 100 mm y una longitud de 30 mm, lo cual simula las dimensiones de componentes cilíndricos utilizados en pruebas de desgaste por fatiga. La probeta, por otro lado, se modeló con dimensiones de 30 mm de longitud y 5 mm de ancho, empleando un espesor de 8 mm para ambas partes, lo cual permite replicar una interfaz de contacto suficientemente resistente y realista para el análisis.

Con el objetivo de definir adecuadamente las condiciones de contacto en el modelo, se creó un par de contacto tipo superficie a superficie, en el cual se definió la superficie circular de la almohadilla como la superficie maestra, mientras que la superficie en contacto de la probeta se designó como superficie esclava. Esta configuración de maestro-esclavo es clave para garantizar una interacción de contacto estable y precisa, minimizando la probabilidad de penetración y deslizamiento incontrolado entre las superficies en estudio. ABAQUS proporciona la formulación de deslizamiento finito para modelar el contacto entre cuerpos deformables, la cual permite capturar fenómenos como la separación y el deslizamiento de amplitud finita, así como la rotación de las superficies en contacto, asegurando que los desplazamientos relativos y las deformaciones en la zona de contacto sean simulados con gran precisión. La formulación es particularmente adecuada para la simulación de contactos en sistemas sometidos a ciclos de carga complejos (Fatiga por lundimiento), donde la interacción continua de las superficies puede resultar en el inicio y propagación de grietas.

Para definir las propiedades del contacto, se hizo uso del comportamiento normal y tangencial. Para el comportamiento normal, el método de aplicación restringida es tipo Lagrange aumentado con contacto duro, utilizando el valor de rigidez predeterminado. Para el comportamiento tangencial, la formulación de la fricción es el multiplicador de Lagrange, utilizando un coeficiente de fricción de Coulomb constante.

La discretización del modelo se realizó mediante elementos 2D tipo *plane strain* de integración reducida (CPE4R). Se estructuró una malla fina cerca de la zona de contacto, los cuales van aumentando de tamaño a medida que se alejan de la zona de interés.

Las condiciones de frontera del modelo se ilustran en la Figura 4.9. Se aplicó una restricción de simetría en la superficie inferior de la probeta, y se restringió completamente el borde izquierdo de la misma. Las cargas tangencial y normal, así como la rotación se aplicaron en la superficie superior de la almohadilla y el esfuerzo axial en el borde derecho de la probeta. Por último, se aplicó un MPC (restricción multipunto) tipo viga en la superficie superior de la almohadilla para generar una conexión rígida, permitiendo un movimiento total del cuerpo debido las cargas aplicadas sobre la superficie.

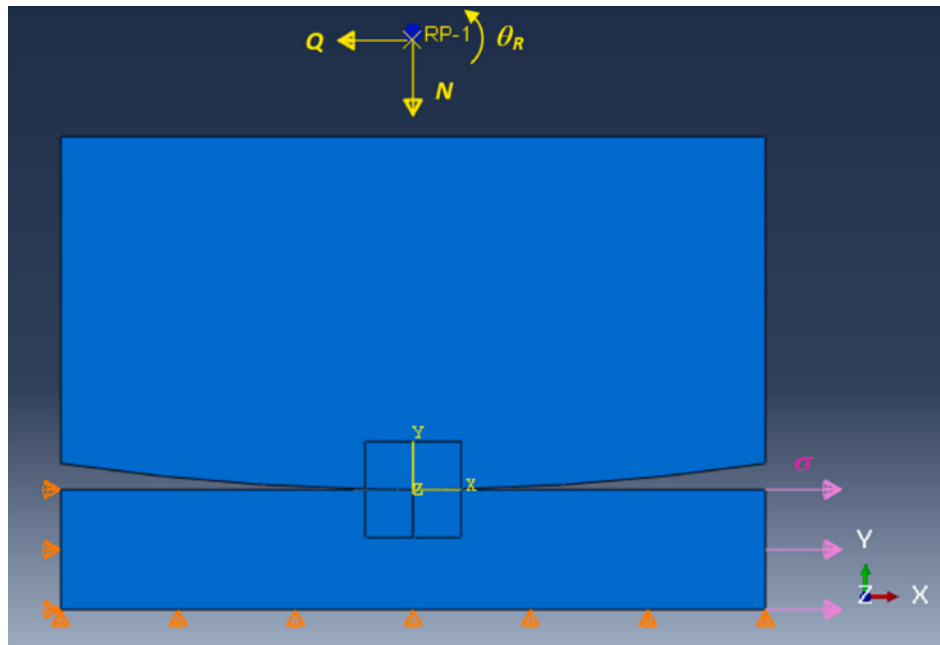


Figura 4.9. Condiciones de frontera del modelo

Para aplicar las cargas externas, en la Figura 4.10, se ilustra cómo se dividió el proceso de aplicación en 4 pasos diferentes:

Paso uno: La carga normal es aplicada de manera gradual, manteniéndose constante durante los siguientes pasos.

Paso dos: Se aplican las cargas externas (carga tangencial, esfuerzo axial y rotación del indentador) hasta alcanzar su valor máximo, siguiendo la dirección indicada en la figura 4.9.

Paso tres: Se invierten las cargas aplicadas.

Paso cuatro: Se retiran las cargas aplicadas.

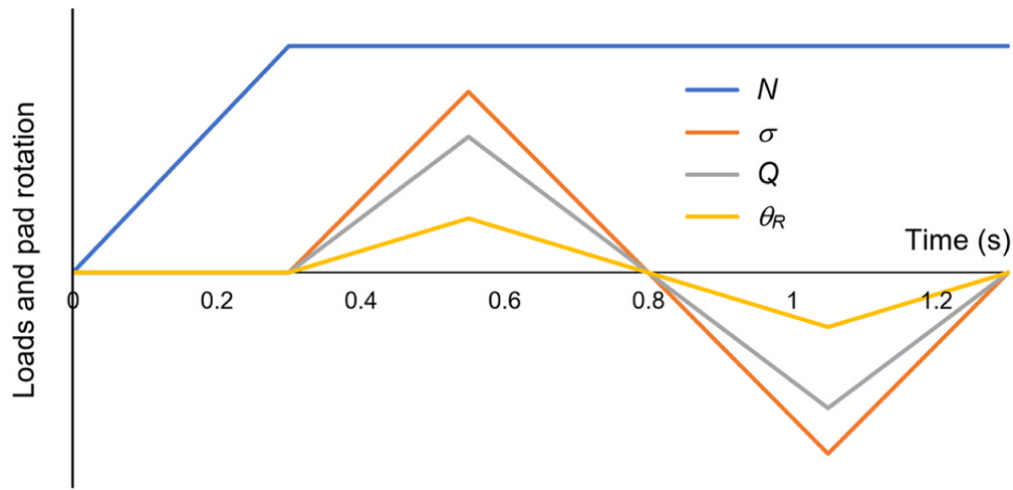


Figura 4.10. Ciclos de carga aplicados en el modelo FEM

4) Resultados:

- Validación: en esta sección se presentan diversos resultados que permiten realizar una comparación gráfica entre los resultados numéricos obtenidos a través del modelo de elementos finitos y los resultados analíticos derivados de las ecuaciones descritas en la documentación.

coeficiente de fricción de 0.75. La Figura 4.11(a) muestra la distribución de la presión normalizada, donde la línea azul representa el resultado numérico, y la línea punteada la respuesta analítica. Al comparar ambas curvas, se encontró un error del 1.3 % en $x = 0$, demostrando gran correlación entre ambos métodos. Por otro lado, la Figura 4.11(b) muestra la distribución del esfuerzo cortante superficial. En este caso, el error existente entre ambas curvas es de 6.4 % y 5.0 % para los picos izquierdo y derecho respectivamente. Este error se debe mayormente por el tipo de restricción utilizado para poder describir la rotación de la almohadilla, dado que normalmente se restringe el desplazamiento lateral de ésta mediante sus aristas laterales.

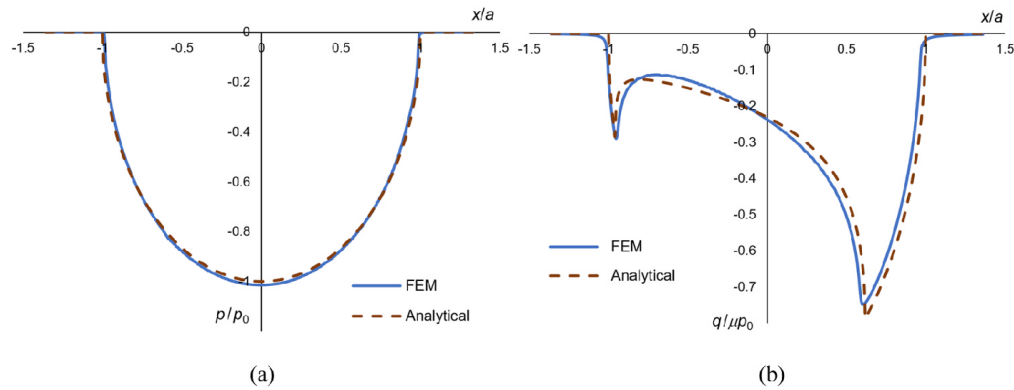


Figura 4.11. Distribución de la presión normal (a) y esfuerzo cortante (b) en la superficie de contacto

Por último, se realizó un análisis de convergencia de malla para elementos de $5\ \mu\text{m}$ y $10\ \mu\text{m}$ en la zona de contacto. Los resultados obtenidos son bastante similares entre sí, pudiendo apreciar un cambio en el error en los picos de 9.3 % y 2.7 % para el lado izquierdo y derecho respectivamente. Al ver que la diferencia no es tan significativa, se decidió proseguir con elementos de $10\ \mu\text{m}$ puesto que estos elementos reducen el tiempo de análisis considerablemente.

- **Efecto de la rotación de la almohadilla:** En las pruebas de fatiga por ludimiento, las almohadillas deben mantenerse rígidamente sujetas para analizar adecuadamente este fenómeno. Sin embargo, se han detectado rotaciones pequeñas en estos elementos, a pesar de la aparente rigidez del dispositivo. Las observaciones experimentales revelan que, durante la prueba, la almohadilla rota siguiendo el movimiento de la probeta, lo que evidencia una insuficiente rigidez en el montaje experimental.

Inicialmente se realizó la simulación del proceso de fatiga por ludimiento siguiendo una rotación de la almohadilla de 0.19° para corroborar los resultados obtenidos con la literatura. Posteriormente, para comprender mejor el impacto de la rotación del indentador en la prueba de ludimiento, se llevaron a cabo tres pruebas adicionales con ángulos de rotación de 0.11° , 0.15° y 0.23° , manteniendo un coeficiente de fricción de 0.75.

Al analizar los resultados del esfuerzo cortante superficial (Figura 4.12), se observa que un aumento en el ángulo de rotación provoca que el borde posterior, potencial sitio de nucleación de la grieta, se desplace hacia la izquierda. La reducción en x es del 10.1 % entre 0.11° y 0.15° , del 11.3 % entre 0.15° y 0.19° , y del 12.7 % entre 0.19°

y 0.23° . El valor máximo del esfuerzo cortante superficial permanece constante, con diferencias menores al 1 %.

En el pico izquierdo, ocurre lo contrario: el punto máximo se mantiene en la misma posición x . Sin embargo, el valor máximo del esfuerzo cortante superficial se reduce en un 5.1 % entre 0.11° y 0.15° , en un 3.6 % entre 0.15° y 0.19° , y en un 2 % entre 0.19° y 0.23° .

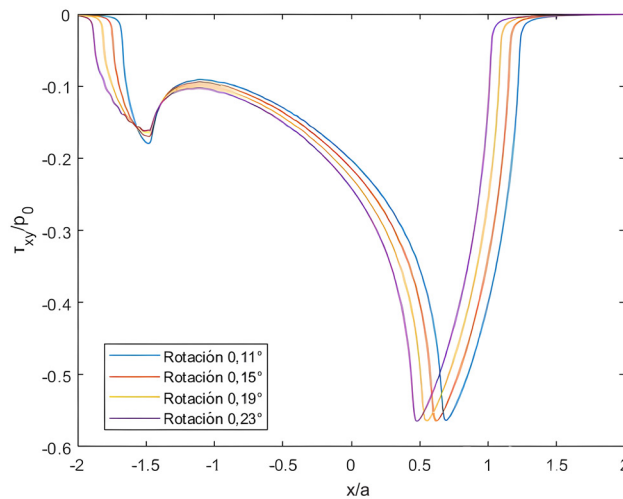


Figura 4.12. Comportamiento del esfuerzo cortante superficial con diferentes ángulos de rotación

El análisis del parámetro de falla en la prueba sin rotación muestra una distribución orientada hacia la izquierda, hacia dentro de la zona de contacto. Al aplicar una rotación de 0.11° , la distribución cambia su orientación desplazándose hacia el centro del contacto, mientras la zona de daño se expande, tendiendo a una distribución más uniforme, resultando en una reducción del valor máximo del parámetro de daño. En esta configuración, los valores más altos se orientan hacia el exterior de la zona de contacto, indicando que el ángulo de nucleación se torna más positivo. Un aumento adicional del ángulo de rotación intensifica estos efectos, como se muestra en la Tabla IX, donde se presentan los valores del parámetro de daño, la posición y el ángulo de nucleación de grietas para cada prueba.

TABLA IX.
RESULTADOS DE PRUEBAS REALIZADAS PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE ROTACIÓN

θ_R (°)	FS promedio (-)	θ_i (°)	X_i (mm)
0	0.008500381	33	1.42
0.11	0.008003114	26	1.23
0.15	0.007642968	23	1.16
0.19	0.007209106	21	1.09
0.23	0.006665789	17	1.01

- Efecto del coeficiente de fricción: Dado que el coeficiente de fricción es un parámetro clave en la fatiga por ludimiento, se evaluó cómo afecta al ángulo de nucleación y el valor del parámetro de daño. Los ensayos se realizaron con una rotación de la almohadilla de 0.19° , variando el coeficiente de fricción desde 0.6 hasta 0.85 en intervalos de 0.05.

coeficiente de fricción no afectó la posición del borde posterior ni la posición de nucleación de grieta. Sin embargo, los picos del esfuerzo cortante superficial incrementan de manera proporcional al coeficiente de fricción, comportamiento esperado dado que esta distribución depende directamente de este coeficiente (ver ecuación 4.6).

Como se observa en la Tabla 4.4, el incremento en el coeficiente de fricción produce una disminución en el ángulo de nucleación, lo que indica una modificación en el estado de esfuerzos que altera el plano de mayor amplitud de deformación por cortante. Asimismo, se evidencia un incremento logarítmico del parámetro de daño al aumentar el coeficiente de fricción, convirtiendo a este último en un factor determinante para el control de la vida útil de componentes bajo este fenómeno.

TABLA X.
RESULTADOS DE PRUEBAS PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE FRICCIÓN

μ (-)	FS promedio (-)	θ_i (°)
0.60	0.006828193	25
0.65	0.006980063	23
0.70	0.007108196	22
0.75	0.007209106	21
0.80	0.007185817	19
0.85	0.007222715	17

E. ANÁLISIS DE LA NUCLEACIÓN Y COEFICIENTE DE FRICCIÓN VARIABLE

1) *Descripción del modelo*: Para estimar la vida útil de los ensayos de ludimiento, se construyó un modelo de elementos finitos (FE) en 2D utilizando Abaqus, similar al descrito en la Figura 4.12. Dado que la configuración es simétrica, se modeló solo la mitad. El sistema de ludimiento simulado consiste en una almohadilla cilíndrica de radio 50 mm y una probeta plana de 40 mm $\times$ 5 mm, ambas con un grosor de 4 mm. La probeta está restringida a moverse verticalmente en su borde inferior, mientras que la almohadilla tiene restricciones de movimiento horizontal en sus lados y se limita su rotación mediante un MPC aplicado en su borde superior. El tipo de MPC utilizado es Tie, que permite que todos los nodos del borde tengan el mismo desplazamiento sin permitirles rotar.

Se aplican dos tipos de cargas al modelo: (1) una fuerza de compresión en la parte superior de la almohadilla, aplicada a un punto remoto acoplado al borde superior de la almohadilla mediante el MPC, y (2) esfuerzos axiales cíclicos y reacciones en los lados de la probeta, simulando el efecto de la carga tangencial aplicada. El esfuerzo de reacción se calcula mediante la ecuación 4.1.

Estas cargas se aplican siguiendo una secuencia de carga dividida en tres pasos principales. La fuerza de compresión se aplica de manera gradual durante el primer paso, manteniéndose constante en los pasos subsiguientes. Luego, se aplican gradualmente los valores máximos y mínimos de los esfuerzos axial y de reacción, tal y como se muestra en la Figura 4.4.

La malla utilizada consiste en elementos cuadriláteros de deformación plana de cuatro nodos con integración reducida (CPE4R). En la interfaz de contacto, se definió un ta-

maño de elemento mínimo de $2\ \mu\text{m}$. Para asegurar una transición gradual de refinamiento de malla, se creó una partición rectangular para controlar el incremento del tamaño de los elementos, variando desde $2\ \mu\text{m}$ hasta $8\ \mu\text{m}$ a lo largo de $0.357\ \text{mm}$ perpendicular a la superficie de contacto. La figura 4.13 muestra las condiciones de frontera impuestas y el mallado resultante del modelo.

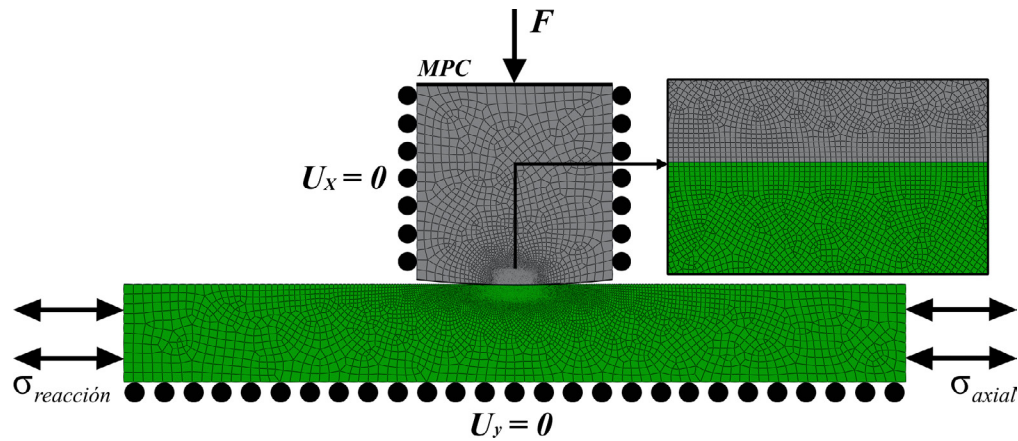


Figura 4.13. Condiciones de frontera y mallado del modelo FE

El contacto entre las superficies se define mediante el algoritmo maestro esclavo, considerando la superficie inferior de la almohadilla como la maestra y la superior de la probeta como la esclava. Las propiedades de contacto se definen mediante un contacto duro superficie a superficie con deslizamiento finito y un método de restricción tipo Lagrange aumentado, así como multiplicadores de Lagrange, con un coeficiente de fricción (CoF) de 0.65.

Es fundamental destacar las simplificaciones, supuestos y limitaciones aplicadas al modelo. Se desarrolló un modelo en 2D por eficiencia computacional y resultados similares en la vida útil de nucleación de grietas en comparación con modelos en 3D. Además, se asume una condición de deformación plana porque, en esta configuración, se desarrolla una grieta simétrica y semi-elíptica, revelando esta condición.

2) *Implementación del modelo de coeficiente de fricción variable (VCoF):* Al analizar un problema de fatiga por ludimiento mediante FEM, generalmente se considera un CoF constante. Sin embargo, se sabe que este coeficiente comienza con un valor bajo y luego aumenta a medida que se desgasta la capa de material más externa, alcanzando un va-

lor en estado estacionario. Para esta aleación de aluminio, se ha mencionado que podría alcanzar su CoF en estado estacionario alrededor de 1000 ciclos, mientras que otros investigadores han señalado que esto ocurre a los 3000 ciclos. Por lo tanto, se evaluó la variación del CoF considerando ambas condiciones de ciclaje.

A partir de los resultados experimentales, el CoF inicial no se midió directamente y su evolución era desconocida. Sin embargo, este valor inicial se puede estimar mediante ingeniería inversa, aplicando el mismo método utilizado para obtener el CoF en estado estacionario. Para este cálculo, es necesario conocer el CoF promedio, la carga tangencial Q y la fuerza de compresión F del experimento, obteniendo un valor inicial de 0.3633.

La evolución del CoF respecto al número de ciclos de ludimiento se ha establecido mediante la siguiente expresión:

$$\text{CoF}(n) = \text{CoF}_{\text{inicial}} + (\text{CoF}_{\text{ss}} - \text{CoF}_{\text{inicial}})e^{-kn} \quad (4.11)$$

donde k es un parámetro de ajuste que determina la tasa a la que ocurre la transición entre el CoF inicial y el de estado estacionario.

Como se ha destacado anteriormente, el CoF requiere entre 1000 y 3000 ciclos para estabilizarse, lo que representa una limitación computacional significativa. Para reducir esta carga, se implementa una técnica de acumulación de ciclos que condensa múltiples ciclos en una sola simulación, disminuyendo el volumen de cálculos en más de 100 veces. Esta optimización, sin embargo, introduce una aproximación al asumir que varios ciclos corresponden a una única condición de fricción. Una limitación adicional del modelo FEM desarrollado es su especificidad para el régimen de fatiga por ludimiento. En condiciones donde la fuerza tangencial es lo suficientemente grande respecto a la fuerza normal, el modelo predice desplazamientos no acotados debido a una condición de deslizamiento total. Por tanto, la aplicabilidad queda restringida a experimentos donde la relación Q/P sea menor a 0.3633, es decir, el valor inicial del CoF.

3) *Parámetro de daño de plano crítico*: Para comprobar los resultados obtenidos en la simulación computacional, se planteó predecir la vida de nucleación de grietas mediante parámetros de plano crítico. En este caso de estudio se seleccionaron los parámetros FS (descrito en la sección 2.1) y el parámetro de Findley (FP).

El parámetro FP, a diferencia de FS, fundamenta la predicción de nucleación de grieta en los esfuerzos cortantes alternantes en el plano de cortante máximo, logrando predecir con gran exactitud procesos de fatiga de alto ciclaje. La elección de este parámetro se justifica por la excelente correlación que presenta con la vida y orientación de grietas, especialmente en el caso de estudio presente, puesto que ya ha sido utilizado con anterioridad para la configuración propuesta [19]. Este parámetro es ampliamente utilizado para casos en los que la nucleación y propagación de grieta siguen la misma dirección y el modo de falla está dominado por la cortante (modo II), tal como se presenta en este estudio.

El parámetro FP se calcula mediante una ecuación basada en el rango máximo del esfuerzo cortante ($\Delta\tau_{\max}$), y el esfuerzo normal máximo ($\sigma_{n,\max}$) en el plano de máximo esfuerzo cortante:

$$FP = \frac{\Delta\tau_{\max}}{2} + \sigma_{n,\max} \quad (4.12)$$

Donde k_1 es una constante del material relacionada a la sensibilidad del material a los esfuerzos normales, y depende de los límites de fatiga a torsión (τ_{f-1}) y tracción (σ_{f-1}). A partir del valor encontrado, se puede calcular la vida de nucleación de grietas mediante la siguiente ecuación:

$$FP = \tau'_f (2N_i)^{b'} \quad (4.13)$$

Para evaluar estos parámetros de daño se implementaron dos métodos de promediado. El primero fue el método del punto crítico, que identifica el punto de máximo valor del parámetro de daño (hotspot) como la ubicación probable de nucleación de grieta. En este método, la vida de nucleación se calcula directamente utilizando este valor máximo. El segundo método implementado fue el del cuadrante, seleccionado por su capacidad de considerar los efectos de esfuerzos y deformaciones en la zona circundante al hotspot. Este método consiste en promediar los valores del parámetro de daño dentro de un área semicircular alrededor del hotspot, dividiendo el área en dos cuadrantes (izquierdo y derecho) respecto al punto crítico. El cuadrante que presente el mayor promedio de daño determina tanto el valor del parámetro de daño efectivo como la dirección probable de nucleación de la grieta.

En este estudio, se seleccionaron distancias críticas de $14 \mu\text{m}$ para el parámetro FP y $10 \mu\text{m}$ para el parámetro FS. Estos valores provienen de una investigación previa con el mismo modelo experimental, donde estos valores demostraron la mayor concordancia con los resultados experimentales [29]. Es importante destacar que estas distancias son específicas para este caso particular, mientras que de manera general, el tamaño de grano del material ($20 \mu\text{m}$) ha demostrado proporcionar mejores resultados en la predicción de nucleación de grietas.

4) *Parámetro de acumulación de daño*: Se utiliza un parámetro de acumulación de daño para evaluar la vida útil de nucleación en configuraciones de desgaste, basado en la regla de Miner-Palmgren. Para reducir el costo computacional, se implementa una técnica de salto de ciclo, donde en lugar de simular múltiples ciclos de ludimiento, se simula uno solo que condensa un número determinado de ciclos. Esta simplificación es válida ya que los esfuerzos y deformaciones no cambian drásticamente durante pocos ciclos, permitiendo asumir un incremento lineal del daño en el ciclo simulado para un CoF dado. La grieta nuclea cuando el parámetro alcanza un valor de 1, definido como:

$$D = \sum_{i=1}^{N_S} \frac{d_i}{N_{P,i}} \quad (4.14)$$

donde d_i es el salto de ciclo usado para la i -ésima simulación, $N_{P,i}$ la vida útil predicha para el ciclo i y N_S es el número de ciclos simulados. Al alcanzar el valor de CoF en estado estacionario, solo es necesario realizar una simulación adicional, ya que en este punto los esfuerzos y deformaciones permanecerán constantes debido a que el CoF no variará para ciclos posteriores. La vida útil residual se calcula a partir del daño adicional que la superficie puede soportar hasta la nucleación de la grieta, es decir:

$$1 - D_{ac} = \frac{N_r}{N_P} \quad (4.15)$$

Donde D_{ac} es el daño acumulado, N_P la vida útil predicha para la última simulación y N_r la vida útil residual.

5) *Implementación del script*: Para implementar tanto el VCoF como el cálculo de la vida útil de nucleación en el modelo FE, se escribió un script en Python. Una vez seleccionados los elementos de la zona de contacto, el código implementa el CoF correspondiente

según el ciclo actual y somete el problema de contacto. Tras la finalización, se almacenan las tensiones y deformaciones de cada elemento para aplicar las ecuaciones de transformación del círculo de Mohr, variando el plano desde los -90° hasta los 90° en incrementos de 1° . Basados en estos valores, se calculan los valores de los parámetros de daño en cada nodo de la interfaz de contacto. El valor mínimo de Nr obtenido determinará la vida útil de nucleación, y el elemento y ángulo correspondientes donde se obtiene este valor determinarán la posición y ángulo de nucleación.

6) *Resultados*: Una vez completadas las simulaciones y el código de Python implementado, se extrajeron la vida útil de nucleación, el ángulo de nucleación y la posición de la grieta inicial.

- **Posición y Ángulo de Nucleación** En la Tabla [XI](#) se presentan los resultados del método del punto crítico, de los ángulos de nucleación de grieta θ , y la posición normalizada x/a para ambos parámetros de daño, separados por prueba y metodología de CoF. Tal y como se reporta en la literatura, todas las pruebas muestran nucleación de grieta cerca del borde posterior, ya que los valores de x/a son cercanos a 1. Sin embargo, el ángulo predicho se encuentra en el rango de 31° a 35° , es decir, la dirección es opuesta a aquella obtenida experimentalmente, la cual presenta un ángulo de iniciación que variaba entre -35° y -45° . Asimismo, tanto la posición de nucleación de grieta, como el ángulo de nucleación permanece constante para las simulaciones de VCoF y CoF constante.

Esta discrepancia entre los ángulos predichos y experimentales se ha observado en estudios previos. Un análisis del comportamiento del parámetro en función del ángulo muestra que, aunque el valor máximo del parámetro de daño se orienta hacia fuera de la zona de contacto (ángulo positivo), existe también un segundo máximo, de valor similar, orientado por debajo de la zona de contacto (ángulo negativo). La literatura sugiere que ambos planos son sitios potenciales de nucleación, y que la orientación final depende principalmente de la microestructura del material. Es importante señalar que el método del punto crítico utilizado en este estudio considera únicamente los efectos superficiales en la predicción, sin incluir los esfuerzos subsuperficiales que influyen significativamente en la dirección de nucleación de la grieta. Por esta razón, el análisis mediante métodos de promediado se vuelve relevante, puesto que permite caracterizar la nucleación de grieta considerando los efectos subsuperficiales.

TABLA XI.
RESULTADOS DE LA NUCLEACIÓN DE GRIETAS CON MÉTODO DEL PUNTO CRÍTICO

CoF	Prueba	x/a (FS)	θ_{FS}	x/a (FP)	θ_{FP}
0.65 (constante)	1	0.962	33°	0.962	31°
	2	0.962	33°	0.962	32°
	3	0.975	35°	0.975	34°
	4	0.966	34°	0.966	33°
VCoF de 1000 ciclos	1	0.962	33°	0.962	31°
	2	0.962	33°	0.962	32°
	3	0.975	35°	0.975	34°
	4	0.966	34°	0.966	33°
VCoF de 3000 ciclos	1	0.962	33°	0.962	31°
	2	0.962	33°	0.962	32°
	3	0.975	35°	0.975	34°
	4	0.966	34°	0.966	33°

Por otro lado, los resultados del método del cuadrante se presentan en la Tabla [XII](#), donde se observa que la posición de nucleación coincide con la obtenida mediante el método del punto crítico. Sin embargo, el ángulo de nucleación de grieta difiere del método anterior, ya que en este caso la grieta se propaga por debajo de la zona de contacto, es decir, presentan valores negativos, los cuales son similares a los observados experimentalmente (entre -35° y -45°). Esta diferencia en la propagación de la grieta puede atribuirse a la forma en que el método del cuadrante considera las interacciones de esfuerzo en las áreas adyacentes a la superficie de contacto, lo que resulta en una representación más realista de las condiciones de carga en situaciones de fatiga por ludimiento.

Al igual que en el método del punto crítico, el ángulo predicho se mantiene constante para los diferentes análisis de CoF. No obstante, es relevante destacar que, aunque el ángulo se mantenga constante, la propagación por debajo de la zona de contacto sugiere una relación más compleja entre los esfuerzos locales y la evolución del daño. Los resultados indican que el parámetro FP predice ángulos de iniciación que concuerdan mejor con los valores experimentales. Esto implica que la metodología del cuadrante no solo refuerza la validez de los datos obtenidos, sino que también proporciona un marco más robusto para la evaluación de la iniciación de grietas, lo que podría conducir a un mejor entendimiento de los mecanismos de fallo en materiales sometidos a condiciones de fatiga severa.

TABLA XII.
RESULTADOS DE LA NUCLEACIÓN DE GRIETAS CON MÉTODO DEL CUADRANTE

CoF	Prueba	x/a (FS)	θ_{FS}	x/a (FP)	θ_{FP}
0.65 (constante)	1	0.962	-50°	0.962	-48°
	2	0.962	-49°	0.962	-47°
	3	0.975	-46°	0.975	-45°
	4	0.966	-47°	0.966	-45°
VCoF de 1000 ciclos	1	0.962	-50°	0.962	-48°
	2	0.962	-49°	0.962	-47°
	3	0.975	-46°	0.975	-45°
	4	0.966	-47°	0.966	-45°
VCoF de 3000 ciclos	1	0.962	-50°	0.962	-48°
	2	0.962	-49°	0.962	-47°
	3	0.975	-46°	0.975	-45°
	4	0.966	-47°	0.966	-45°

- **Efecto de la variación del CoF:** La Figura 4.14 muestra las distribuciones de los parámetros de daño a lo largo de la superficie de contacto para CoFs de 0.3633, 0.507 y 0.65. Las curvas permiten identificar las zonas de adherencia y deslizamiento. En el centro del contacto (zona de adherencia) el parámetro de daño es mínimo, aumentando hacia los bordes, con un valor máximo cerca del borde de salida, donde se presume la nucleación de la grieta. Para valores menores de CoF, el daño en la zona de adherencia aumenta, aunque sin alcanzar los valores del borde de salida. El tamaño de la zona de adherencia aumenta proporcionalmente al CoF debido a la mayor tracción generada entre las superficies.

El valor máximo del parámetro de daño también incrementa con el CoF. Por ello, un análisis con VCoF resulta en predicciones de vida útil más largas que un análisis con CoF constante. Este incremento en el daño se atribuye al aumento en los esfuerzos cortantes y de tracción en la zona de contacto, lo cual es corroborado en la ecuación (4.6). Aunque los parámetros de daño utilizados dependen de la deformación y esfuerzo cortante respectivamente, estos valores están directamente relacionados con los esfuerzos principales de contacto.

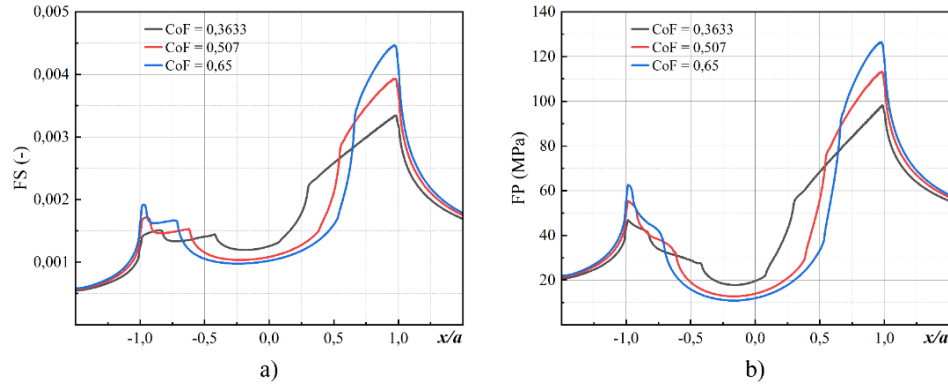


Figura 4.14. Distribución de los parámetros de daño FS (a) y FP (b) para tres valores de CoF

- Comparación estadística Se adoptaron parámetros estadísticos normalizados para evaluar la media y la desviación estándar de las vidas útiles predichas en comparación con los resultados experimentales. A medida que estos parámetros se acercan a 1, se considera que las predicciones son más precisas. La evaluación de estos parámetros se realiza utilizando ecuaciones específicas que involucran la vida útil experimental, la vida útil predicha, y otros valores estadísticos:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{N_p}{N_e} \right) \quad (4.16)$$

$$SD_{\alpha} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\log \frac{N_p}{N_e} - \bar{\alpha} \right)^2} \quad (4.17)$$

$$\bar{x} = 10^{\bar{\alpha}} \quad (4.18)$$

$$SD_{\bar{x}} = 10^{SD_{\alpha}} \quad (4.19)$$

Donde N_e es la vida útil experimental, N_p la vida útil simulada, n el número de pruebas analizadas, $\bar{x}$ la media normalizada y $SD_{\bar{x}}$ la desviación estándar normalizada. La Tabla 4.7 presenta los resultados estadísticos normalizados para la vida útil de nucleación utilizando los métodos del punto crítico y cuadrante.

TABLA XIII.

RESULTADOS ESTADÍSTICOS NORMALIZADOS DE LA VIDA ÚTIL DE NUCLEACIÓN PARA AMBOS PARÁMETROS DE DAÑO Y AMBOS MÉTODOS DE PROMEDIADO

Método	CoF	$\bar{x}_{FS}$	$SD_{(\bar{x},FS)}$	$\bar{x}_{FP}$	$SD_{(\bar{x},FP)}$
Punto crítico	0.65 (constante)	0.7075	1.4065	0.4673	1.3245
	VCoF de 1000 ciclos	0.7089	1.4053	0.4686	1.3234
	VCoF de 3000 ciclos	0.7118	1.4026	0.4713	1.3205
Cuadrante	0.65 (constante)	1.6578	1.4928	1.3881	1.4319
	VCoF de 1000 ciclos	1.6591	1.4921	1.3893	1.4312
	VCoF de 3000 ciclos	1.6620	1.4908	1.3919	1.4299

Al comparar los valores de VCoF con los de CoF constante, se aprecia que los valores medios para VCoF son menos conservadores, como se predijo, pero más precisos y con menor desviación. Esta diferencia en los resultados sugiere que la implementación de VCoF permite una mejor representación de las condiciones de operación en comparación con el CoF constante, que tiende a ser más restrictivo y, por lo tanto, menos adaptable a las variaciones en el entorno de carga. En comparación con los resultados de CoF constante, la media aumenta un 0.24 % y un 0.72 %, mientras que la desviación estándar disminuye un 0.09 % y un 0.29 % para los casos de VCoF de 1000 y 3000 ciclos, respectivamente. Estas cifras indican que, al emplear el VCoF, se logra no solo una mayor precisión en la estimación de la vida útil de nucleación, sino también una menor variabilidad en los resultados, lo que es crucial para aplicaciones en las que la consistencia es esencial. Al utilizar el método del punto crítico, se concluye que el VCoF de 3000 ciclos junto con el parámetro FS proporciona resultados más precisos y con menor desviación. Esto refuerza la idea de que el enfoque basado en el VCoF no solo mejora la exactitud de las predicciones, sino que también contribuye a una mejor toma de decisiones en el diseño y la evaluación de componentes sometidos a fatiga, donde cada incremento en la precisión puede traducirse en un aumento significativo en la fiabilidad y durabilidad del material.

Por otro lado, el método del cuadrante muestra resultados no conservadores para ambos parámetros de daño. Esta característica se debe a que este método de promediado considera los esfuerzos de las zonas circundantes y subsuperficiales al punto crítico, donde los valores de esfuerzo son menores, resultando en valores de daño predicho menores. Los métodos de promediado pueden generar resultados con desviaciones similares o menores que el método del punto crítico, es decir, predicciones más cercanas a las experimentales [30],[31]. Aunque la metodología más aceptada en la industria es el diseño

mediante enfoques conservadores, existen circunstancias específicas donde el método del cuadrante podría ser beneficioso, como en componentes donde se tiene un control riguroso de las condiciones de operación o en diseños que incorporan factores de seguridad adicionales, siendo esta metodología beneficiosa para optimizar el tiempo de vida del componente.

Así mismo, al utilizar esta metodología junto con el análisis del punto crítico, no se obtiene una sola predicción de vida de nucleación de grieta, sino un intervalo más amplio, proporcionando mayor flexibilidad en las estrategias de mantenimiento y permite una mejor adaptación a variaciones operativas.

Similar al método del punto crítico, el VCoF para el método de cuadrante cambia el valor medio de las predicciones a un estado menos conservador y con menor desviación. Sin embargo, dado que los resultados para CoF constante son no conservadores en comparación con los experimentales, los resultados de VCoF son menos precisos. Al utilizar el método de cuadrante, las tres metodologías de CoF, junto con el parámetro FP, proporcionan resultados más precisos, con diferencias mínimas en la media y desviación estándar. Sin embargo, dado que estos resultados son no conservadores, en caso de requerir resultados más conservadores se debería utilizar el método del punto crítico.

F. PERSPECTIVAS EN LA SIMULACIÓN DE LA FATIGA POR LUDIMIENTO

La validación experimental de los resultados numéricos ha sido otro pilar en este estudio. A través de ensayos de laboratorio cuidadosamente controlados, se ha logrado verificar la precisión de las simulaciones. Estos experimentos han proporcionado datos críticos que no solo corroboran los resultados obtenidos con FEM, sino que también identifican posibles mejoras en la caracterización de los materiales utilizados.

Uno de los aspectos que merece especial atención es la capacidad de los modelos numéricos para predecir el punto de iniciación de las grietas bajo condiciones de fatiga por ludimiento. A través de un análisis detallado de los resultados, se ha observado que las configuraciones de malla y el tipo de elementos finitos utilizados juegan un papel crítico en la precisión de las simulaciones. Configuraciones de malla más finas, combinadas con elementos específicos diseñados para capturar las tensiones concentradas en las zonas

de contacto, han demostrado mejorar significativamente la predicción de la iniciación de grietas.

Asimismo, se ha comprobado que la influencia del tamaño de la malla en la precisión de los resultados no es lineal. Mientras que un refinamiento excesivo de la malla puede aumentar innecesariamente el costo computacional, un tamaño de malla demasiado grueso puede no capturar los detalles esenciales del daño en los primeros ciclos de carga. Por lo tanto, el equilibrio entre la precisión y la eficiencia computacional es un aspecto clave que debe considerarse en futuras investigaciones que busquen optimizar las simulaciones de fatiga por ludimiento.

Otro hallazgo relevante del estudio es el papel que juegan las condiciones de frontera y las restricciones en los modelos numéricos. Las condiciones de contacto en los ensayos de fatiga por ludimiento presentan variaciones significativas en términos de las interacciones entre las superficies, lo que añade complejidad al modelado. Este proyecto ha permitido ajustar de manera cuidadosa dichas condiciones en los modelos FEM, permitiendo una mejor representación del fenómeno real y reduciendo las discrepancias entre los resultados experimentales y numéricos.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados de este proyecto tienen implicaciones directas en el diseño de componentes mecánicos expuestos a condiciones de contacto severo. Al optimizar las simulaciones de fatiga por ludimiento, se puede extender la vida útil de los componentes, prevenir fallas catastróficas y reducir los costos de mantenimiento. Esto es particularmente importante en sectores como la aviación, la energía y la manufactura, donde los componentes suelen operar bajo cargas cíclicas complejas y donde la integridad estructural es crítica.

El avance en la comprensión de la interacción entre las tensiones inducidas por el contacto y la evolución del daño superficial abre nuevas posibilidades para la optimización de los diseños. Los métodos numéricos desarrollados pueden aplicarse para evaluar diferentes materiales y recubrimientos, lo que podría llevar a la selección de soluciones más eficientes y duraderas. Además, las herramientas de simulación presentadas pueden integrarse en sistemas de monitoreo en tiempo real, contribuyendo a la predicción y prevención de fallas en componentes críticos.

El grado de incertidumbre de los resultados de modelos de fatiga tiene un gran impacto en su aplicabilidad en sectores industriales como el automotriz, aeroespacial y ener-

gético. La fatiga es un fenómeno estadístico por naturaleza. Incluso en condiciones controladas, dos muestras idénticas pueden fallar tras un número de ciclos muy distinto. Por eso, desviaciones dentro de bandas $\pm 2N$ (o un factor de 2 en vida) suelen considerarse tolerables. A medida que el nivel de dispersión aumenta, la confianza en la predicción de vida útil disminuye.

En contextos industriales, por ejemplo en el sector automotriz, los componentes están sometidos a millones de ciclos (alto ciclaje), pero con niveles de carga moderados. Se acepta cierta dispersión si se mantiene el costo bajo y se trabaja con niveles de confiabilidad del orden de 99 %. En el sector aeroespacial, los márgenes son mucho más conservadores; una alta dispersión en resultados experimentales puede invalidar un modelo, pues las tolerancias a falla son mínimas. Se requieren altas confiabilidades estadísticas ($> 99.9\%$), por lo que modelos con alta dispersión no son aplicables sin factores de seguridad importantes o pruebas adicionales.

G. CONSIDERACIONES SOBRE LA ROBUSTEZ DEL MODELO

El modelamiento computacional aplicado a la fatiga por ludimiento representa un enfoque útil para la predicción del comportamiento estructural en condiciones de contacto cíclico. No obstante, como todo modelo, su validez y utilidad están condicionadas por un conjunto de supuestos y limitaciones que deben ser evaluadas con rigor. La robustez del modelo no solo se refiere a su precisión en condiciones definidas, sino también a su capacidad de mantener consistencia y confiabilidad ante la variabilidad presente en los sistemas reales.

Una de las primeras consideraciones es el tratamiento del contacto. En muchos casos, los modelos de contacto se implementan con formulaciones simplificadas que no capturan adecuadamente la complejidad del fenómeno. Por ejemplo, la transición entre las fases de adherencia (*stick*) y deslizamiento (*slip*), que es fundamental para describir correctamente el comportamiento en fatiga por ludimiento, puede verse limitada si se emplean modelos con fricción constante o sin dependencia de parámetros como la velocidad, la presión o el desgaste. Estas simplificaciones pueden afectar la predicción de la vida útil de componentes en aplicaciones prácticas.

Otro aspecto relevante se relaciona con la fidelidad geométrica. En la práctica, los modelos suelen utilizar geometrías idealizadas o simplificadas para reducir los requerimientos computacionales. Si bien esta estrategia es válida en etapas iniciales de análisis, puede comprometer la representatividad de los resultados cuando se trata de componentes con detalles geométricos, texturas superficiales o tratamientos que influyen en el comportamiento local. Esta limitación plantea la necesidad de validar el modelo en geometrías reales o representaciones más detalladas, especialmente cuando se requiere precisión en la localización del daño.

El modelo también presenta sensibilidad a las condiciones de frontera y de carga. Modificaciones en los valores o distribuciones de carga, o en la forma como se definen las restricciones, pueden producir variaciones en la ubicación de zonas críticas de daño. Este comportamiento es importante en sistemas con concentraciones de esfuerzo, como uniones atornilladas o ensamblajes con tolerancias ajustadas. Por esta razón, se recomienda validar cuidadosamente las condiciones de entrada y, en lo posible, apoyarse en datos experimentales o históricos.

En términos de parámetros materiales, la precisión de los resultados depende de la calidad de la información disponible. Las propiedades elásticas, plásticas y tribológicas deben estar bien caracterizadas, ya que su variabilidad influye directamente en la respuesta estructural. En contextos donde los materiales presentan anisotropía, heterogeneidad microestructural o historial de cargas, los modelos con propiedades promedio pueden no ser suficientes. En estos casos, se puede recurrir a enfoques probabilísticos o de confiabilidad estructural para mejorar la representación del comportamiento del material.

También se debe considerar la dificultad para representar mecanismos de daño concurrentes. En condiciones operativas, la fatiga por ludimiento puede coexistir con procesos como el desgaste abrasivo, la oxidación, la corrosión o la degradación térmica. Aunque integrar todos estos mecanismos en un único modelo es complejo, su influencia sobre el comportamiento estructural es significativa. La ausencia de esta consideración puede limitar la validez del modelo en aplicaciones específicas o en ambientes agresivos.

Respecto a la eficiencia computacional, los modelos tridimensionales con múltiples contactos y leyes de fricción no lineales requieren tiempos de cálculo considerables. Esto puede dificultar su uso en procesos de diseño iterativo o análisis de múltiples escenarios. Para hacer frente a esta situación, se pueden emplear técnicas como el submodelado, la

paralelización de procesos o la reducción de orden, con el objetivo de lograr un balance entre detalle numérico y eficiencia en el tiempo de ejecución.

La robustez también implica repetibilidad y estabilidad del modelo ante cambios en los parámetros. Los estudios de sensibilidad permiten identificar los parámetros más influyentes y comprender cómo interactúan entre sí. Esta información es útil para mejorar el modelo, definir experimentos de validación, seleccionar materiales o desarrollar políticas de mantenimiento. En particular, el análisis de interacciones puede revelar comportamientos no lineales o umbrales críticos que no son evidentes en análisis aislados.

Finalmente, el modelo debe ser integrable en esquemas de análisis más amplios, como estudios de confiabilidad, evaluaciones de ciclo de vida o simulaciones en entornos variables. Esta capacidad de adaptación es relevante para su aplicación práctica en proyectos de ingeniería, donde las condiciones cambian con el tiempo o se requiere actualización frecuente del modelo con base en nueva información experimental o de operación.

En conjunto, la robustez del modelo depende de múltiples factores, entre ellos su formulación, sus parámetros de entrada, su eficiencia computacional y su capacidad de integración. Reconocer las limitaciones, caracterizar la sensibilidad y validar los resultados de forma continua son prácticas necesarias para su aplicación responsable en el ámbito técnico.

1) Proyecciones futuras: Los modelos computacionales desarrollados para el estudio de la fatiga por ludimiento pueden proyectarse hacia múltiples áreas de aplicación en sectores industriales y de investigación. Su capacidad para predecir zonas de daño, ciclos de nucleación de grietas y trayectorias de propagación los convierte en herramientas útiles tanto en etapas de diseño como en procesos de mantenimiento.

En la industria automotriz, este tipo de modelos puede utilizarse en el análisis de componentes sometidos a cargas dinámicas, como cigüeñales, bielas y cojinetes. En estos elementos, la interacción entre fricción, presión de contacto y ciclos de carga puede conducir al desarrollo progresivo de fisuras. Simulaciones que incorporan fricción variable y análisis multiaxial pueden apoyar decisiones relacionadas con el diseño geométrico, selección de materiales o implementación de tratamientos superficiales. Adicionalmente, se pueden aplicar en sistemas de frenos para predecir puntos de daño en discos y pastillas, y optimizar así la vida útil del conjunto.

En el sector aeroespacial, las uniones remachadas, pernos estructurales y componentes de turbina son susceptibles al daño por ludimiento debido a las condiciones de carga complejas y cambios térmicos constantes. El modelo puede ser empleado para evaluar el comportamiento a fatiga de estos elementos en distintos escenarios de operación, apoyando el diseño estructural y la definición de intervalos de inspección. Además, puede incorporarse en procesos de certificación estructural de nuevas configuraciones, especialmente en aeronaves que operan bajo altas exigencias mecánicas.

Dentro de la industria de generación de energía, los álabes de turbina, engranajes y rodamientos están expuestos a esfuerzos combinados y ciclos térmicos. En estos casos, los modelos de fatiga por ludimiento permiten estimar la vida útil residual, localizar zonas de riesgo y evaluar el efecto de variaciones en parámetros operativos. Esta información puede ser integrada en sistemas de mantenimiento predictivo para reducir tiempos de parada no programada, mejorar la confiabilidad operativa y planificar el reemplazo de componentes con base en su estado real.

En procesos de manufactura, las herramientas de corte experimentan fricción intensa y carga repetida, lo que puede inducir grietas por ludimiento. Aplicar estos modelos permite evaluar configuraciones de geometría, recubrimiento o material para mejorar el desempeño de las herramientas, incrementar su durabilidad y reducir costos asociados a su reposición. También puede contribuir en el desarrollo de metodologías de control de calidad para herramientas críticas.

Una línea emergente de aplicación se encuentra en los sistemas de gemelos digitales. Estos entornos virtuales permiten replicar el comportamiento de componentes físicos en tiempo real y pueden incorporar modelos de daño por fatiga para enriquecer su capacidad predictiva. Integrar modelos de ludimiento en gemelos digitales ofrece beneficios en la toma de decisiones operativas, en el diagnóstico anticipado de fallas y en la personalización de estrategias de mantenimiento para sistemas complejos.

La combinación con técnicas de aprendizaje automático puede incrementar el valor de estos modelos al permitir interpretaciones probabilísticas y detección de patrones no evidentes. Este enfoque puede ser particularmente útil en industrias que requieren monitoreo continuo de activos y donde la predictividad y la eficiencia del análisis son factores relevantes para la competitividad.

Adicionalmente, el modelo puede aplicarse al diseño de dispositivos médicos implantables, como prótesis articulares. En estos dispositivos, la fatiga por ludimiento puede comprometer su desempeño a largo plazo debido a la fricción constante con el hueso o el fluido sinovial. Utilizar simulaciones en fases de diseño puede ayudar a mejorar la biocompatibilidad, minimizar los riesgos de falla y optimizar la geometría para condiciones personalizadas según el paciente.

En el ámbito de la electrónica, muchos dispositivos portátiles contienen ensamblajes o componentes sometidos a vibraciones o impactos frecuentes. Estos pueden beneficiarse de análisis estructurales que consideren el ludimiento como posible mecanismo de degradación. El uso de modelos predictivos en etapas tempranas del diseño puede contribuir a aumentar la vida útil del producto, reducir la tasa de fallos y mejorar la percepción de calidad en el usuario final.

En general, las proyecciones del modelo abarcan desde aplicaciones en diseño estructural, monitoreo y mantenimiento, hasta la integración en plataformas inteligentes de análisis. Su utilidad depende no solo de su formulación matemática, sino también de su capacidad de adaptación a distintos contextos, escalas y requerimientos. Su evolución estará ligada a los avances en técnicas computacionales, acceso a datos experimentales y capacidad de integración con herramientas digitales de próxima generación.

H. RESUMEN

Este capítulo presenta los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas que incorporan un coeficiente de fricción variable, en comparación con enfoques tradicionales con fricción constante. Se analizan los efectos del coeficiente en la evolución del daño, la localización de zonas críticas y la trayectoria de propagación de grietas. Se muestran ejemplos donde la implementación computacional mejora la correlación con datos experimentales obtenidos en componentes reales.

Se destacan además los scripts desarrollados en Python para la automatización del análisis, la modificación de parámetros en bucle y la extracción de resultados del modelo FEM. Estas herramientas mejoran la eficiencia del proceso y permiten explorar múltiples escenarios de simulación. Finalmente, se discute la aplicabilidad de los modelos en contextos industriales como el transporte, la energía y la aeronáutica, así como su potencial

para ser extendidos hacia fenómenos acoplados como el desgaste, la corrosión y la interacción tribológica en condiciones reales de operación.

Cápítulo 5

Glosario

- **Amplitud de deslizamiento:** magnitud del movimiento relativo entre dos superficies en contacto sometidas a cargas cíclicas.
- **Análisis de esfuerzos:** evaluación de los esfuerzos internos generados en un material o componente debido a cargas externas.
- **Análisis multiescala:** técnica que permite estudiar el comportamiento mecánico considerando fenómenos en diferentes escalas.
- **Ciclo de vida útil:** conjunto de etapas que atraviesa un componente desde su diseño y fabricación hasta su retiro de servicio.
- **Coeficiente de fricción (CoF):** relación entre la fuerza de fricción y la fuerza normal entre dos superficies en contacto.
- **Coeficiente de fricción variable (VCoF):** modelo que permite que el coeficiente de fricción varíe con parámetros como presión, desgaste o velocidad.
- **Componente crítico:** elemento estructural cuya falla compromete la seguridad o funcionalidad global del sistema.
- **Condición de frontera:** restricción o carga aplicada a un modelo numérico para definir su comportamiento.
- **Contacto elástico:** interacción entre superficies donde las deformaciones desaparecen completamente al eliminarse la carga.

- **Contacto plástico:** contacto entre superficies que genera deformaciones permanentes al superar el límite elástico.
- **Contacto stick-slip:** alternancia entre adherencia (stick) y deslizamiento (slip) durante el contacto cíclico entre superficies.
- **Curva de Paris:** relación empírica que describe la velocidad de propagación de grietas por fatiga.
- **Criterio de Fatemi-Socie (FS):** modelo multiaxial de predicción de daño por fatiga basado en la deformación por cizallamiento.
- **Criterio Smith-Watson-Topper (SWT):** modelo que combina la tensión máxima y el rango de deformación normal para estimar la vida útil.
- **Daño acumulado:** proceso de deterioro progresivo en un material sometido a cargas repetitivas.
- **Deformación plástica:** cambio irreversible en la forma de un material cuando se excede su límite elástico.
- **Desgaste:** pérdida de material superficial debido a la interacción mecánica entre componentes.
- **Dinámica molecular:** método de simulación que modela el comportamiento de partículas a nivel atómico.
- **Elasticidad:** capacidad de un material para recuperar su forma tras cesar la carga aplicada.
- **Elemento finito:** unidad básica usada para discretizar un dominio en el método de elementos finitos (FEM).
- **Esfuerzo hidrostático:** componente del tensor de esfuerzos que representa un estado de compresión o tracción uniforme.
- **Fatiga:** proceso de daño estructural por cargas mecánicas repetidas en un material.
- **Fatiga multiaxial:** fatiga causada por estados de carga que actúan en varias direcciones simultáneamente.
- **Fatiga por ludimiento:** daño por fatiga asociado a deslizamientos cíclicos de baja amplitud entre superficies en contacto.

- **FEM (Finite Element Method):** método numérico para resolver ecuaciones aplicadas a problemas físicos mediante discretización.
- **Fricción:** fuerza que se opone al movimiento relativo entre dos superficies en contacto.
- **Fractomecánica:** rama de la mecánica de sólidos que estudia la formación y propagación de grietas.
- **Grieta crítica:** longitud de grieta a partir de la cual puede generarse un fallo estructural.
- **Grieta superficial:** fisura en la superficie del componente, generada por concentración de esfuerzos.
- **Hot spot:** zona localizada de concentración de esfuerzos o daño, crítica para la iniciación de grietas.
- **Kitagawa-Takahashi:** relación entre longitud de grieta y umbral de crecimiento en materiales sometidos a fatiga.
- **Ley de Paris:** modelo empírico que describe la tasa de crecimiento de una grieta.
- **Longitud de grieta:** medida física de la extensión de una grieta desde su punto de origen.
- **Material isótropo:** material con propiedades mecánicas iguales en todas las direcciones.
- **Mecánica del contacto:** estudio del comportamiento de cuerpos que interactúan por fuerzas normales y tangenciales.
- **Micropitting:** desgaste superficial asociado a la formación de microgrietas en zonas de contacto repetido.
- **Microestructura:** organización interna del material a escala microscópica.
- **Modelo de El Haddad:** extensión del modelo de Kitagawa-Takahashi que introduce una longitud de transición.
- **Modelo numérico:** representación matemática de un sistema físico para su simulación computacional.

- **Modelado del contacto:** proceso de definir la interacción entre superficies en modelos FEM.
- **Nucleación de grietas:** fase inicial en la que se forman microfisuras en el material por fatiga.
- **Orientación de grieta:** dirección en la que una grieta se propaga según el estado de esfuerzos locales.
- **Parámetro de daño:** variable que cuantifica el deterioro del material debido a carga cíclica.
- **Plano crítico:** plano donde las condiciones de carga maximizan la probabilidad de nucleación de grietas.
- **Postprocesamiento:** análisis posterior a la simulación para interpretar los resultados numéricos.
- **Presión de contacto:** distribución de fuerza normal por unidad de área entre dos superficies en contacto.
- **Propagación de grietas:** crecimiento de una grieta desde su nucleación hasta alcanzar dimensiones críticas.
- **Sensibilidad del modelo:** grado de variación en la respuesta de un modelo ante cambios en sus parámetros de entrada.
- **Simulación computacional:** análisis del comportamiento de sistemas físicos usando algoritmos numéricos.
- **Stick-slip:** fenómeno de alternancia entre adherencia y deslizamiento en contactos con fricción.
- **Subrutina (Simulia Abaqus):** bloque de código externo que personaliza el modelo en simulaciones, escrito en Fortran o Python.
- **Tribología:** ciencia que estudia la fricción, lubricación y desgaste entre superficies en contacto.
- **Zona cohesiva:** modelo utilizado en simulaciones numéricas para representar la iniciación y evolución de grietas mediante una relación no lineal entre esfuerzo y desplazamiento.

Referencias

- [1] D. Dini and T. Liskiewicz, "Brief history of the subject," in *Fretting Wear and Fretting Fatigue*. Elsevier, 2023, pp. 3–24. [13](#), [29](#)
- [2] H. Hertz, *Miscellaneous Paper by Heinrich Hertz*. Macmillan & Co, 1896. [15](#)
- [3] C. Cattaneo, "Sul contatto di due corpi elastici: Distribuzione locale degli sforzi," *Rendiconti dell'Accademia Nazionale dei Lincei*, vol. 27, pp. 342–348, 1938. [15](#)
- [4] R. D. Mindlin, "Compliance of elastic bodies in contact," *ASME Journal of Applied Mechanics*, vol. 16, no. 3, pp. 259–268, 1949. [15](#)
- [5] N. A. Bhatti and M. Abdel Wahab, "A numerical investigation on critical plane orientation and initiation lifetimes in fretting fatigue under out of phase loading conditions," *Tribology International*, vol. 115, pp. 307–318, 2017. [15](#)
- [6] D. Erena, J. Vázquez, C. Navarro, and J. Domínguez, "Voids as stress relievers and a palliative in fretting," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 41, no. 12, pp. 2475–2484, 2018. [15](#)
- [7] D. Infante-García, E. Giner, H. Miguélez, and M. Abdel Wahab, "Numerical analysis of the influence of micro-voids on fretting fatigue crack initiation lifetime," *Tribology International*, vol. 135, pp. 121–129, 2019. [15](#), [29](#)
- [8] G. M. J. Almeida, R. A. Cardoso, G. Chassaing, S. Pommier, and J. A. Araújo, "Fretting fatigue of inconel 718 at room and elevated temperatures considering both constant and cyclic normal contact loads," *Tribology International*, vol. 183, p. 108382, 2023. [15](#)
- [9] B. Dieu, S. Fouvry, V. Doquet, and F. Bridier, "Predicting fretting-fatigue endurance of rotating bending shrink-fitted assemblies using a sequential ruiz-swt approach: The effect of entrapped debris layer," *Tribology International*, vol. 186, p. 108593, 2023. [15](#)

- [10] C. T. Kouanga, J. D. Jones, I. Revill, A. Wormald, D. Nowell, R. S. Dwyer-Joyce, and L. Susmel, "A variable amplitude fretting fatigue life estimation technique: Formulation and experimental validation," *Tribology International*, vol. 178, p. 108055, 2023. [15](#)
- [11] M. Moreno-Rubio, J. Vázquez, C. Navarro, and J. Domínguez, "Experimental study on the fretting fatigue of inconel 718 superalloy," *Tribology International*, vol. 186, p. 108637, 2023. [15](#)
- [12] A. L. Pinto, G. M. J. Almeida, R. Talemi, and J. A. Araújo, "Fretting fatigue under variable amplitude shear loading blocks considering partial slip regime: Experimental/numerical analysis," *Tribology International*, vol. 182, p. 108367, 2023. [15](#)
- [13] C. Wang, K. Fan, C. Li, and M. Abdel Wahab, "Prediction of the effect of shot peening residual stress on fretting fatigue behaviour," *Tribology International*, vol. 176, p. 107909, 2023. [15](#)
- [14] T. Xu, L. Lu, D. Zeng, and L. Zou, "Fretting fatigue crack growth simulation and residual life assessment of railway press-fitted axle," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 286, p. 109290, 2023. [16](#)
- [15] D. Zeng, Y. Zhang, L. Lu, L. Zou, and S. Zhu, "Fretting wear and fatigue in press-fitted railway axle: A simulation study of the influence of stress relief groove," *International Journal of Fatigue*, vol. 118, pp. 225–236, 2019. [16](#)
- [16] L. Zou, D. Zeng, Y. Dong, J. Li, X. Chen, H. Zhao, and L. Lu, "Experimental and numerical study on the fretting wear-fatigue interaction evolution in press-fitted axles," *International Journal of Fatigue*, vol. 175, p. 107793, 2023. [16](#)
- [17] S. Montalvo, S. Fouvry, and M. Martinez, "A hybrid analytical-fem 3d approach including wear effects to simulate fretting fatigue endurance: Application to steel wires in crossed contact," *Tribology International*, vol. 187, p. 108713, 2023. [16](#)
- [18] H. Asgaribakhtiari, G. H. Majzoobi, and H. Elmkhah, "On the effect of cr/crn nanolayered coating deposited by arc-pvd method on axial fretting fatigue behavior of al7075-t6 alloy," *Surface and Coatings Technology*, vol. 454, p. 129176, 2023. [16](#)
- [19] X. X. Wang, X. C. Ping, X. Zeng, R. J. Wang, Q. Zhao, S. J. Ying, and T. Hu, "Fretting fatigue experiment and simulation of wc-12co coating taking into account the wear effects," *Surface and Coatings Technology*, vol. 441, p. 128555, 2022. [16](#), [94](#)

- [20] D. Dini and T. Liskiewicz, *Fretting wear and fretting fatigue - Fundamental principles and applications*. Países Bajos: Elsevier, 2023. 18
- [21] D. A. Hills and D. Nowell, *Mechanics of Fretting Fatigue*. Springer, 1994. 18
- [22] T. Hattori, *Fretting Wear, Fretting Fatigue and Damping of Structures: Design Engineering Hand Book Learned from Failure Cases*. Springer, 2024. 18
- [23] N. A. Bhatti and M. A. Wahab, “Fretting fatigue crack nucleation: a review,” *Tribology International*, vol. 121, pp. 121–138, 2018. 29
- [24] S. E. Kinyon, D. W. Hoepfner, and Y. Mutoh, *Fretting fatigue: Advances in the basic understanding and applications*. USA: ASTM International, 2003. 29
- [25] L. SUSMEL and D. TAYLOR, “A novel formulation of the theory of critical distances to estimate lifetime of notched components in the medium-cycle fatigue regime,” *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 30, no. 7, pp. 567–581, 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01122.x> 32
- [26] C. Navarro, S. Muñoz, and J. Domínguez, “On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment,” *International Journal of Fatigue*, vol. 30, no. 1, pp. 32–44, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.02.018> 33
- [27] D. Erena, V. Martín, J. Vázquez, and C. Navarro, “Influence of the rolling of contact pads on crack initiation in fretting fatigue tests,” *International Journal of Fatigue*, vol. 163, p. 107087, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107087> 81, 82
- [28] N. D. Molina, L. V. V. Useche, C. A. Mesa, C. Wang, L. Wang, and M. A. Wahab, “Fretting fatigue crack nucleation analysis under a variable coefficient of friction,” *Tribology International*, vol. 194, p. 109558, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109558> 82
- [29] Q. Deng, N. A. Bhatti, X. Yin, and M. Abdel Wahab, “The effect of a critical micro-void defect on fretting fatigue crack initiation in heterogeneous material using a multiscale approach,” *Tribology International*, vol. 141, p. 105909, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105909> 95
- [30] N. A. Bhatti, K. Pereira, and M. Abdel Wahab, “Effect of stress gradient and quadrant averaging on fretting fatigue crack initiation angle and life,”

- Tribology International*, vol. 131, pp. 212–221, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.036> 100
- [31] C. Wang, C. Li, Y. Ling, and M. A. Wahab, “Investigation on fretting fatigue crack initiation in heterogeneous materials using a hybrid of multiscale homogenization and direct numerical simulation,” *Tribology International*, vol. 169, May 2022. 100
- [32] A. F. H. Úsuga, L. V. V. Useche, C. A. M. Montoya, C. Wang, and M. A. Wahab, “Effect of pad rotation angle and coefficient of friction on fretting fatigue crack nucleation behavior,” *Tribology International*, vol. 189, p. 109012, 2023.
- [33] I. Llavori, E. Giner, A. Zabala, D. Infante-Garcia, A. Aginagalde, N. Rodriguez-Florez, and X. Gomez, “Critical analysis of the suitability of crack propagation direction criteria for 2d cylindrical plain fretting contact,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 214, pp. 534–543, 2019.
- [34] I. Llavori *et al.*, “crack propagation direction criteria for 2d cylindrical plain fretting contact. engineering fracture mechanics, v. 214, pp.: 534-543.” 2019.
- [35] R. Alderliesten, “Critical review on the assessment of fatigue and fracture in composite materials and structures,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 35, pp. 370–379, 2013.
- [36] F. Abbasi, G. Majzoobi, and J. Mendiguren, “A review of the effects of cyclic contact loading on fretting fatigue behavior,” *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 9, p. 1687814020957175, 2020.
- [37] R. Bill, “Review of factors that influence fretting wear,” *Materials evaluation under fretting conditions*, 1982.
- [38] T. Yue and M. A. Wahab, “Roughness effects on fretting fatigue,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 843, no. 1. IOP Publishing, 2017, p. 012056.
- [39] H. Fadag, S. Mall, and V. Jain, “A finite element analysis of fretting fatigue crack growth behavior in ti–6al–4v,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, no. 6, pp. 1384–1399, 2008.
- [40] X. Qiu, X. Wei, X. Xu, W. Xu, and M. Zhu, “Dependence of fretting wear resistance on microstructural features of alloyed steels,” *Tribology International*, vol. 137, pp. 39–45, 2019.

- [41] J. Li, Y. Lu, X. Tu, and W. Li, "The effects of subsurface microstructure evolution on fretting wear resistance of nickel-based alloy," *Wear*, vol. 416, pp. 81–88, 2018.
- [42] A. S. Sharma, K. Biswas, and B. Basu, "Microstructure-hardness-fretting wear resistance correlation in ultrafine grained cu–tib2–pb composites," *Wear*, vol. 319, no. 1-2, pp. 160–171, 2014.
- [43] O. Jin, S. Mall, and O. Sahan, "Fretting fatigue behavior of ti–6al–4v at elevated temperature," *International journal of fatigue*, vol. 27, no. 4, pp. 395–401, 2005.
- [44] O. Sahan, "Fretting fatigue behavior of a titanium alloy ti-6al-4v at elevated temperature," 2002.
- [45] H. Lee, O. Jin, and S. Mall, "Fretting fatigue behaviour of shot-peened ti-6al-4v at room and elevated temperatures," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 26, no. 9, pp. 767–778, 2003.
- [46] N. D. Molina, L. V. V. Useche, C. A. Mesa, C. Wang, L. Wang, and M. A. Wahab, "Fretting fatigue crack nucleation analysis under a variable coefficient of friction," *Tribology International*, vol. 194, p. 109558, 2024.
- [47] S. L. Sunde, F. Berto, and B. Haugen, "Predicting fretting fatigue in engineering design," *International Journal of Fatigue*, vol. 117, pp. 314–326, 2018.
- [48] B. Alfredsson and A. Cadario, "A study on fretting friction evolution and fretting fatigue crack initiation for a spherical contact," *International journal of fatigue*, vol. 26, no. 10, pp. 1037–1052, 2004.
- [49] R. Hojjati-Talemi, M. A. Wahab, J. De Pauw, and P. De Baets, "Prediction of fretting fatigue crack initiation and propagation lifetime for cylindrical contact configuration," *Tribology International*, vol. 76, pp. 73–91, 2014.
- [50] C. Navarro, S. Muñoz, and J. Dominguez, "On the use of multiaxial fatigue criteria for fretting fatigue life assessment," *International Journal of fatigue*, vol. 30, no. 1, pp. 32–44, 2008.
- [51] J. Madge, S. Leen, I. McColl, and P. Shipway, "Contact-evolution based prediction of fretting fatigue life: effect of slip amplitude," *Wear*, vol. 262, no. 9-10, pp. 1159–1170, 2007.

- [52] T. Hattori, V. T. Kien, and M. Yamashita, "Fretting fatigue life estimations based on fretting mechanisms," *Tribology International*, vol. 44, no. 11, pp. 1389–1393, 2011.
- [53] R. B. Waterhouse, "Fretting fatigue," *International materials reviews*, vol. 37, no. 1, pp. 77–98, 1992.
- [54] T. Lindley, "Fretting fatigue in engineering alloys," *International journal of fatigue*, vol. 19, no. 93, pp. 39–49, 1997.
- [55] F. Shen, W. Hu, and Q. Meng, "A damage mechanics approach to fretting fatigue life prediction with consideration of elastic–plastic damage model and wear," *Tribology International*, vol. 82, pp. 176–190, 2015.
- [56] T. Hattori, M. Nakamura, H. Sakata, and T. Watanabe, "Fretting fatigue analysis using fracture mechanics," *JSME international journal. Ser. 1, Solid mechanics, strength of materials*, vol. 31, no. 1, pp. 100–107, 1988.
- [57] D. Nowell and D. Nowell, "An analysis of fretting fatigue," Ph.D. dissertation, University of Oxford, 1988.
- [58] A. Giannakopoulos and S. Suresh, "A three-dimensional analysis of fretting fatigue," *Acta Materialia*, vol. 46, no. 1, pp. 177–192, 1998.
- [59] T. Lindley, "Fretting fatigue in engineering alloys," *International journal of fatigue*, vol. 19, no. 93, pp. 39–49, 1997.
- [60] M. P. Szolwinski and T. N. Farris, "Observation, analysis and prediction of fretting fatigue in 2024-t351 aluminum alloy," *Wear*, vol. 221, no. 1, pp. 24–36, 1998.
- [61] D. A. Hills, D. Nowell, and A. Sackfield, "Surface fatigue considerations in fretting," in *Tribology Series*, 1987, pp. 35–40.
- [62] S. A. Namjoshi, S. Mall, V. K. Jain, and O. Jin, "Fretting fatigue crack initiation mechanism in ti-6al-4v," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 25, no. 10, pp. 955–964, Oct. 2002.
- [63] M. P. Szolwinski and T. N. Farris, "Mechanics of fretting fatigue crack formation," *Wear*, vol. 198, no. 1–2, pp. 93–107, Oct. 1996.

- [64] A. Fatemi and D. F. Socie, "A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out-of-phase loading," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 11, no. 3, pp. 149–165, Mar. 1988.
- [65] W. N. Findley, "A theory for the effect of mean stress on fatigue of metals under combined torsion and axial load or bending," *Journal of Engineering for Industry*, vol. 81, no. 4, pp. 301–305, Nov. 1959.
- [66] K. Pereira and M. A. Wahab, "Fretting fatigue crack propagation lifetime prediction in cylindrical contact using an extended mts criterion for non-proportional loading," *Tribology International*, vol. 115, pp. 525–534, 2017.
- [67] N. A. Bhatti and M. Abdel Wahab, "A numerical investigation on critical plane orientation and initiation lifetimes in fretting fatigue under out of phase loading conditions," *Tribology International*, vol. 115, pp. 307–318, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.05.036>

Este libro presenta un análisis riguroso y actualizado sobre la fatiga por ludimiento, un fenómeno crítico que compromete el diseño y la integridad estructural de componentes sometidos a cargas cíclicas y contactos localizados. A partir de una revisión detallada del estado del arte, el texto desarrolla los principios mecánicos que gobiernan la interacción entre fricción, contacto y daño acumulativo en materiales metálicos.

Se introducen herramientas avanzadas de modelado computacional, con especial énfasis en el método de los elementos finitos (FEM) y la implementación de subrutinas personalizadas para simular comportamientos tribológicos complejos. El libro incluye además estudios de caso representativos e ideas metodológicas sobre diseño experimental y validación de modelos numéricos.

Está dirigido a estudiantes de posgrado, investigadores y profesionales en ingeniería mecánica, integridad estructural, diseño de sistemas mecánicos y análisis computacional que buscan comprender y mitigar los mecanismos de daño inducidos por contacto oscilatorio.

Esta obra constituye un aporte significativo al campo de la ingeniería de fatiga, al conectar fundamentos teóricos con herramientas modernas de simulación, promoviendo la transferencia de conocimiento hacia aplicaciones tanto industriales como académicas.