



# UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA  
MECÁNICA

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN  
FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA  
EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AISI-SAE 6061-T6,  
CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN  
LA SUPERFICIE”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA**

PRESENTA:

***ING. VÍCTOR HUGO MERCADO LEMUS***

ASESOR:

***DR. GONZALO M. DOMÍNGUEZ ALMARAZ***

**MORELIA, MICHOACÁN, ABRIL 2011**



**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

**RESUMEN**

Este trabajo está relacionado con ensayos de fatiga en flexión rotativa en la aleación de aluminio nominación AISI-SAE 6061-T6, bajo condiciones de carga provocando esfuerzos cercanos al límite elástico del material. Se han llevado a cabo ensayos sobre 3 diferentes probetas: probetas sin “pitting” (huecos hemisféricos), con un solo hueco y con 2 huecos cercanos. Los resultados muestran que la vida en fatiga con probetas teniendo un solo hueco se reduce sensiblemente; y esta reducción es más pronunciada, cuando se ensayan probetas con dos huecos cercanos. Para poder explicar este comportamiento, varias simulaciones con elemento finito fueron realizadas con el propósito de determinar la concentración de esfuerzos en los tres tipos de ensayos. De los resultados numéricos se obtuvo que la concentración de esfuerzos para dos huecos cercanos es una función exponencial de la separación entre ellos, bajo una carga uniaxial [1]. Este resultado es una contribución importante del trabajo de tesis de Maestría que hemos publicado en revistas internacionales con estricto arbitraje. Desde el punto de vista industrial, la probabilidad de encontrar dos o más huecos cercanos en materiales, como pueden ser en hierro fundido, materiales expuestos a corrosión y otros, es alta. Luego entonces, para materiales industriales presentando huecos o perforaciones superficiales, el estudio de la concentración de esfuerzos es de principal importancia para obtener los valores experimentales de la resistencia en fatiga y proponer modelos matemáticos de predicción de la vida en fatiga.

## ABSTRACT

This work deals with rotating bending fatigue tests on aluminum alloy AISI-SAE 6061-T6, under loading condition close to elastic limit of material. Results have been obtained for three types of specimens: without artificial pitting, specimens with one artificial pitting hole and specimens with two close artificial pitting holes. Results show that fatigue endurance is reduced in the case of one pitting hole and considerably for two close pitting holes. In order to explain this behavior, numerical analysis by FE were carried out to determine the stress concentrations for the three types of specimens. It is found that the stress concentration for two close pitting holes is an exponential function of the separation between the two holes, under uniaxial loading [1]. This result is an important contribution of the work of thesis of Master that we have published in international magazines with strict arbitration. From the industrial point of view, the probability to find two or more close pitting holes in real industrial materials, such as cast iron, corroded or pitting metallic alloys is high; Then, for industrial materials presenting holes or superficial perforations, the study of the stress concentration is of main importance to obtain the experimental values of the resistance in fatigue and to propose mathematical models of prediction of the life in fatigue.

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
NOMENCLATURA.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
ANTECEDENTES.....	10
JUSTIFICACIÓN.....	14
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
HIPÓTESIS.....	15
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>TEORÍA ALUSIVA</b>	
1.1 Teoría alusiva.....	16
1.1.1 Fallas mecánicas.....	16
1.1.2 Tipos de fallas mecánicas.....	17
1.1.3 Consideraciones importantes en el diseño de fatiga.....	18
1.2 Elegir el modelo de vida por fatiga es una decisión significativa.....	19
1.2.1 Estrategias en el diseño de la fatiga.....	20
1.2.2 Criterios de diseño de fatiga.....	21
1.2.2.1 Diseño de vida finita.....	21
1.2.2.2 Diseño de vida segura.....	22
1.2.2.3 Diseño de seguridad.....	22
1.2.2.4 Diseño daño tolerancia.....	23
1.2.3 Análisis y prueba.....	23
1.2.4 Confiabilidad probabilística del diseño.....	26
1.2.5 Ingeniería asistida por computadora y prototipos digitales.....	26
1.2.6 Inspección de entrada en servicio y adquisición de experiencia relevante.....	26
1.3 Macro-micro aspectos de la fatiga en metales.....	27
1.3.1 Superficies de la fractura por falla y características microscópicas..	28
1.4 Fatiga mecánica de materiales.....	32
1.4.1 Fases de un fallo por fatiga.....	33
1.4.2 Factores que intervienen en un proceso de rotura por fatiga.....	34
1.4.2.1 Diseño.....	34
1.4.2.2 Tratamientos superficiales.....	35
1.4.2.3 Endurecimiento superficial.....	35
1.4.3 Curvas S-N.....	35
1.4.4 Parámetros característicos.....	36

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

**CAPÍTULO II**

**CARACTERÍSTICAS DE LOS ENSAYOS**

2.1 Probeta (Aluminio AISI SAE 6061-T6).....	38
2.2 Material de prueba.....	38

**CAPÍTULO III**

**ENSAYOS EXPERIMENTALES**

3.1 Metodología.....	41
3.2 Simulación Numérica.....	42
3.3 Dimensiones de los pittings.....	45
3.4 Factores importantes para la obtención de resultados.....	53

**CAPÍTULO IV**

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1 Resultados.....	55
4.2 Análisis sobre las superficies de fractura.....	61
4.2.1 Probeta sin pitting.....	61
4.2.2 Probeta con 1 pitting.....	62
4.2.3 Probeta con 2 pittings cercanos.....	63
4.2.4 Probeta con 2 pittings cercanos mismos diámetros (1000µm).....	64
4.2.5 Probeta con 2 pittings cercanos diferentes diámetros (1000µm-800µm).....	65

CONCLUSIONES.....	67
-------------------	----

BIBLIOGRAFÍA.....	68
-------------------	----

**ANEXO I**

Artículos en revistas indexadas, congresos nacionales e internacionales realizados durante el desarrollo de la tesis.....	72
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Prueba integral de fatiga en carretera de un automóvil.....	25
<b>Figura 1.2</b>	Superficie típica de fractura por fatiga.....	28
<b>Figura 1.3</b>	Acercamiento de la forma de la fisura por fatiga.....	30
<b>Figura 1.4</b>	Superficies de fracturas por fatiga para cargas axiales y flexiones, (a) especímenes redondos, (b) espécimen de hoja o de placa.....	31
<b>Figura 1.5</b>	Diferentes patrones de la grieta encontrados comúnmente en fatiga por torsión.....	32
<b>Figura 1.6</b>	Fases de un fallo por fatiga.....	34
<b>Figura 1.7</b>	Típico diagrama: Tensión Vs. Número de Ciclos.....	36
<b>Figura 2.1</b>	Dimensiones de la probeta (mm).....	38
<b>Figura 3.1</b>	Simulación Numérica: a) Probeta sin pitting, b) sección transversal de la probeta sin pitting, c) Probeta 1 solo pitting y d) distribución de esfuerzos en la probeta con 2 pittings cercanos.....	43
<b>Figura 3.2</b>	Simulación numérica para una probeta con 2 huecos cercanos, mismos diámetros (1mm), en dirección transversal y separados 100 $\mu$ m.....	44
<b>Figura 3.3</b>	Figura 3.3 Simulación numérica para una probeta con 2 huecos cercanos, diferentes diámetros (1mm-0.8mm), en dirección longitudinal y separados 100 $\mu$ m.....	44
<b>Figura 3.4</b>	Dimensiones de las Probetas con 1 solo pitting.....	45
<b>Figura 3.5</b>	Dimensiones de la separación entre las probetas con 2 pittings cercanos.....	45
<b>Figura 3.6</b>	Dimensiones de las probetas 2 pittings diámetros diferentes (800-1000 $\mu$ m).....	46
<b>Figura 3.7</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 100 $\mu$ m en dirección longitudinal.....	46
<b>Figura 3.8</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 100 $\mu$ m en dirección transversal.....	47
<b>Figura 3.9</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 200 $\mu$ m en dirección longitudinal.....	47
<b>Figura 3.10</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 200 $\mu$ m en dirección transversal.....	48
<b>Figura 3.11</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 300 $\mu$ m en dirección longitudinal.....	48
<b>Figura 3.12</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 300 $\mu$ m en dirección transversal.....	49
<b>Figura 3.13</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 400 $\mu$ m en dirección longitudinal.....	49
<b>Figura 3.14</b>	Distancias de separación en pittings iguales (1000 $\mu$ m) separados 400 $\mu$ m en dirección transversal.....	50
<b>Figura 3.15</b>	Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 $\mu$ m) separados 100 $\mu$ m en dirección longitudinal.....	50
<b>Figura 3.16</b>	Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 $\mu$ m) separados 200 $\mu$ m en dirección longitudinal.....	51
<b>Figura 3.17</b>	Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 $\mu$ m) separados 200	

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

μm en dirección transversal.....	51
<b>Figura 3.18</b> Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 μm) separados 300 μm en dirección longitudinal.....	52
<b>Figura 3.19</b> Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 μm) separados 300 μm en dirección transversal.....	52
<b>Figura 3.20</b> Ecuación para determinar el factor de concentrador de esfuerzos para un solo pitting.....	53
<b>Figura 3.21</b> Ecuación para determinar el factor de concentrador de esfuerzos para dos pittings cercanos.....	53
<b>Figura 3.22</b> Variantes de relación S y r .....	53
<b>Figura 3.23</b> Gráfica para determinar el factor de concentrador de esfuerzos en función de S/r.....	54
<b>Figura 4.1</b> Gráfica de la resistencia a la fatiga de los diferentes tipos de ensayos.....	56
<b>Figura 4.2</b> Evolución de la vida en fatiga para 2 huecos con mismos diámetros (1000μm).....	58
<b>Figura 4.3</b> Evolución de la vida en fatiga para 2 huecos con diferentes diámetros (1000μm-800μm).....	60
<b>Figura 4.4</b> Imagen frontal de la superficie de fractura de la Probeta No. 2.....	61
<b>Figura 4.5</b> Imagen lateral de la superficie de fractura de la Probeta No. 2.....	61
<b>Figura 4.6</b> Imagen frontal de la superficie de fractura de la Probeta No. 16.....	62
<b>Figura 4.7</b> Imagen lateral de la superficie de fractura de la Probeta No. 16.....	62
<b>Figura 4.8</b> Imagen frontal de la superficie de fractura de la Probeta No. 39.....	63
<b>Figura 4.9</b> Imagen lateral de la superficie de fractura de la Probeta No. 39.....	63
<b>Figura 4.10</b> Superficies de fractura para 2 huecos iguales separados 100μm en dirección transversal a) y longitudinal b).....	64
<b>Figura 4.11</b> Superficies de fractura para 2 huecos diferentes separados 100μm en dirección transversal a) y longitudinal b).....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Composición química de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061 – T6.....	39
<b>Tabla 2.2</b> Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061 – T6.....	40
<b>Tabla 3.1</b> Tipo y cantidad de ensayos a realizar.....	41
<b>Tabla 3.2</b> Tipo y cantidad de ensayos a realizar para probetas con 2 pittings cercanos con diferentes distancias de separación, diferentes diámetros y diferentes posiciones (transversal, longitudinal).....	41
<b>Tabla 4.1</b> Parámetros experimentales y resultados.....	55
<b>Tabla 4.2</b> Parámetros experimentales y resultados para 2 pittings cercanos mismos diámetros (1000μm).....	57
<b>Tabla 4.3</b> Parámetros experimentales y resultados para 2 pittings cercanos diferentes diámetros (1000μm-800μm).....	59

## NOMENCLATURA

A continuación se describe la nomenclatura usada en esta tesis:

S.....	Esfuerzo.
N.....	Número de ciclos.
ASTM.....	American Society for Testing and Materials.
KPa.....	Kilo pascales.
AASHTO.....	American Association of State and Highway and Transportation Officials.
AISI .....	American Iron and Steel Institute.
SAE.....	Society of Automotive Engineers.
$\varepsilon$ .....	Deformación.
da/dN.....	Crecimiento de fisura.
$\Delta K$ .....	Factor de intensidad de esfuerzos.
ASME.....	American Society Of Mechanical Engineers.
in.....	Pulgadas.
Al.....	Aluminio.
Cr.....	Cromo.
Cu.....	Cobre.
Fe.....	Hierro.
Mg.....	Magnesio.
Mn.....	Manganeso.
Si.....	Silicio.
Ti.....	Titanio.
Zn.....	Zinc.
mm.....	Milímetros.
$\mu\text{m}$ .....	Micrómetros.
Pa.....	Pascales.
MPa.....	Mega pascales.
$K_t$ .....	Factor de Concentrador de Esfuerzos.
$\nu$ .....	Modulo de Poisson.
r.....	Radio.
Hz.....	Hertz.
$\sigma_n$ .....	Esfuerzo Nominal.
$\sigma_y$ .....	Esfuerzo de Cedencia.

## INTRODUCCIÓN

Las industrias que hoy en día se relacionan con la Ingeniería Mecánica, como son: la industria automotriz, la ferroviaria, la aeronáutica, las que se dedican a la generación y distribución de electricidad, la petrolera, las de aparatos eléctricos y electrónicos, entre muchas otras, han mejorado su ingeniería gracias al desarrollo continuo de nuevos materiales y a las mejoras de las propiedades mecánicas y físicas de los mismos [2, 3, 4, 5]. Es importante señalar que dichos elementos estructurales o sistemas a menudo están sometidos a cargas mecánicas oscilantes de alta frecuencia, las cuales alcanzan un alto número de ciclos, conduciendo a la condición de fatiga gigacíclica.

Entonces, es de particular importancia obtener experimentalmente resultados en fatiga de los materiales, para disminuir las fallas mecánicas y proponer modelos de predicción de vida en fatiga de estos materiales. Una de las tendencias actuales en las industrias modernas del transporte (aéreo, terrestre, marítimo) es invertir en investigación y desarrollo sobre las causas de falla y la resistencia en fatiga de elementos o sistemas mecánicos sometidos a cargas.

El criterio de resistencia mecánica actual nos ha orientado a conocer la resistencia a la fatiga de los materiales cuando se someten a un gran número de ciclos [6], y también en condiciones de corrosión; este es el caso en turbinas de gas, de vapor, en los motores de combustión interna, motores eléctricos, entre muchos otros equipos mecánicos.

## ANTECEDENTES

El primer gran impacto de las fallas debido a los esfuerzos repetidos fue en la industria ferroviaria: se puso en evidencia que las vías fallaban regularmente y se recomendó la eliminación de esquinas agudas para evitar la concentración de esfuerzos residuales [7].

El concepto "fatiga" fue introducida entre 1840 y el 1850 para describir las fallas que ocurrían por esfuerzos repetidos por debajo del límite elástico. Esta definición se utilizó para la descripción de la fractura en los trabajos llevados a cabo en Alemania durante las décadas de 1850 y 1860 por August Wohler, quien fue pionero en el estudio de la fatiga mecánica y realizó muchas pruebas en el laboratorio bajo esfuerzos repetidos. Dichos experimentos fueron orientados a las fallas de las vías férreas y se considera ser la primera investigación sistemática de la fatiga mecánica. Así, Wohler es llamado el "padre" de la prueba sistemática de fatiga. Usando los diagramas del esfuerzo contra el número de ciclos (S-N), él demostró que la vida en fatiga de algunos materiales disminuye cuando se incrementaba la amplitud de carga mecánica aplicada, por debajo de cierta amplitud de esfuerzo que podría considerarse éste último el inicio de la deformación plástica o permanente. Estos trabajos dieron origen al concepto del diagrama de esfuerzo-número de ciclos (S-N), y del límite de la fatiga. También precisó que el espectro de la carga mecánica aplicada juega un papel principal para definir la resistencia a la fatiga de los materiales [8].

Entre las décadas de 1870 y 1890, se adicionaron investigaciones ampliando y verificando el trabajo clásico de Wohler. Gerber, y otros investigadores estudiaron la influencia del esfuerzo medio. Goodman propuso una teoría simplificada llamada “esfuerzo medio”. Su nombre todavía se asocia a los diagramas relacionados con el esfuerzo medio y alternativo. Bauehinger [9] en 1886, demostró que el esfuerzo de cedencia en tensión o compresión fue disminuido después de aplicar una carga de signo opuesto causando una deformación inelástica. Esta era la primera constatación que con un solo cambio de signo sobre la tensión elástica, podría cambiar la deformación - tensión en el comportamiento de los metales.

A principios de 1900, Erwing y Humfrey [10] utilizaron el microscopio óptico para investigar los mecanismos de fatiga. Las líneas y bandas de deslizamiento podrían conducir a la formación de microfisuras. Basquin [11] en 1910 demostró que la tensión alternada contra el número de ciclos de la fatiga (S-N) en la región finita de vida, podría ser representada como una relación lineal en la escala logarítmica. Sus ecuaciones, en adición con algunas modificaciones hechas por otros investigadores, se utilizan actualmente para representar el comportamiento de la vida en fatiga. En la década de 1920, Gough y colaboradores contribuyeron en gran parte a la comprensión del mecanismo de fatiga.

También demostraron los efectos combinados de la flexión y de la torsión (fatiga multiaxial). Gough publicó el libro “Comprensión de la Fatiga de Metales” en 1927 [12]. Moore y Kommers [13] publicaron el primer libro Americano de “Comprensión de la Fatiga de Metales” en 1927. En 1920 Griffith [14] publicó los resultados de sus cálculos y

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

experimentos teóricos en fractura frágil, usando materiales quebradizos. Encontró que la resistencia a la fractura del cristal dependía del tamaño de las grietas microscópicas. Con este primer trabajo sobre la importancia de las fisuras microscópicas, Griffith desarrolló la base para la Mecánica de la Fractura, convirtiéndose así en el "padre" de la Mecánica de la Fractura. Entre 1929 y 1930 Haigh [15], presentó una explicación racional de la respuesta del acero de alta resistencia y del acero suave bajo condiciones de fatiga, cuando las muescas están presentes. Utilizó los conceptos del análisis de la tensión en la muesca y de los esfuerzos residuales, que fueron desarrollados más adelante por otros.

Las fallas por fatiga de los resortes y de los árboles de levas, que habían sido comunes en esa época, después llegaron a ser raros. Almen [16] explicó correctamente las mejoras por los esfuerzos residuales compresivos, producidos en las capas superficiales de las piezas martilladas, y promovió el uso del martilleo y de los procesos que producen tensiones residuales beneficiosas. Horger [17] demostró que el balanceo superficial podría prevenir el crecimiento de grietas. En 1937, Neuber [18] introdujo efectos del gradiente de la tensión en las muescas y el concepto elemental del bloque, esto indica que la tensión media sobre un volumen pequeño en la raíz de la muesca es más importante que la tensión máxima en la muesca. Gassner [19], en 1939, acentuó la importancia de la prueba de amplitud variable y promovió el uso de un espectro de carga de 8 etapas para la simulación. La prueba del bloque era prominente hasta que la prueba de circuito cerrado del sistema electrohidráulico llegó a estar disponible a finales de los 50's y principios de los 60's.

Durante la Segunda Guerra Mundial el uso deliberado de esfuerzos residuales compresivos llegó a ser común en el diseño de los motores de avión y de vehículos armados. Muchas fracturas frágiles en tanques soldados y barcos soldados con soldadura autógena motivan la reflexión sobre las discontinuidades preexistentes o defectos en forma de fisuras y la influencia de la concentración de esfuerzos. Muchas de estas fracturas frágiles comenzaron en esquinas cuadradas de las escotillas, en cortes cuadrados y en soldaduras. Las soluciones incluyeron el redondeo de las esquinas, más el remachado para detener la grieta y poner mayor énfasis en las propiedades de los materiales.

En 1945, Miner [20] formuló un criterio del daños de la fatiga sugerido por Palmgren [21] en 1924. Este criterio acerca de los daños de fatiga se conoce como “la Ley Palmgren-Miner”. Se ha utilizado extensamente en el diseño de fatiga y, a pesar de sus defectos, sigue siendo una herramienta importante en predicciones de la vida de fatiga. La formación del comité E-09 de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) en 1946, con Peterson como su presidente, organizó un foro para los estándares de prueba de fatiga e investigación. Peterson acentuó que el factor de la muesca en fatiga era una función del factor de la concentración de esfuerzos [22]. En 1953, publicó un libro comprensivo de factores de concentración de esfuerzos [23] y una versión amplia [24] en 1974.

El “cometa”, primer avión de pasajeros a reacción, comenzó a funcionar en mayo de 1953 después de 300 horas de vuelo. Cuatro días después en una inspección, en enero de 1954, se estrelló en el mar mediterráneo. Después de mucho tiempo los restos habían sido recuperados, la investigación y las pruebas exhaustivas de los componentes del cometa

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

habían sido hechas, concluyendo que el accidente fue causado por falla de fatiga en la cabina presurizada. Las pequeñas grietas por fatiga originaron la apertura del fuselaje en una esquina. Otros dos jets fallaron catastróficamente. El Cometa había sido evaluado a fondo. La presión exterior de la cabina en grandes alturas era de 57 KPa (8.25 psi). En septiembre de 1953, una prueba de la cabina había sido presurizada 18,000 veces a 57 kPa además de 30 ciclos anteriores entre 70 y 110 kPa. El diseño de esfuerzo para 57 kPa era de 40 por ciento de la fuerza de tensión de la aleación de aluminio. Todo jet de este tipo fue puesto fuera de servicio, y la atención fue centrada en el diseño por fatiga de la armadura de avión. Irwin [25] introdujo el factor de la intensidad de esfuerzos, que ha sido aceptado como la base de los mecanismos elásticos lineales de fractura y de las predicciones de la vida del crecimiento de la grieta. También creó el término “Mecánica de la Fractura”, y debido a sus importantes contribuciones al tema en este tiempo, se considera el "padre moderno" de la Mecánica de la Fractura. La distribución de Weibull [26] proporcionó dos o tres parámetros para la distribución estadística de la prueba y el análisis de probabilidad de la vida de la fatiga.

La formación del Comité de Análisis de Fractura de Aceros de Alta Resistencia del ASTM a principios de los 60's, fue el punto de partida para la formación del Comité E-24 de ASTM sobre fractura en 1964. Este comité ha contribuido significativamente en el campo de análisis de los mecanismos de fractura y del crecimiento de grieta por fatiga, y fue combinado con el comité E-09 de ASTM en 1993 para formar al comité E-08 sobre fatiga y fractura. Paris [27] a principios de la década de 1960, estimó que el crecimiento de grieta por fatiga  $da/dN$  podría describirse de la mejor manera usando la gama  $\Delta K_I$  del factor de la intensidad de esfuerzos. A finales de los años 60s los catastróficos desplomes del avión F-111 fueron atribuidos a la fractura frágil de los miembros que contenían defectos de fabricación. Estas fallas, así como problemas de fatiga en otros aviones de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, fueron la base para utilizar los conceptos de la Mecánica de la Fractura en el desarrollo del programa bombardero B-1 de los años 70s. Estos programas incluían las consideraciones de vida del crecimiento de grieta en fatiga basadas en el tamaño inicial de la grieta. Schijve [28] a principios de los años 60's, enfatizó que el crecimiento variable de grieta por fatiga en el avión que usaban para pruebas, así como la importancia de las cargas externas en la presencia de grietas, pueden causar el retraso significativo del crecimiento de grieta en fatiga.

En 1967 el Puente Silver, en Point Pleasant, en el oeste de Virginia, se derrumbó sin advertencia. Las investigaciones extensas del derrumbe demostraron que una fractura en la hendidura de la abrazadera causada por el crecimiento de un defecto hasta un tamaño crítico, fue la causa [29]. El defecto inicial era debido al proceso de fatiga y una grieta causada por corrosión. Esa falla ha tenido una influencia profunda en los requisitos subsecuentes de diseño, establecidos por la Asociación Americana de Estados, Transportes y Autopistas AASHTO (American Association of State and Highway and Transportation Officials). En 1970, Elber [30] demostró la importancia del cierre de la grieta durante el crecimiento en el proceso fatiga. Desarrolló un modelo cuantitativo-demostrativo en el cual el crecimiento de grieta en el proceso de fatiga fue controlado por un rango efectivo del factor de intensidad de esfuerzos, en contraposición al rango aplicado del factor de la

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

intensidad de esfuerzos. El modelo del cierre de la grieta se utiliza comúnmente en cálculos actuales del crecimiento de grieta de la fatiga. En 1970, París demostró [31,32] que el umbral de crecimiento de fisura podría ser obtenido para cuando el crecimiento de grieta por fatiga no ocurre.

Durante los años 70s, una dependencia internacional y un esfuerzo cooperativo, formularon varios espectros de carga estándares para los aviones, estructuras construidas en mar adentro, y carros. Estos espectros estándares [33,34] han sido utilizados por muchos ingenieros en una gran variedad de usos. En julio de 1974, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos publicaron el estándar llamado Mil A-834444, que define los requisitos de la tolerancia de las fallas para el diseño del nuevo avión militar.

El uso de la Mecánica de la Fractura como herramienta para el diseño por fatiga fue establecida a través de la necesidad de mejorar cuantitativamente, la capacidad no destructiva de la inspección como parte integral del requisito de la tolerancia de fallas. Durante los años 80s y 90s, muchos investigadores trabajaron en el complejo problema de la fatiga multiaxial en fase y desfasada. El método plano crítico sugerido por Brown y Miller [35] motivó a una nueva filosofía referente a este problema, y muchos modelos planos críticos adicionales fueron desarrollados. El pequeño problema de la grieta fue observado durante este tiempo y muchos científicos trataron de entender el comportamiento. El pequeño problema de la grieta era complejo e importante, puesto que estas grietas crecieron más rápidamente que las grandes grietas basadas sobre la misma fuerza impulsora. Las definiciones llegaron a ser muy confusas. El interés del proceso de fatiga en los materiales electrónicos, se incrementaron junto con las investigaciones en fatiga termomecánica. Los materiales compuestos, basados en polímeros, el metal y los cerámicos eran desarrollados para diversas industrias. Los logros y usos más grandes implicaron matrices compuestas de polímeros y de metales. Estos progresos fueron motivados por la industria aeroespacial pero también por otras industrias. Durante este tiempo, muchos diseños costosos y complejos de un gran número de componentes de aviones que usaban conceptos de diseño de vidas-segura, eran retirados rutinariamente con un potencial uso seguro.

En 1988 un accidente casi fatal del avión Aloha Boeing 737, después de más de 90,000 horas de vuelo, creó la enorme preocupación por daños en “múltiples sitios” y se mejoró el mantenimiento y la inspección no destructiva. La corrosión acompañada del proceso de fatiga y la inspección inadecuada eran grandes contribuidores al problema de daños del fenómeno “múltiples sitios” que existió en diversos tipos de aviones. Las investigaciones fueron emprendidas para entender mejor este fenómeno y para determinar cómo se podía hacerle frente y resolverlo.

## JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se sustenta principalmente en los costos económicos considerables que implican las fallas mecánicas, principalmente fallas por fatiga mecánica. Un estudio realizado en los Estados Unidos en la década de los noventa reveló que las pérdidas por fatiga mecánica ascendieron a más de 100 mil millones de dólares representando, casi el 4% del Producto Interno Bruto de Estados Unidos en ese año [36].

En México esta información no está disponible, pero una reflexión sobre el muy bajo número de especialistas en Mecánica de la Fractura y en Resistencia a la Fatiga en nuestro país, nos permite concluir la urgencia de formar personal capacitado en estas áreas y de ponderar el potencial de ahorro económico a partir de diseños mecánicos que tomen en cuenta la Resistencia a la Fractura y a la Fatiga.

Los fallos por fatiga en estructuras y piezas han causado numerosos desastres por fracturas inesperadas; por lo que, conocer su resistencia a la fatiga resulta de importancia en el diseño y construcción de elementos y sistemas mecánicos sometidos a cargas oscilantes.

Luego entonces, para poder utilizar con confianza estos materiales, es necesario conocer con mayor detalle las propiedades mecánicas de éstos, en especial la resistencia a la fatiga. Esta última propiedad es de particular interés cuando elementos o sistemas mecánicos son sometidos a cargas variables con el tiempo. De esta manera, los diseños y la puesta en uso de elementos y sistemas mecánicos sometidos a fatiga, podrán prever con mayor precisión su vida útil.

## OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es investigar la resistencia a la fatiga mecánica de la aleación de aluminio nominación AISI-SAE 6061-T6, así como llevar a cabo estudios en la superficie de fractura para establecer las posibles correlaciones entre las causas de falla por fatiga, las condiciones de carga y los defectos microestructurales asociados al maquinado de huecos superficiales artificiales.

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Obtener resultados de resistencia a la fatiga sobre la aleación de aluminio nominación AISI-SAE 6061-T6, en condiciones de flexión rotativa.
  
- b) Llevar a cabo estudios teórico experimentales sobre la concentración de esfuerzos debido a huecos superficiales artificiales en probetas de aluminio de la nominación mencionada en condiciones de fatiga en flexión rotativa.
  
- c) Llevar a cabo los estudios sobre la superficie de fractura para establecer causas probables de la falla en fatiga de este material.
  
- d) Analizar mediante microscopio óptico las superficies de fractura.

### **HIPÓTESIS**

La resistencia a la fatiga en flexión rotativa de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061-T6 puede investigarse mediante el control de parámetros experimentales tales como: carga aplicada, imperfecciones superficiales artificiales, régimen de carga.

## CAPÍTULO I TEORÍA ALUSIVA

### 1.1 Teoría alusiva

El problema de la fatiga mecánica es aplicable a una amplia variedad de estructuras y de máquinas incluyendo: automóviles, aviones, puentes, tractores, implantes biológicos, recipientes nucleares a presión, barcos, gasoductos; en resumen, todo elemento mecánico sometido a cargas oscilantes. Uno de los objetivos de este trabajo de tesis es profundizar sobre el comportamiento de la resistencia en fatiga de esta aleación de aluminio en condiciones de flexión rotativa y con huecos artificiales maquinados en la superficie. Este capítulo se inicia con la descripción de los tres principales métodos de análisis en fatiga mecánica, que se enlistan a continuación:

- 1.- Esfuerzo – Número de ciclos (S-N) (Whöler)
- 2.- Deformación – Número de ciclos ( $\epsilon$ -N) (Coffin-Manson)
- 3.- Crecimiento de fisura ( $da/dN$ -  $\Delta K$ ) (Paul C. Paris)
  - Por formación de pequeñas grietas
  - Crecimiento de la grieta hasta fractura.

Estos métodos se han incorporado en muchos programas de computadora para resolver situaciones complejas en el diseño fatiga, pueden implicar muescas, esfuerzos residuales, grandes y pequeñas grietas, amplitud de carga variable, estados de tensión multiaxial y condiciones ambientales. La aplicación de estos métodos analíticos requieren llevar ensayos experimentales para su validación bajo condiciones reales, y puedan ser apoyados mediante modelos de simulación numérica en las computadoras.

#### 1.1.1 Fallas mecánicas

Las fallas mecánicas causan año con año considerables daños y pérdidas financieras a través del mundo, conduciendo en ocasiones a catástrofes humanas también. No obstante, en cuanto al exitoso diseño de un gran número de componentes y estructuras mecánicas, las fallas mecánicas son mínimas. Las fallas mecánicas implican una extrema interacción del tiempo de carga y el medio ambiente que incluye temperatura y corrosión. También pueden ser monótonas, constantes, variables, axiales y/o multiaxial. La interacción de la carga, tiempo y medio ambiente junto con la selección de los materiales, geometría, proceso y esfuerzos residuales crean una amplia gama de la complejidad y de los posibles tipos de falla en todas las áreas de la ingeniería. El exceso de deformación o deformación plástica, es probablemente el tipo de falla más común estudiada y se basa en el criterio máximo de deformación. Un ejemplo de un sector donde el exceso de la deformación con plasticidad apreciable ha sido utilizado con éxito, es en la industria agrícola, con los

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

tractores usando el sistema de protección del mantenimiento preventivo para proteger a los operadores durante accidentes.

### **1.1.2 Tipos de fallas mecánicas**

- 1.- Exceso de deformación - elástica, límite de cedencia o inicio de plasticidad.
- 2.- Fractura dúctil - plasticidad substancial y gran absorción de energía.
- 3.- Fractura frágil - poca plasticidad y baja absorción de energía.
- 4.- Impacto o carga dinámica - exceso de deformación o fractura.
- 5.- Termofluencia - exceso de deformación o de fractura a altas temperaturas.
- 6.- Relajación - pérdida de esfuerzos residuales o de carga externa.
- 7.- Choque térmico – grieta o fractura.
- 8.- Uso - posibles fallas de mecanismos.
- 9.- Inestabilidad mecánica - elástica o plástica.
- 10.- Corrosión, fragilidad asociada al hidrógeno, irradiación de neutrones (éstos no son tipos de fallas mecánicas, pero interactúan con aspectos mecánicos).
- 11.- Fractura por esfuerzo-corrosión (grieta por causa del medio ambiente).
- 12.- Aspectos estéticos (éstos no son tipos de fallas mecánicas, pero interactúan con aspectos mecánicos).
- 13.- Fatiga - carga repetitiva algunos parámetros que intervienen son:
  - a) Fatiga y formación de la grieta.
  - b) Fatiga y crecimiento de la grieta.
  - c) Amplitud de carga constante o variable.
  - d) Carga axial o multiaxial.
  - e) Fatiga por corrosión.
  - f) Fatiga mecánica con frotamiento.
  - g) Fatiga por termofluencia.
    - 1.-Isotérmico.
    - 2.-Termomecánico.
  - h) Falla por la combinación de los tipos de falla mecánica del a) al g).

La falla por exceso de deformación puede ocurrir por deformación elástico-plástico bajo ensayos en una maquina de flexión rotativa. La fractura frágil contiene principalmente

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

micro plasticidad, e implica poca absorción de energía y rápido crecimiento de fractura. La fractura dúctil implica considerable nivel de plasticidad y se asocia a una gran absorción de energía. Muchas fracturas frágiles en las aeronaves utilizadas en la Segunda Guerra Mundial fueron atribuidas a la interacción en regiones soldadas con concentraciones de esfuerzos, esfuerzos residuales, estados de esfuerzos multiaxiales y baja resistencia a la dureza en las fracturas. El impacto o las condiciones de cargas dinámicas que crean gran tensión en metales, tienden a bajar la dureza y ductilidad. Un ejemplo de un impacto de fractura controlado implica la rampa usada en las catapultas de los portaaviones para el lanzamiento de un avión.

La termofluencia y la relajación de metales son comunes en temperaturas elevadas. Termofluencia puede causar deformación permanente y/o fracturas y es generalmente intercrystalina. La Fatiga por termofluencia han ocurrido en los alabes del motor de una turbina de gas debido a las fuerzas centrífugas. Estos han sido superados usando monocristales en los alabes.

La relajación es la responsable de las pérdidas de esfuerzos residuales y pérdidas de carga externa que pueden ocurrir en temperaturas elevadas o en temperatura ambiente. El choque térmico tiende a promover la grieta y/o fractura frágil. La fractura por uso, ocurre en todas las temperaturas e incluye diferentes formas y comportamientos del crecimiento de grano. La fatiga por inestabilidad mecánica (Buckling failure) puede ser inducida por carga externa o condiciones térmicas y puede implicar inestabilidades elásticas o plásticas.

La corrosión por sí misma implica el desgaste del material y la formación de grietas. El crecimiento de las grietas puede ocurrir debido a la interacción del esfuerzo aplicado y/o residual y el ambiente corrosivo. Esta interacción se llama fractura por esfuerzo - corrosión o formación de la fisura por la carga mecánica y el medio ambiente. Estas fallas ocurren incluso sin la presencia de esfuerzos residuales y la interacción corrosiva del medio ambiente.

La fragilidad asociada al hidrogeno es la más susceptible en aceros de alta resistencia y causa grietas intercrystalinas que pueda conducir a la fractura frágil. Incluyen componentes más complejos como naves espaciales, aviones, e implantes del cuerpo humano. Ejemplos son ejes del propulsor de las naves espaciales, fuselaje presurizado de aviones, etc.

### **1.1.3 Consideraciones importantes en el diseño de fatiga**

Como se mencionó anteriormente, los costos implicados con las fallas mecánicas, particularmente fatiga, son importantes en los países desarrollados. En los países en vías de desarrollo esta información no está disponible, entre otros motivos, por los escasos estudios sobre el tema. Investigaciones recientes han mostrado un potencial de ahorro mediante diseños apropiados de resistencia en fatiga.

Muchas metodologías para el diseño de la fatiga existen, pueden ser simples y de precios bajos o extremadamente complejos y costosos. Un procedimiento más completo del diseño de fatiga es inicialmente más costoso, pero a un largo plazo puede revelarse como la mejor

opción mediante la relación resultados/costos. Actualmente, el diseño apropiado de fatiga implica la síntesis, análisis, y la prueba. Una pregunta importante en el diseño de fatiga es: ¿cómo debe ser el procedimiento completo de síntesis, análisis y prueba? La prueba de fatiga no es un procedimiento de diseño apropiado, puesto que debe ser utilizado para la determinación de la durabilidad del producto; no para el desarrollo de producto. El solo análisis es también insuficiente para el diseño por fatiga, donde modelos actuales de vida de fatiga, incluyendo programas de ingeniería automatizados del gobierno, no son adecuados para las piezas críticas de seguridad, son solamente modelos y no pueden tomarse en consideración todos los aspectos sinérgicos implicados en fatiga, tales como temperatura, corrosión, esfuerzos residuales y carga variable. Por lo tanto el análisis y la prueba son componentes requeridos para el buen diseño en fatiga. Entre más cercano sea el análisis y la simulación con la situación real, mayor confianza se puede tener con los resultados obtenidos. Los factores de seguridad se utilizan a menudo conjuntamente con o sin diseño apropiado de la fatiga.

Los valores del factor de seguridad demasiado altos conducen a que los productos no sean competitivos en el mercado global, mientras que valores de éstos que son muy bajos contribuyen a las fallas indeseadas. Los factores de seguridad no son reemplazos por procedimientos apropiados de diseño de fatiga, no si son una excusa para compensar pobres procedimientos de diseño de fatiga. Las consecuencias de cada tipo de falla por fatiga del producto, pueden ser mínimas o catastróficas.

## **1.2. Elegir el modelo de la vida por fatiga es una decisión significativa.**

Existen cuatro modelos actualmente para los ingenieros de diseño; los tres primeros corresponde a los mencionados anteriormente en la sección 1.1, el cuarto corresponde a un modelo de 2 etapas, que consisten en la combinación del modelo 2 y 3 para incorporar la formación macroscópica de la grieta de fatiga y el crecimiento de grieta de fatiga.

Según lo observado, el modelo “esfuerzo – número de ciclos” (S-N) ha estado disponible alrededor de 150 años, mientras que el segundo modelo ( $\epsilon - N$ ), se desarrollo a finales de los 40's del siglo pasado, y el tercero en la década de 1960. El modelo (S-N), utiliza esfuerzos nominales y relaciona éstos con las fuerzas locales de la fatiga para las muescas hechas. El modelo ( $\epsilon - N$ ) se utiliza principalmente cuando se presentan deformaciones considerables y bajo número de ciclos de vida en fatiga. El modelo de Fatiga por crecimiento de grieta ( $da/dN - \Delta K$ ), requiere el uso de Mecánica de la Fractura y la integración de la ecuación del crecimiento de grieta por fatiga para obtener el número de ciclos requeridos para el crecimiento de la grieta de una longitud inicial a una segunda longitud y/o a la fractura. Este modelo se puede considerar un modelo total de la vida en fatiga cuando es utilizado conjuntamente con la información sobre la fabricación del material y el tamaño inicial de la grieta.

El modelo de las 2 etapas incorpora al modelo ( $\epsilon - N$ ) para obtener la vida de formación de pequeñas macrofisura, seguido por la integración de la ecuación del crecimiento de grieta

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

por fatiga para el resto de vida. Las dos vidas se agregan para obtener la vida total de la fatiga. Como ilustración, vamos a ver cuatro de las muchas diversas situaciones posibles:

- a) Diseñar un dispositivo, quizás una herramienta de flexión especial o de prueba, para ser utilizado en la planta en donde fue diseñada. Podemos llamarlo “herramienta en casa”.
- b) Cambiar un producto existente haciéndolo más grande de lo que estaba, usando diferentes materiales o formas, quizás un muelle y un amortiguador en lugar de un resorte plano. Lo podemos llamar un "nuevo modelo".
- c) Crear un proyecto importante que es absolutamente diferente de las últimas 2 situaciones. Algunos ejemplos son una nave espacial, una plataforma de perforación en el océano o una nueva máquina cortadora de árboles. Lo podemos llamar un "nuevo producto"
- d) Diseñar un puente en una carretera o una caldera de vapor. Las cargas previstas, los métodos de análisis aceptables, y los esfuerzos permisibles son especificados por el cliente o por un código. Lo podemos llamar "diseño de un código."

### 1.2.1 Estrategias en el diseño de la fatiga

- Herramienta en casa.

Es parte de una herramienta que es sujeta a cargas repetidas, como por ejemplo, un mecanismo de trinquete o un eje con una polea que rotan, debe ser diseñado para evitar la falla por fatiga. Para la herramienta en casa; una condición que el diseñador debe saber es la historia previa de la carga-tiempo a la cual la pieza será sujeta, el ingeniero comenzará con la forma para evitar la concentración de esfuerzos tanto como sea posible, determinará los esfuerzos, y seleccionará el material y los tratamientos dependiendo de los requisitos para el peso, espacio, y costo. El diseño puede tener un margen conveniente entre la tensión que corresponde a una probabilidad de 50 por ciento de la falla en la vida deseada y las tensiones permitidas. Una segunda y tercera reiteración puede ser requerida para balancear los factores de peso y espacio que están en conflicto, estimando vida y costo. Si las cargas previstas no se repiten uniformemente, el diseñador considerará un daño acumulativo. Las diferencias entre el diseño para la resistencia a la fatiga y el diseño para poca carga son de mayor atención en los detalles de la forma, los tratamientos y las necesidades de decidir sobre un curso de vida requerido en la pieza. El diseñador puede prevenir consecuencias serias de la falla, haciendo un acceso a la pieza para la inspección y el reemplazo, proporcionando una falla segura o utilizando mayores factores de seguridad y realizando pruebas apropiadas de la fatiga.

- Nuevo modelo.

Para un nuevo modelo más certero pueden ser requeridos más datos que deben estar disponibles en los expedientes o de modelos anteriores. Las partes fracturadas de modelos

anteriores proporcionan los datos más útiles. Pueden ser utilizados para ajustar los métodos de prueba, de modo que la prueba produzca las fallas similares en el lugar donde aparecieron. Las pruebas que producen otro tipo de fallas tienen probablemente un tipo de amplitud o carga incorrecta. Por ejemplo, en una prueba de la suspensión de un automóvil, se ha encontrado que 200 000 ciclos de movimientos, de rebote completo a la desviación máxima posible, son una prueba aceptable que es mucho más rápida y menos costosa que una prueba de una muestra con diversas amplitudes. En vez de hacer un análisis completo de la tensión, puede ser posible determinar la relación de tensiones significativas de las cargas medidas satisfactoriamente en modelos anteriores y reproducir la misma relación en el nuevo modelo.

- Nuevo producto.

Esto requiere un esfuerzo más grande que el diseño por fatiga. Predecir cargas futuras es el factor más importante. Ni una gran cantidad de análisis de esfuerzos puede superar una predicción errónea de la carga. Después del espectro de carga o cargas que se han obtenidas, uno puede analizar el desempeño por fatiga de todas las piezas. Los resultados son verificados por las pruebas de los componentes en fatiga, que pueden conducir a las modificaciones de diseño. Siempre que sea posible, los prototipos o los modelos piloto son usados para confirmar el funcionamiento y las cargas predichas.

- Diseño de un código.

Muchas industrias proporcionan datos de esfuerzos permitidos. La Sociedad Americana de Soldadura y la Institución Británica de Estándares, por ejemplo, han publicado las curvas que demuestran tensiones recomendadas en función de la vida deseada para varios tipos de soldaduras. El código ASME de recipientes a presión de calderas ha recomendado los criterios del diseño por fatiga basados sobre modelos actuales por fatiga y datos de prueba. Tales códigos permiten que el diseñador utilice los datos basados en la experiencia de muchos otros. En general, un diseño según un código es un diseño conservador y seguro.

## **1.2.2 Criterios de diseño de fatiga**

Los criterios para el diseño por fatiga se han desarrollado a partir de una supuesta vida infinita a la tolerancia de los daños. Cada uno de los criterios sucesivamente desarrollados todavía tiene su lugar, dependiendo del uso. Los criterios para el diseño por fatiga incluyen el uso de los cuatro modelos de la vida por fatiga ( $S - N$ ,  $\epsilon - N$ ,  $da/dN - \Delta K$ , y el modelo de dos etapas).

### **1.2.2.1 Diseño de vida finita**

La seguridad ilimitada es el criterio más viejo. Requiere esfuerzos o tensiones locales para ser esencialmente elástico y seguro debajo del pertinente límite de fatiga. Para las piezas sujetas a millones de ciclos, como los resortes de las válvulas en un motor, esto sigue siendo un buen criterio del diseño. Además, este criterio puede no ser económico o práctico

en muchas situaciones de diseño. Los ejemplos incluyen el peso excesivo de avión que provoca la insuficiencia técnico-económica de fabricación.

### **1.2.2.2 Diseño de vida segura**

El diseño “vida – infinita” era apropiado para las vías del ferrocarril que Whöler investigó, pero los diseñadores de automóviles aprendieron que, si los especímenes eran probados a los máximos valores de esfuerzo y carga, se obtendrían solamente cientos de miles de ciclos en lugar de varios millones. La máxima carga o esfuerzo en un resorte de suspensión o en un engrane de velocidad en reversa, pueden ocurrir ocasionalmente durante la vida útil del vehículo, entonces el criterio de diseño por la vida finita bajo esas cargas es satisfactorio.

La práctica del diseño para una vida finita se conoce como diseño de “vida- segura”. Se utiliza en muchas otras industrias, por ejemplo, en diseño de recipientes a presión y en diseño del motor de un jet. La vida segura debe, por supuesto, incluir un margen para la dispersión de resultados de la fatiga y otro para factores desconocidos. Los cálculos se pueden basar en ensayos de esfuerzo-vida en fatiga, deformación – vida en fatiga, o en la relación del crecimiento de grieta. El diseño “vida- segura” se puede basar solo o parcialmente en campo y/o la prueba simulada. Ejemplos de productos reales y prueba simulada en los cuales juegan un papel determinante el diseño de “vida-segura” son en motores de jets, cañones de las armas y cojinetes.

Aquí las inspecciones regulares apropiadas no pueden ser prácticas o posibles; por lo tanto, la vida de servicio permisible debe ser menor que la vida de prueba o la vida calculada. Por ejemplo, la fuerza aérea de Estados Unidos ha requerido históricamente la prueba de vida en fatiga de escala completa de la producción de las partes del avión, sea cuatro veces más que la vida prevista o permisible de servicio. Con los cañones de las armas, el ejército de Estados Unidos ha requerido pruebas reales de fuego y las pruebas simuladas de presión en fatiga hechas en el laboratorio de seis o más cañones para establecer la vida permisible de servicio como fracción de la vida media de prueba. Los baleros y los cojinetes de rodillos son ejemplos significativos del diseño de vida-segura. Los grados para tales cojinetes se dan a menudo en términos de una carga de referencia que es del 90 por ciento de todos los cojinetes esperando soportar un curso de la vida dado, por ejemplo, 3000 horas a 500 RPM o 90 millones de revoluciones.

### **1.2.2.3 Diseño de seguridad**

Cuando el componente, la estructura, o el vehículo alcanzan la vida segura permisible, se deben retirar de servicio. Esto puede ser inadecuado puesto que toda la flota de vehículos debe ser retirada antes de que logren la vida calculada media o la vida de prueba. Esta práctica es muy costosa y derrochadora. También, la prueba y el análisis no pueden predecir todas las fallas por servicio. Así los criterios a prueba de averías del diseño de la fatiga fueron desarrollados por los ingenieros aeronáuticos. Estos criterios no pueden tolerar el peso agregado requerido debido a los grandes factores de seguridad, o por el peligro de vida creado por pequeños factores de seguridad, o el alto costo del diseño de

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

“vida-segura”. El diseño a prueba de averías requiere que si una parte falla, el sistema no falle. Las trayectorias múltiples de carga, la transferencia de la carga entre los miembros, los tapones de la grieta construidos en los intervalos de la estructura, y la inspección son algunos de los medios usados para alcanzar el diseño a prueba de averías. Esta filosofía se aplicó originalmente a las armaduras de avión (alas, fuselajes, superficies de control). Los motores son a prueba de averías solamente en aviones con varios motores. Un tren de aterrizaje no es a prueba de averías, sino que se diseña por medio del modelo vida segura.

### 1.2.2.4 Diseño daño tolerancia

Esta filosofía es un refinamiento de la filosofía a prueba de averías. Asume que las grietas existirán, causadas tanto por el procesamiento como por la fatiga, y utiliza el análisis de Mecánica de la Fractura y pruebas para determinar si tales grietas crecerán bastante grandes para producir fallas antes de que sean detectadas por la inspección periódica. Tres cosas son necesarias para el exitoso diseño “daño – tolerancia”: fuerza residual, comportamiento del crecimiento de la grieta por fatiga y detección de grieta que implica la inspección no destructiva. Por supuesto, las condiciones ambientales, la historia de carga, los aspectos estadísticos y los factores de seguridad se deben incorporar en esta metodología. La fuerza residual es la fuerza en el instante de la presencia de una grieta. Con la formación de fisuras y el crecimiento bajo carga cíclica, las fuerzas residuales, disminuyen. Esta disminución en función del tamaño de la grieta es dependiente del material, medio ambiente, configuración del componente y de la fisura, localización y modo del crecimiento de ésta. La fuerza residual se obtiene generalmente usando conceptos de la Mecánica de la Fractura. Se han desarrollado métodos de detección de la fisura, usando una gran diversidad de técnicas no destructivas en la inspección y procedimientos estándares. Las fisuras necesitan ser reparadas o reemplazar los componentes antes de que la fractura ocurra bajo cargas de servicio. Esta filosofía, busca los materiales con crecimiento lento de la grieta y alta resistencia a la fractura.

El retiro para la causa es una situación especial que requiere el uso del diseño “daño-tolerancia”. Imaginemos el número de alabes de la turbina en el motor de un jet fuera de servicio porque ha alcanzado su vida de máxima en servicio basado en resultados analíticos y pruebas del diseño “vida – segura”. El costo es enorme puesto que los alabes podría tener una vida adicional significativa en servicio. Para permitir una posible vida de servicio extra, la metodología daño -tolerancia requiere pruebas analíticas basadas sobre alabes. Por ejemplo, en el soporte de los alabes para una turbina del motor de jet, esto no es una tarea fácil debido a situaciones de seguridad crítica y muchos de los parámetros implicados son complejos.

### 1.2.3 Análisis y prueba

Un análisis correcto y completo es el que implica la reiteración y la optimización que puede proporcionar a los prototipos estar más cerca del producto final y requerir menos pruebas. El análisis escaso o incorrecto puede dar lugar a demasiada dependencia y reexaminación

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

sobre la prueba, creando ineficacias de tiempo y costo. Las capacidades del análisis, son en gran parte, dependientes de las capacidades de la computadora disponibles para el ingeniero. Sin embargo, el ingeniero debe realizar estos cálculos para los modelos: la llave de la confianza de estos resultados es lo más cercano a la representación real del producto y de su uso. Incluso el mejor análisis no debe ser necesariamente el diseño del producto final, particularmente con los productos críticos en seguridad. Sin embargo, el análisis es una necesidad en el diseño apropiado de fatiga y debe conducir a un diseño muy responsable del prototipo. Un diseño basado en análisis solamente sin la prueba de fatiga, requiere un margen grande para la incertidumbre y una importante probabilidad de falla. Una probabilidad de la falla baja se puede permitir, si las fallas no ponen en peligro vidas y si el reemplazo se considera una cuestión rutinaria, como las poleas del ventilador de un automóvil. La prueba de fatiga ha implicado diferencias enormes en complejidad y costos, y se ha extendido desde una simple prueba de rotación de la viga en amplitud constante de un muestra pequeña hasta completar una simulación de un ciclo termomecánico de amplitud completa, compleja y variable, de la estructura supersónica del avión Concorde en la década de los 70s o de la estructura del avión de Boeing 777 en la década de los 90s. El objetivo de la prueba de fatiga puede ser el obtener las características de fatiga en los materiales, ayudarnos en el desarrollo del producto, determinar alteraciones o reparaciones, evaluar piezas que fallaron, establecer períodos de inspección, o determinar la durabilidad de la fatiga de los sub-ensambles parciales de componentes o del producto completo. La prueba de durabilidad requiere un producto representativo para prueba y por lo tanto ocurre tarde en el proceso del desarrollo del diseño. Las piezas fabricadas para la prueba de fatiga deben ser justo como las piezas de producción porque las diferencias en el proceso, pueden tener un efecto en la resistencia a la fatiga.

Pueden ser consideradas dos dimensiones en la prueba de componente simple que puede incluir discontinuidades y la geometría final de la superficie tal como una biela del motor. Tres muestras dimensionales incluirían las estructuras del sub-ensamble parcial tal como un sistema de la suspensión de un carro incluyendo uniones y piezas del múltiple a las estructuras completas tales como el Concorde y el avión de Boeing 777. Desde la introducción de los sistemas de prueba servo-hidráulicos de circuito cerrado a finales de la década 1950, el énfasis y el éxito han ocurrido en traerlos a la pista de prueba o en el laboratorio. Los sistemas actuales de la prueba simulada son capaces de tener carga de amplitud variable, deformaciones o desviación variable de uno o varios canales en la entrada. Los sistemas de prueba están o no disponibles para casi toda situación, disciplina, o complejidad de la ingeniería. Una prueba simulada completa de fatiga se muestra en la figura 1.1, donde un automóvil se sujeta a tres entradas variables dimensionalmente en amplitud de carga en cada uso de la rueda. La prueba simulada en el laboratorio y de rastreo o prueba de tierra se puede realizar al mismo tiempo. Ambos proporcionan la entrada significativa de decisiones finales del producto.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

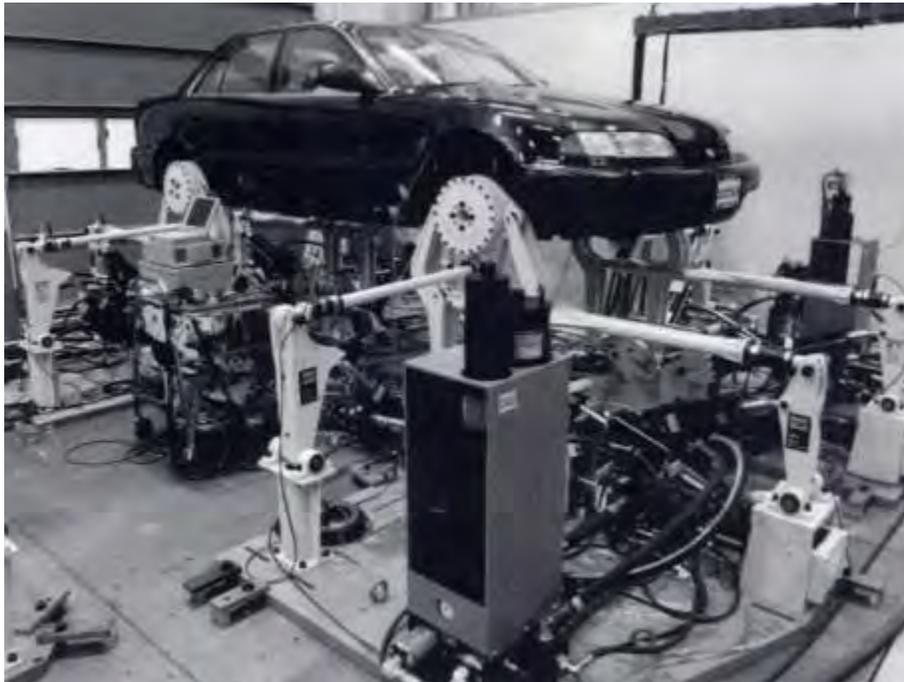


Figura 1.1 Prueba integral de fatiga en carretera de un automóvil.

La prueba de fatiga o durabilidad para la verificación del diseño, o la prueba del desarrollo, es un arte. Las condiciones de carga y del medio ambiente similares a las encontradas en servicio son los primeros requisitos para la prueba simulada de fatiga. La determinación de las cargas de servicio puede ser una tarea importante. Los sistemas de adquisición de datos de varios canales están disponibles para obtener la carga, el esfuerzo de torsión, el momento, las deformaciones, la desviación, o la aceleración contra la hora para muchos componentes, estructuras, y vehículos diversos sujetos al uso del servicio. Se requiere a menudo para traer productos al mercado antes de la competencia o para encontrar un método de mejora de los productos marginales y para controlar los costos de la prueba. Los tres métodos más comunes aceleran la prueba, que implica el aumentar la frecuencia de la prueba, el uso de cargas más altas y/o el eliminar muchos de los pequeños ciclos de carga en la muestra. El incremento de frecuencia puede tener efecto en la vida en fatiga y puede no proporcionar bastante tiempo para los aspectos ambientales de funcionamiento completo. El aumento de cargas más allá de las de servicio aceleran las pruebas pero pueden producir resultados engañosos: los esfuerzos residuales que pudieron haber permanecido en servicio pueden cambiar debido a las cargas excesivas en la prueba. El frotamiento y la corrosión pueden no tener tiempo suficiente de producir sus efectos completamente. La eliminación de pequeños ciclos en el espécimen de carga es común, y varios métodos analíticos existen para ayudar en la eliminación de supuestos ciclos no dañinos. Preferimos llamar a este ciclo de "bajo - daño " en lugar de "sin daño" porque no podemos estar seguros si estos pequeños ciclos influenciaran o no la vida de la fatiga. La eliminación de ciclos de "bajo - daño" puede ocultar la influencia del frotamiento y de la corrosión. En la prueba de fatiga, la simulación o la prueba de campo se representa cuando las condiciones de servicio están cerca y es más la confianza que se puede tener en los

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

resultados. La prueba de ensayo implica una sola carga en un componente o de una estructura a un bajo nivel, pero más arriba que la carga máxima de servicio, puede proporcionar la información del tamaño máximo de la fisura que podría existir en esta prueba, resultando provechoso en situaciones de diseño “daño – tolerancia” y en períodos determinados de la inspección. La prueba de ensayo puede alterar la resistencia a la fatiga creando tensiones residuales deseables e indeseables. La prueba de ensayo periódica para bajas temperaturas se ha utilizado en las alas del avión F-111 como parte del procedimiento en servicio rutinario de inspección.

### **1.2.4 Confiabilidad probabilística del diseño**

El comportamiento de las muestras de fatiga en componentes, estructuras o de vehículos simples o complejos implica variabilidad. La variabilidad de los datos en fatiga puede ser muy amplia: de un factor de 1 a varios órdenes de magnitud dependiendo del ensayo o de las condiciones de servicio. La extrapolación de los datos conocidos de falla a bajas probabilidades de la falla, requieren márgenes grandes para los factores de incertidumbre o de seguridad.

### **1.2.5 Ingeniería asistida por computadora y prototipos digitales**

La ingeniería asistida por computadora implica el uso de la computadora para realizar muchas de las repeticiones de síntesis y análisis en el procedimiento de diseño. "El prototipo digital" originado en la computadora se refiere a un modelo realista del prototipo o en el estado final del producto. Esto significa que un prototipo es formado solo por el análisis y la síntesis. Este procedimiento se puede llamar "prueba digital." Sus metas son reducir tiempo y costo en el desarrollo del producto y obtener un diseño cerca del óptimo. Estas incluyen los perfiles conocidos o asumidos de campo para los vehículos que midan el tiempo de carga y esfuerzos o deformaciones. Los esquemas de cómputo pueden proporcionar el análisis de confiabilidad de la predicción de vida en fatiga, diseñar el análisis de sensibilidad y la optimización del diseño. Esto puede requerir gráficos tridimensionales para la determinación de la forma, el modelo de la estructura del vehículo, cinemática y dinámica rígida o flexible para la velocidad, la aceleración, o la determinación de la historia de carga-tiempo, propiedades de los materiales, efectos del proceso y metodología de la predicción de vida en fatiga. El análisis y la optimización de la sensibilidad del diseño se pueden lograr en base al esfuerzo, deformación, dureza o la vida en fatiga. El uso de la ingeniería asistida por computadora y del prototipo digital, es un aspecto dominante y en crecimiento en el diseño por fatiga.

### **1.2.6 Inspección de entrada en servicio y adquisición de experiencia relevante**

Parte de la responsabilidad en la ingeniería implica esfuerzos para encontrar y corregir debilidades antes de que los clientes y/o los competidores las encuentren. Otra

responsabilidad es obtener el historial de carga en servicio monitoreando en uso del cliente, y decidiendo cuales cargas son frecuentes, cuales son ocasionales, cuales son excepcionales y cuales mayores a las registradas pueden ocurrir. Experiencias pasadas pueden ayudar en esta determinación. Muchas compañías ponen un modelo primario de la producción en servicio severo con un usuario y lo examinándolo frecuente y cuidadosamente para encontrar cualquier debilidad antes de que otros la encuentren. En el diseño “daño-tolerancia”, la inspección para las fisuras es obligatoria. Esta no debe ser destructiva para ser significativa. ASTM, ASM internacional, y la Sociedad Americana de Pruebas no destructiva (ASNT) han publicado información significativa sobre la inspección no destructiva y sobre la prueba no destructiva [37-39]. Normas adicionales en la evaluación no destructiva son: el código E-7 vol. 0303 de ASTM [38] acerca de la prueba no destructiva que incluye alrededor de 100 estándares en técnicas de prueba consecutivas no destructivas de la inspección, aplicables a la detección de la fisura: emisión acústica, escape o fuga electromagnética (corriente de rayos gamma y radiología), penetración de líquidos y partículas magnéticas, ultrasonidos, y otros métodos. La inspección excesiva emplea tiempo y es costosa, y una inspección retardada por largo tiempo puede ser fatal; así, una reflexión sobre los periodos de inspección debe llevarse a cabo. Un procedimiento no destructivo simple, implica a inspectores ferroviarios que golpean las vías del tren expreso con el martillo de mango largo de las vías para detectar las fisuras por fatiga a través el sonido, antes de que las fisuras lleguen a ser bastante grandes para producir fracturas.

### **1.3 Macro-micro aspectos de la fatiga en metales**

Para uso común, la palabra "fatiga" se refiere al comportamiento de materiales bajo acciones de esfuerzos o deformaciones repetidas, sean monótonas o estáticas. En seis palabras claves se ha puesto énfasis para su definición. La palabra “progresivo” implica que el proceso de fatiga ocurre durante tiempo o uso. Una falla por fatiga es a menudo muy repentina, sin la advertencia obvia; sin embargo, los mecanismos implicados pudieron haber funcionado desde el principio del uso del componente o de la estructura. La palabra “localizada” implica que el proceso de la fatiga funciona en áreas locales mejor que a través del componente o de la estructura entera.

Estas áreas pueden tener grandes esfuerzos y deformaciones debido a la transferencia externa de carga, a los abruptos cambios en geometría, a las diferencias de temperatura, a los esfuerzos residuales y a las imperfecciones de los materiales. El ingeniero debe ser muy conciente con estas áreas locales. La palabra "permanente" implica que una vez que haya un cambio estructural debido a la fatiga, el proceso es irreversible.

La palabra "fluctuación" implica que el proceso de la fatiga abarca los esfuerzos y deformaciones que son cíclicas en naturaleza y requiere más que una carga sostenida. Sin embargo, la magnitud y la amplitud de los esfuerzos y deformaciones fluctuantes deben exceder ciertos límites de los materiales para que el proceso de la fatiga llegue a ser crítico. A propósito de fatiga, la palabra "fisura" es a menudo la que es mal entendida y empleada. La última causa de todas las fallas por fatiga, es que una fisura haya crecido a un punto en el cual el material restante no puede ser más tolerante de esfuerzos o deformaciones y puede ocurrir la fractura repentina. La fisura tuvo este tamaño debido a la carga cíclica. La vida en fatiga de las piezas críticas de seguridad, se basan solamente en el crecimiento de

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

la fisura. La palabra "fractura" indica que las etapas pasadas del proceso de fatiga mediante el inicio de fisuras han ocurrido y pueden abarcar escalas cristalográficas o aún más pequeñas, siendo la fractura una etapa a escalas mayores donde ocurre la separación de un componente o estructura en dos o más porciones.

### 1.3.1 Superficies de la fractura por falla y características microscópicas

Antes de observar los aspectos microscópicos del proceso de fatiga, examinaremos algunas superficies macroscópicas representativas de la fractura por fatiga. Muchas de estas superficies de fractura tienen características comunes y la frase "falla típica por fatiga" se encuentra a menudo en la literatura y en la práctica. Sin embargo, hay también muchas fallas por fatiga "anormales".



Figura 1.2 Superficie típica de fractura por fatiga.

La figura 1.2 muestra una superficie típica de falla por fatiga de 97.5 mm (3.84 in), provocado por esfuerzos torsionales [39]. El hilo de la rosca no fue terminado de redondear en las raíces y los flancos exhibieron numerosas marcas de escosuras, particularmente en la región más baja.

El trabajo de un pobre maquinado aumentó la concentración de esfuerzos en la región del hilo de la rosca, que contribuyó a la falla por fatiga. La superficie de la fractura parece tener dos regiones distintas. La región pequeña y clara del área gruesa en la parte superior de la superficie de la fractura es la sección transversal restante al momento de fracturarse la pieza. La otra área seccionada transversalmente consiste en la región de la fisura o fisuras del inicio por fatiga. Muchas fisuras iniciales se pueden ver cerca del perímetro izquierdo externo bajo; éstas son resaltadas por las líneas radiales, a menudo llamadas "marcas de trinquete", extendiéndose alrededor del perímetro izquierdo bajo. Esta es la región donde comenzó el proceso de fisuramiento (evidencia de micro-deformación plástica). Al principio, pequeñas fisuras por fatiga (microfisuras) propagaron en ángulo alrededor de 45° por pocos milímetros, antes de situarse perpendicularmente al eje longitudinal de la columna, que es el plano de la deformación máxima extensible. El crecimiento de

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

microfisuras a lo largo de los ángulos de  $45^\circ$  no se puede identificar en esta fotografía, aunque en una inspección más amplia es necesaria hacer esta observación. Mientras que el componente fue sujeto a esfuerzos cíclicos adicionales, estas microfisuras iniciales crecieron y se unieron de tal forma que, una fractura por fisura creció cerca del 80 por ciento de la superficie. Las bandas onduladas oscuras y claras son evidentes en la región de fisura por fatiga. Estas marcas a menudo se llaman “marcas de playa”. Dichas marcas son debido a las dos superficies adyacentes abiertas de la fisura, que se abren y se cierran y se juntan en el curso de la aplicación; o también por la aparición, paro o crecimiento de la fisura durante un espectro variable de carga. La interacción de una fisura y el medio ambiente corrosivo bajo carga variable, también tenderá a producir distintas “marcas de playa”. La figura 1.2 muestra una superficie de fractura de un tornillo roscado con diámetro de 8 milímetros (0.3 in). Este tornillo fue utilizado para sujetar el asiento a un poste en una bicicleta de montaña. La condición de carga impuesta en el tornillo era predominante axial pero también incluía un pequeño componente de flexión. Similar a la Figura 1.2, muchas fisuras iniciales se pueden ver cerca del perímetro externo superior, según lo indicado por las flechas negras. Sin embargo, el número de estas líneas radiales no es tan grande como en la figura 1.2.

Las líneas radiales oscuras acentúan que estas microfisuras iniciales fueron nucleadas y crecieron en alturas leves diversas dentro de la raíz del hilo de rosca. Una vez más, estas microfisuras crecieron y eventualmente se unieron para formar una grande, que entonces creció aproximadamente 40 por ciento de la superficie en la dirección indicada por la flecha blanca. El punto de la flecha blanca identifica el final del crecimiento de la fisura por fatiga y el principio de la fractura rápida. “Marcas de playa” son otra vez evidentes, y sobre la inspección cercana de la superficie de fractura, las “marcas de playa” oscuras mostraron la ruina de la decoloración y de la corrosión que indicaba una contribución del medio ambiente al crecimiento de la fisura. La región de la fractura final se muestra en la porción más baja de la figura. La región derecha más baja de la fractura corresponde a la etapa final del proceso de fractura, y es donde los pedazos del tornillo tuvieron frotamiento o deslizaron uno contra otro cuando el tornillo se fracturó. Este comportamiento causó en cierta medida el aspecto plano, sin rasgos distintivos. En la comparación a la figura 1.3, se notan diversas características. Por ejemplo, el número de “marcas de playa” observado en cada superficie de la fractura es perceptiblemente diferente. Durante la vida de los dos miembros roscados, las condiciones que tienden a producir “marcas de playa” ocurrieron con más frecuencia para el soporte de columna, que para el perno del asiento de la bicicleta. El perno del asiento estuvo en el servicio por menos de 2 años y experimentó varios cambios (medio ambiente) estacionales. Esto contribuye al número de las “marcas de playa” observadas. El número de los sitios de formación de la grieta, identificado cerca de las líneas radiales a lo largo del perímetro externo de cada miembro roscado, revela algo sobre el proceso de fabricación. El perno del asiento exhibió una superficie relativamente lisa en la raíz del hilo de rosca, mientras que el soporte de columna tenía una superficie maquinada deficientemente. La superficie mal trabajada en el maquinado incluyó más discontinuidades superficiales, que condujeron a un mayor número de nucleación de la grieta a lo largo de la raíz del hilo de rosca.

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

Por lo tanto, las condiciones superficiales son un aspecto importante de la fatiga. Quizás la diferencia más obvia entre las dos superficies de fractura son los porcentajes de la sección transversal donde la fisura por fatiga creció antes de fractura final. La diferencia se puede atribuir a los niveles cíclicos de carga impuestos a cada miembro o a la resistencia a la fractura del material usado para cada componente. Si las dos partes de las piezas fracturadas adyacentes fueron puestas juntas (algo que no se debe hacer en las fallas reales, puesto que esto puede oscurecer marcas metalúrgicas y obstaculizar el análisis fractográfico apropiado), cabrían muy cuidadosamente juntas e indicarían una muy baja deformación permanente. Debido a esta pequeña deformación visual permanente, las fallas por fatiga de este tipo se llaman "fallas frágiles". Sin embargo, este término debe ser modificado puesto que la deformación plástica substancial ocurre en pequeñas regiones locales cerca de la extremidad de la fisura por fatiga y en los sitios de formación de la fisura. Muchas fallas por fatiga no tienen deformación permanente visual apreciable, pero los mecanismos de formación y crecimiento de la fisura implican regiones locales pequeñas de la deformación plástica. Fallas similares a estas son presentadas en la figura 1.2, a menudo se llaman "fallas típicas por fatiga" porque exhiben las siguientes características comunes siguientes:

Sitio o sitios distintos de formación de la fisura.

“Marcas de playa” indicativas de crecimiento de la fisura.

Región final distinta de la fractura.

La formación de la fisura por fatiga en la superficie superior es propagada a lo largo de una hélice a 45°.

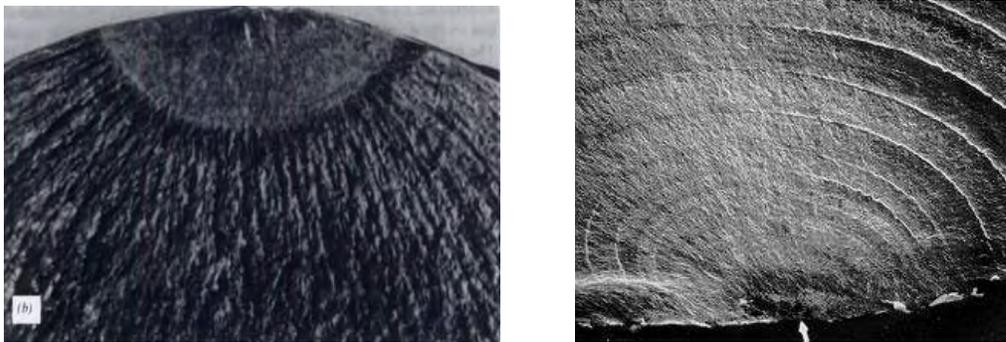


Figura 1.3 Acercamiento de la forma de la fisura por fatiga.

Observe que las “marcas de playa” no son evidentes en esta superficie lisa semi-elíptica de la fisura por fatiga. La región final de la fractura tiene un aspecto fibroso, con las líneas radiales perpendiculares al perímetro de la fisura por fatiga elíptica. Estos patrones de la parte radial o del "río" se pueden ver a menudo en las superficies finales de la fractura y en el origen de la fisura.

El cuadro de la figura 1.4 muestra las superficies de la fractura debido a las cargas axiales y a cuatro tipos de flexión con cargas altas y bajas en tres tipos de probetas: carga axial en tensión y tensión-compresión, flexión unidireccional, flexión con carga media nula ( $R=-1$ ), y flexión rotación. En cada caso, la formación de las grietas de fatiga se sitúa en la superficie o la esquina y eventualmente crece en el plano de la tensión extensible máxima.

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

Para la flexión con carga media nula, la formación de las grietas generalmente es en lados opuestos; esto es debido a que en los dos lados opuestos se localizan los máximos esfuerzos de tensión y de compresión respectivamente.

La figura 1.4 [39] muestra las superficies de la fractura como función de la carga aplicada y la geometría de las probetas; la figura 1.5 muestra estas superficies para carga axial en flexión.

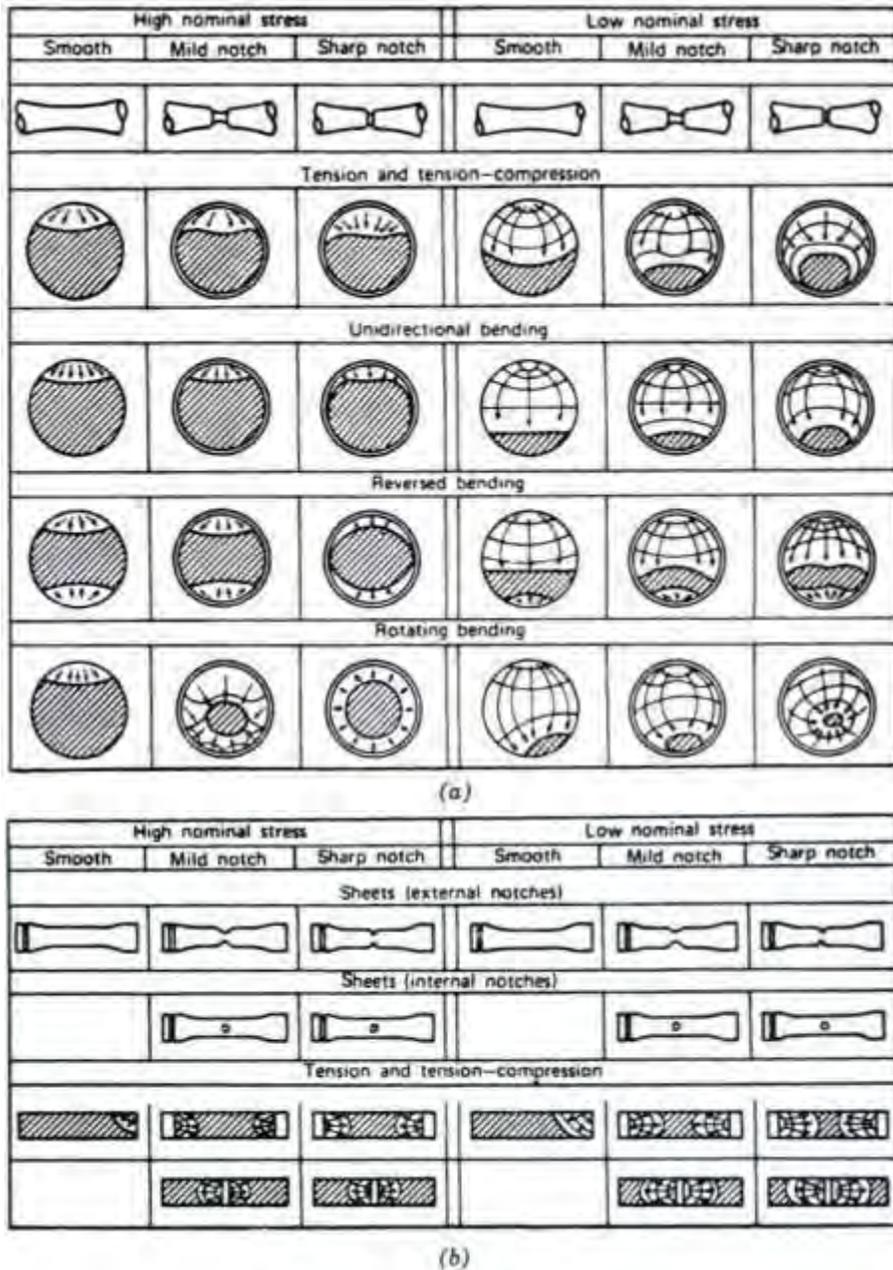


Figura 1.4 Superficies de fracturas por fatiga para cargas axiales y flexiones, (a) especímenes redondos, (b) espécimen de hoja o de placa

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

La figura 1.5 muestra los diferentes patrones de las fisuras encontradas comúnmente en la fractura por torsión. Por ejemplo, la imagen 2a muestra una muesca suave en una rosca con un gran porcentaje de la superficie mostrando el crecimiento de fisura; esto puede traducir que la carga en este elemento es relativamente baja.

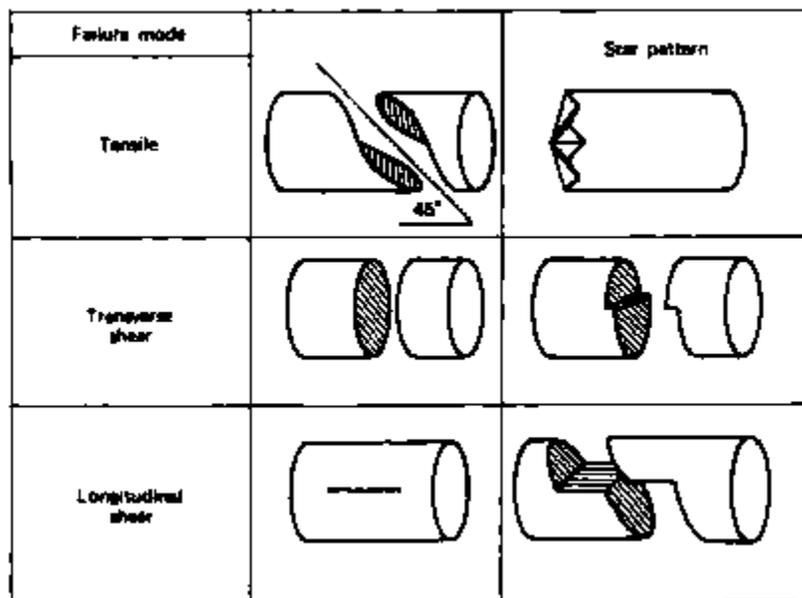


Figura 1.5 Diferentes patrones de la grieta encontrados comúnmente en fatiga por torsión.

En contraposición, en el tornillo del asiento mostrado en figura 2b, la muesca roscada aparece mucho más profunda, y un porcentaje más pequeño del crecimiento de fisura de la sección transversal es mostrada. Así, es probable que un esfuerzo nominal mayor haya sido aplicado a este tornillo. Sin embargo, la dureza del material fracturado puede también desempeñar un papel significativo en tamaño final de la fisura.

#### 1.4 Fatiga mecánica de materiales

En ingeniería y en especial, en ciencia de materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad. La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes (puentes, aviones, etc.). Es muy importante ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también ocurre en polímeros y cerámicas. Este fenómeno por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de esfuerzos variables en el tiempo, se denomina, "Fatiga".

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

Podemos definir a la fatiga mecánica de los materiales como el “deterioro que se desarrolla bajo la acción de ciclos repetidos de carga o deformación de cierta amplitud, en una determinada pieza”; este deterioro se manifiesta en fisuración y eventualmente rotura. Si bien la fatiga se desarrolla en todos los materiales (incluyendo metales, plástico, gomas, etc.), nuestro estudio se concentrará en aceros inoxidable.

Cada ciclo de fluctuación de la tensión deteriora o daña la pieza un poco. Tras un número de ciclos determinados, la pieza está tan debilitada que rompe por fatiga. Para complicar el tema también se observa en piezas metálicas que por debajo de un cierto valor de la tensión no se produce la rotura por elevado que sea el número de ciclos de trabajo de la pieza. Todo esto hace que la fatiga sea realmente compleja y por desgracia para el ingeniero de diseño una de las primeras causas de fallo en muchas piezas construidas con materiales férricos. La vida a fatiga se puede definir como el "fallo debido a cargas repetitivas que incluye la iniciación y propagación de una grieta o conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura". El análisis de fatiga estructural es una herramienta para evaluar la validez de un diseño, o su durabilidad, bajo condiciones de carga simples o complejas conocidas como cargas de servicio. La acción de la fatiga se puede observar en diferentes piezas, pero sobre todo en partes móviles como pueden ser: componentes de máquinas rotativas, resortes, aeronaves, neumáticos, etc., y afecta desde juguetes para niños hasta el transbordador espacial.

**Resistencia a la fatiga:** Es la tensión que el material puede soportar durante un número de repeticiones o ciclos.

**Límite de fatiga:** Es la máxima tensión que un material puede soportar durante un número de repeticiones o ciclos. Los resultados de los estudios estructurales (estáticos y dinámicos, lineales y no lineales) se usan como los datos básicos de partida para definir el estudio de fatiga. El número de ciclos requeridos para que el fallo por fatiga ocurra en un punto depende del material y de la fluctuación de las tensiones.

Las grietas por Fatiga se inician en la superficie del material. Por ello debe evitarse en lo posible ralladuras y arañazos en las superficies de buen acabado (por ejemplo, grabar el nombre comercial en la pieza), sobre todo en zonas con elevado nivel de tensión. Cualquier tratamiento superficial (térmico o mecánico) que produzcan un estado de tensiones residuales de compresión en la superficie de las piezas aumentando la dureza de la superficie (por ejemplo, el temple, granallado o laminado superficial) incrementará la vida a fatiga de la pieza.

### **1.4.1 Fases de un fallo por fatiga**

Los fallos por Fatiga se producen en tres fases:

**Fase 1 (Iniciación):** Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material pero en general ocurren alrededor de alguna fuente de concentración de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión son más elevadas.

Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura

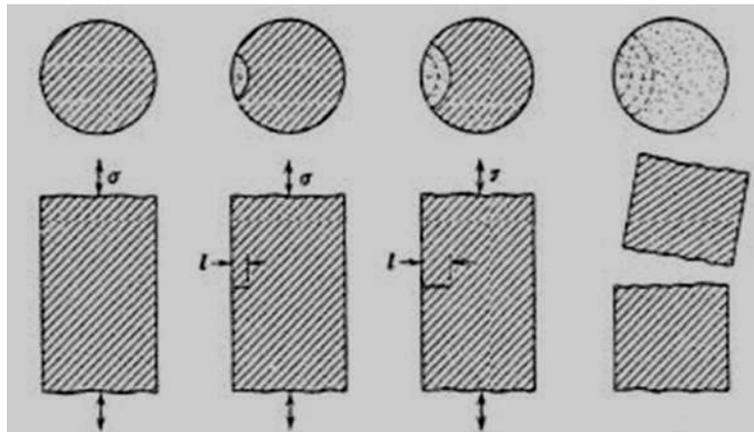
## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

microscópica del material, ralladuras, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación. En materiales frágiles el inicio de grieta puede producirse por defectos del material (poros e inclusiones) y discontinuidades geométricas.

Fase 2 (Propagación): Alguna o todas las grietas crecen por efecto de las cargas. Además, las grietas generalmente son finas y de difícil detección, aun cuando se encuentren próximas a producir la rotura de la pieza.

Fase 3 (Rotura): La pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

En la figura 1.6 se pueden apreciar las principales fases de fallo por fatiga.



**Figura 1.6** Fases de un fallo por fatiga.

### 1.4.2 Factores que intervienen en un proceso de rotura por fatiga.

Son diversos los factores que intervienen en un proceso de rotura por fatiga a parte de las tensiones aplicadas. Así pues, el diseño, tratamiento superficial y endurecimiento superficial pueden tener una importancia relativa.

#### 1.4.2.1 Diseño

El diseño tiene una influencia grande en la rotura de fatiga. Cualquier discontinuidad geométrica actúa como concentradora de tensiones y es por donde puede nuclear la grieta de fatiga. Cuanto más aguda es la discontinuidad, más severa es la concentración de tensiones. La probabilidad de rotura por fatiga puede ser reducida evitando estas irregularidades estructurales, o sea, realizando modificaciones en el diseño, eliminando

cambios bruscos, por ejemplo, exigiendo superficies redondeadas con radios de curvatura grandes.

#### **1.4.2.2 Tratamientos superficiales**

En las operaciones de mecanizado, se producen pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción del corte. Estas marcas limitan la vida a fatiga pues son pequeñas grietas las cuales son mucho más fáciles de aumentar. Mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta la vida a fatiga. Uno de los métodos más efectivos de aumentar el rendimiento es mediante esfuerzos residuales de compresión dentro de una capa delgada superficial. Cualquier tensión externa de tracción es parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de nucleación de la grieta, y por tanto de rotura por fatiga se reduce.

#### **1.4.2.3 Endurecimiento superficial**

Es una técnica por la cual se aumenta tanto la dureza superficial como la vida a fatiga de los aceros aleados. Esto se lleva a cabo mediante procesos de carburación y nitruración, en los cuales un componente es expuesto a una atmósfera rica en carbono o en nitrógeno a temperaturas elevadas. Una capa superficial rica en carbono o nitrógeno es introducida por difusión atómica a partir de la fase gaseosa. Esta capa es normalmente de 1mm de profundidad y es más dura que el material del núcleo. La mejora en las propiedades de fatiga proviene del aumento de dureza dentro de la capa, así como de las tensiones residuales de compresión que se originan en el proceso de cementación y nitruración.

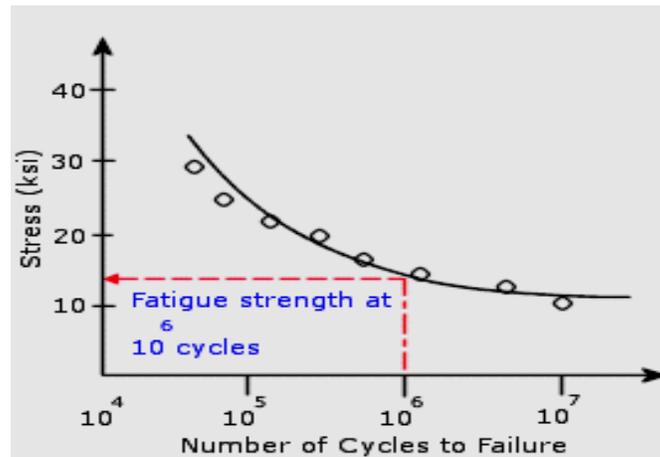
#### **1.4.3 Curvas S-N**

El diagrama S-N es la forma fundamental de representar los datos de la duración de una probeta a la fatiga, ilustra la variación de vida media en fatiga con la tensión. Se la suele llamar curva de fatiga o curva S-N (Tensión-Numero de ciclos), e indica la duración de la probeta expresada en números de ciclos hasta la rotura para la máxima tensión aplicada.

De acuerdo a la figura 1.7 las ordenadas representan las tensiones máximas que producen la rotura por fatiga; y en abscisas, su duración en ciclos. Proviene de someter a ensayos una serie de probetas para determinar el número de ciclos (N) que soporta el material a distintos  $\sigma$ , es un modelo simplificado de la manera en que trabaja una pieza bajo cargas de fatiga en general.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---



**Figura 1.7** Típico diagrama: Tensión Vs. Número de Ciclos.

La generación de la curva S-N de un material requiere muchos ensayos para de una forma estadística variar las tensiones alternas, las tensiones medias y contar el número de ciclos. Para caracterizar un material se toma un conjunto de probetas y se las somete a sollicitaciones variables con diferentes niveles de tensión, contándose el número de ciclos que resiste hasta la rotura.

Debido a la elevada dispersión estadística propia de la fatiga los resultados se agrupan en una banda de roturas. Una parte de esta dispersión puede atribuirse a errores del ensayo, pero es una propiedad del fenómeno físico lo cual obliga a realizar un gran número de ensayos de probetas a fin de determinar la banda de fractura con suficiente precisión. Por tanto, caracterizar un material a fatiga supone un coste muy importante. La dispersión en los resultados es una consecuencia de la sensibilidad de la fatiga a varios parámetros del ensayo y del material que son imposibles de controlar de forma precisa. Estos parámetros incluyen la fabricación de las probetas y la preparación de las superficies, variables metalúrgicas, alineamiento de la probeta en el equipo de ensayos, etc.

#### 1.4.4 Parámetros característicos.

Para las cargas de fatiga se usará la notación siguiente:

La tensión es designada por S (aunque suele usarse S para la tensión asociada con la fatiga).  
Sollicitación: Es la variable dependiente (que se controla), pueden ser cargas o deformaciones.

Cargas (o tensiones): La mayoría de los ensayos se caracterizan por ser de ciclos iguales.

Deformaciones: Hay veces en que son deformaciones lo que se aplican o controlan.

## “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

Las solicitaciones que producen el fenómeno de fatiga pueden ser de distintos tipos: Como son de tracción, compresión, flexo-torsión, etc., variando su magnitud de un máximo a un mínimo, actuando combinados o no combinados. Los casos más comunes son: flexión rotativa, flexión plana, tracción-compresión (axial), torsión, etc, siendo necesario conocer, además del tipo de tensión y origen de las mismas, el grado de variación y tipo de ciclos.

Ciclos: es la variable dependiente, la que se computa como resultado del ensayo. Nótese que se trata solo de vueltas (o repeticiones o ciclos) y no su número en una unidad de tiempo, (en este último caso tendríamos frecuencia, cuyo efecto es secundario).

## CAPÍTULO II CONDICIONES PARA LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 2.1 Probeta (Aluminio AISI SAE 6061-T6)

El perfil de la probeta utilizado corresponde a una probeta cilíndrica con una depresión central en forma de reloj de arena, figura 2.1. Como mencionado anteriormente, no existe en la actualidad una norma internacional para estas probetas sometidas a ensayos de fatiga en flexión rotativa. Para definir las dimensiones geométricas de las mismas se han tomado algunas referencias de laboratorios japoneses que trabajan con estas aleaciones probando su resistencia en fatiga en las condiciones mencionadas.

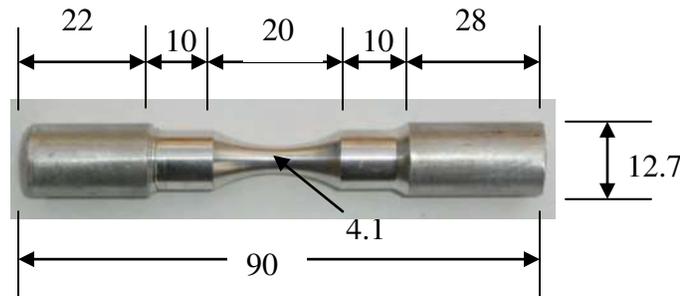


Figura 2.1 Dimensiones de la probeta (mm).

### 2.2 Material de prueba

Las tablas 2.1 y 2.2 muestran las composiciones químicas y propiedades mecánicas respectivamente para la aleación del Aluminio 6061 T-6. Las propiedades mecánicas de este material han sido mejoradas mediante el tratamiento térmico T-6. Un tratamiento térmico, en sentido amplio de la palabra, se refiere al calentamiento y enfriamiento de los metales en estado sólido, para modificar sus propiedades mecánicas, su estructura metalográfica o eliminar tensiones residuales. Cuando se le aplica a aleaciones de aluminio el término tratamiento térmico se refiere usualmente a las operaciones empleadas para incrementar la resistencia y la dureza de las aleaciones de forja o de moldeo endurecibles por precipitado. La solubilización de las segundas fases, capaces de precipitar durante el envejecimiento no es el único cambio microestructural que tiene lugar en las aleaciones de fundición al ser tratadas térmicamente. La designación del tratamiento térmico del aluminio es T6 se refiere: puesta en solución y envejecimiento artificial que se utiliza generalmente para incrementar el límite elástico y la resistencia a la tracción. Si se desea un producto que tenga buena maquinabilidad hay que incrementar la dureza. El T6 es ideal para elevar la dureza y la resistencia a la tracción.

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

Los tratamientos T6 típicos de las aleaciones de aluminio:

- Puesta en solución de 520-530 °C durante 2-8 horas
- Enfriamiento en agua a 20-80 °C
- Envejecimiento artificial 150-180 °C durante 2-8 horas

Tabla 2.1 Composición química de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061 – T6.

<b>Composición química (%)</b>	
Al	95.8 – 98.6
Cr	0.04 – 0.035
Cu	0.15 – 0.4
Fe	Max 0.7
Mg	0.8 – 1.2
Mn	Max0.15
Si	0.4 – 0.8
Ti	Max 0.15
Zn	Max 0.25

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio AISI-SAE 6061 – T6.

<b>Propiedades mecánicas</b>	
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	2700
Dureza Brinell	95
Esfuerzo de cedencia (MPa)	270
Esfuerzo Ultimo (MPa)	310
Modulo de Elasticidad (GPa)	68.9
Coefficiente de Poisson	0.33
Elongación (%)	17

## CAPÍTULO III ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 3.1 Metodología

La metodología comprende dos etapas en el desarrollo del proyecto:

En la primera etapa se contemplan las tareas siguientes: búsqueda de información bibliográfica, maquinado de probetas, control de defectos artificiales inducidos, visualización en el microscopio óptico.

Tabla 3.1 Tipo y cantidad de ensayos a realizar.

Tipo de Ensayo:	Cantidad de ensayos:
Probetas sin pitting	15 probetas a ensayar
Probetas con 1 solo pitting	20 probetas a ensayar
Probetas con 2 pittings cercanos	20 probetas a ensayar

Tabla 3.2 Tipo y cantidad de ensayos a realizar para probetas con 2 pittings cercanos con diferentes distancias de separación, diferentes diámetros y diferentes posiciones (transversal, longitudinal).

Tipo de Ensayo:	Cantidad de ensayos:
Probetas con 2 pittings cercanos:	64 probetas a ensayar
100µm de separación:	
.Huecos iguales longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos iguales transversales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes transversales	4 probetas a ensayar
200µm de separación:	
.Huecos iguales longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos iguales transversales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes transversales	4 probetas a ensayar
300µm de separación:	
.Huecos iguales longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos iguales transversales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes transversales	4 probetas a ensayar
400µm de separación:	
.Huecos iguales longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes longitudinales	4 probetas a ensayar
.Huecos iguales transversales	4 probetas a ensayar
.Huecos diferentes transversales	4 probetas a ensayar

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

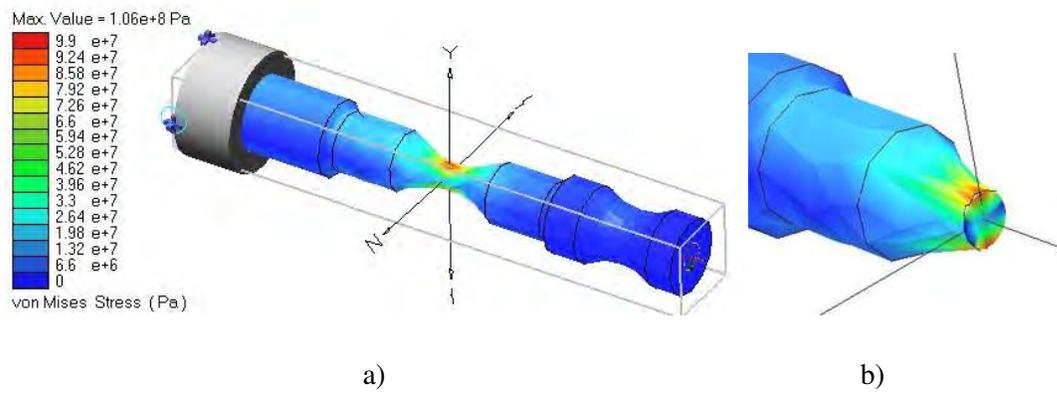
---

---

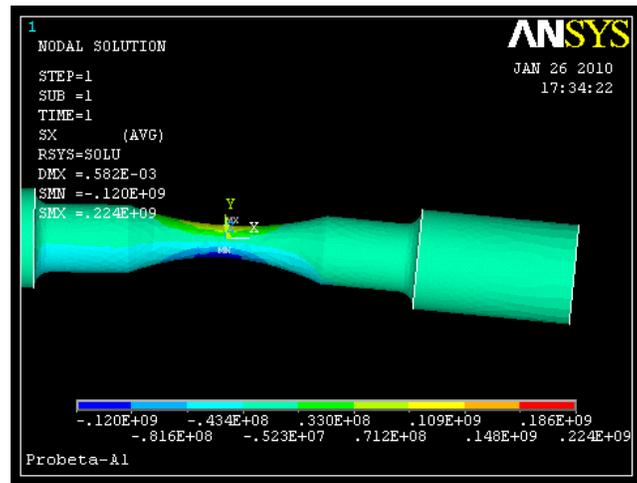
La segunda etapa comprende la puesta en marcha de ensayos experimentales, análisis por microscopio de superficies de fractura, síntesis de resultados y redacción de la tesis de maestría, participación a congresos nacionales y/o internacionales para la difusión de resultados.

### **3.2 Simulación Numérica**

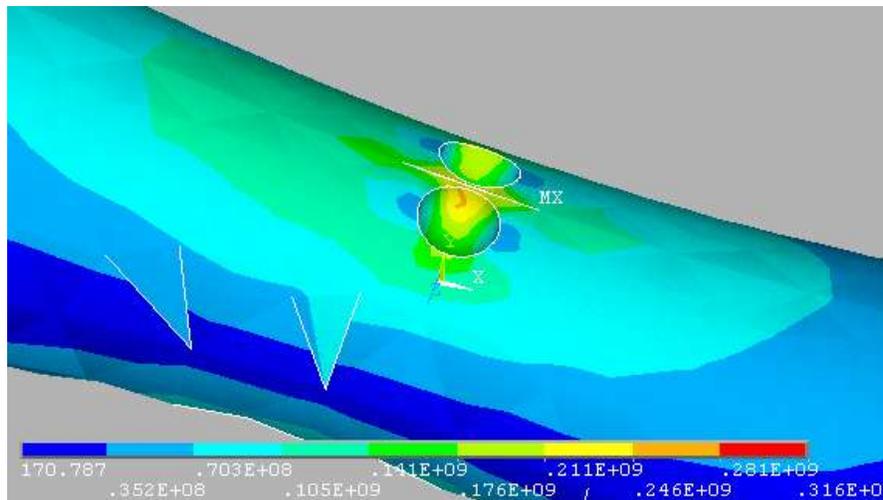
Para determinar el esfuerzo cercano al límite elástico del material se llevo acabo una serie de simulaciones numéricas por Visual Nastran para las probetas sin pitting y por Elemento Finito para las probetas con un solo pitting y 2 pittings cercanos. En la figura 3.1 se presentan algunos resultados de estas simulaciones.



“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”



c)



d)

Figura 3.1 Simulación Numérica: a) Probeta sin pitting, b) sección transversal de la probeta sin pitting, c) Probeta 1 solo pitting y d) distribución de esfuerzos en la probeta con 2 pittings cercanos.

También se realizaron simulaciones numéricas para 2 pittings cercanos con diferentes distancias de separación, diferentes diámetros y diferentes posiciones (transversal, longitudinal), tal y como se muestra en las figuras 3.2 y 3.3.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

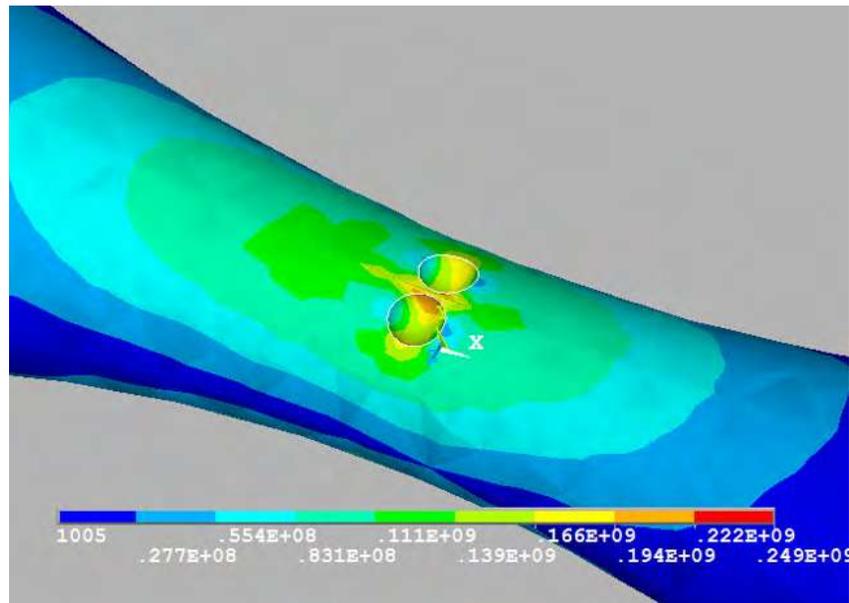


Figura 3.2 Simulación numérica para una probeta con 2 huecos cercanos, mismos diámetros (1mm), en dirección transversal y separados 100µm.

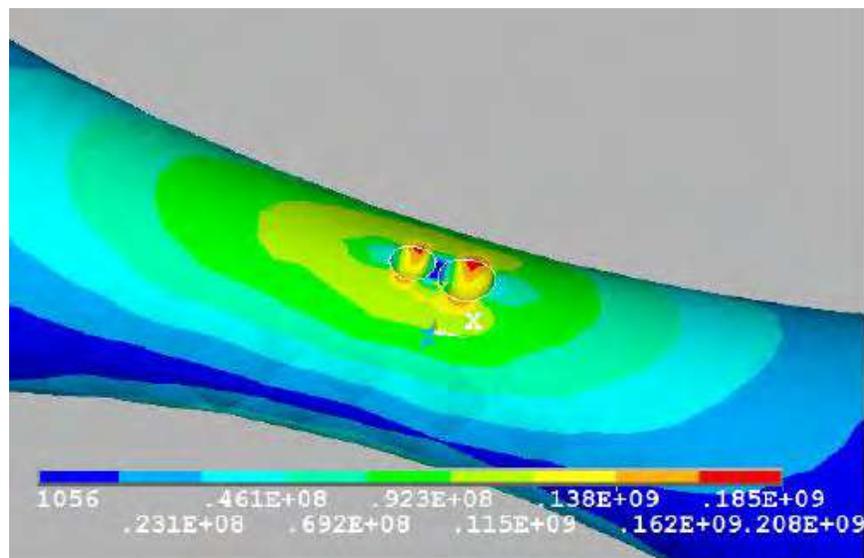


Figura 3.3 Simulación numérica para una probeta con 2 huecos cercanos, diferentes diámetros (1mm-0.8mm), en dirección longitudinal y separados 100µm.

### 3.3 Dimensiones de los pittings

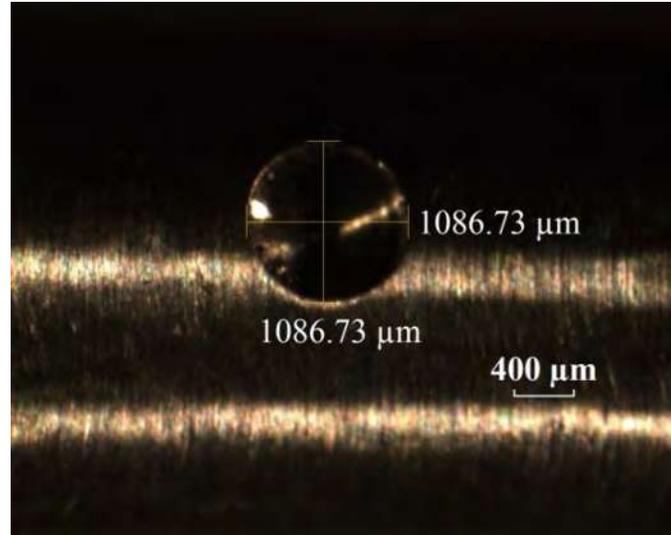


Figura 3.4 Dimensiones de las Probetas con 1 solo pitting.

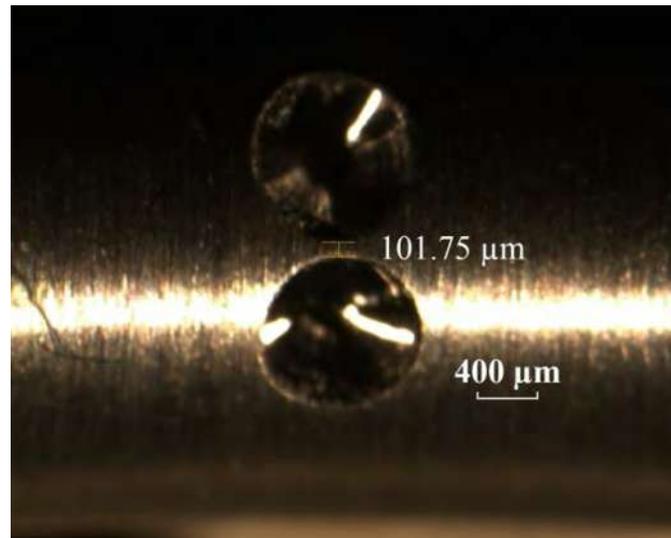


Figura 3.5 Dimensiones de la separación entre las probetas con 2 pittings cercanos.

La Figura 3.4 nos muestra las dimensiones de los pittings o huecos que estuvieron comprendidas entre 970 y 1050 micras, la Figura 3.5 muestra la separación que hubo entre las probetas de 2 pittings cercanos que estuvo alrededor de las 100 micras.

También podemos observar en las siguientes figuras muchas de las dimensiones y distancias de separación de los ensayos realizados (figuras 3.6-3.19).

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

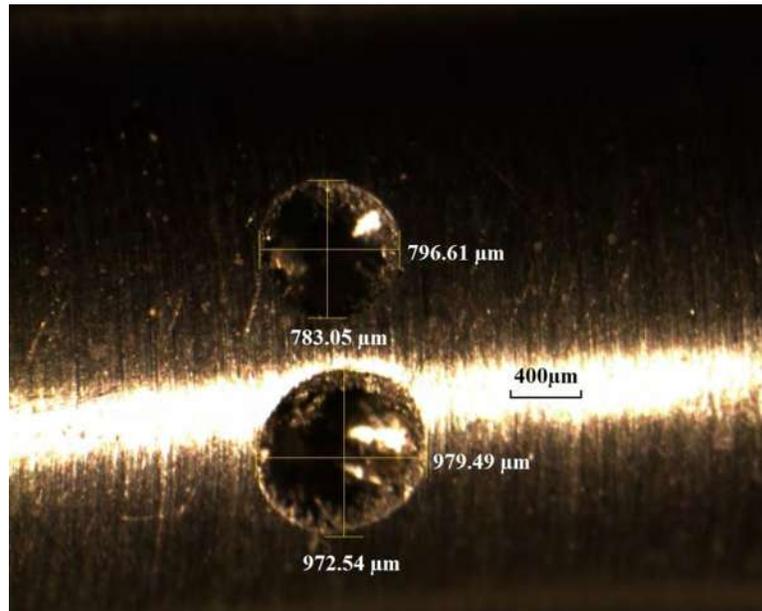


Figura 3.6 Dimensiones de las probetas 2 pittings diámetros diferentes (800-1000 μm).

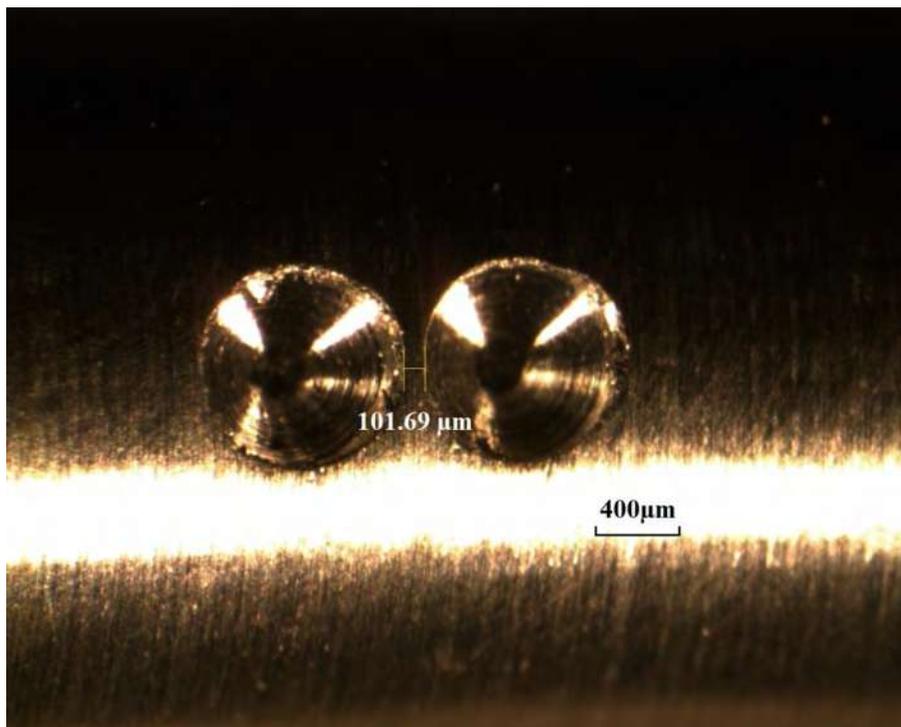


Figura 3.7 Distancias de separación en pittings iguales (1000 μm) separados 100 μm en dirección longitudinal.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

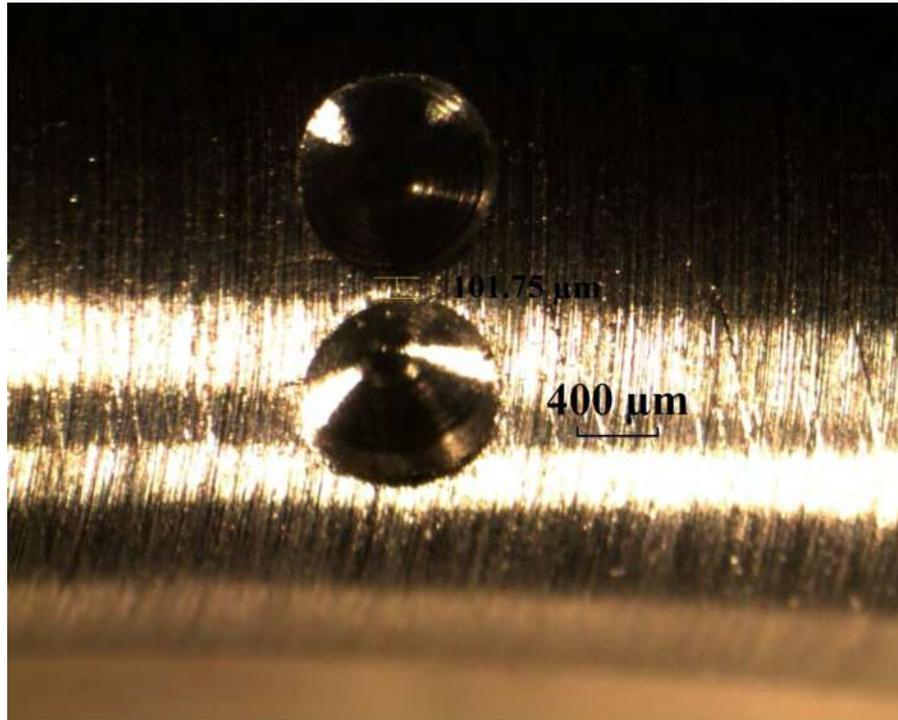


Figura 3.8 Distancias de separación en pittings iguales ( $1000 \mu\text{m}$ ) separados  $100 \mu\text{m}$  en dirección transversal.

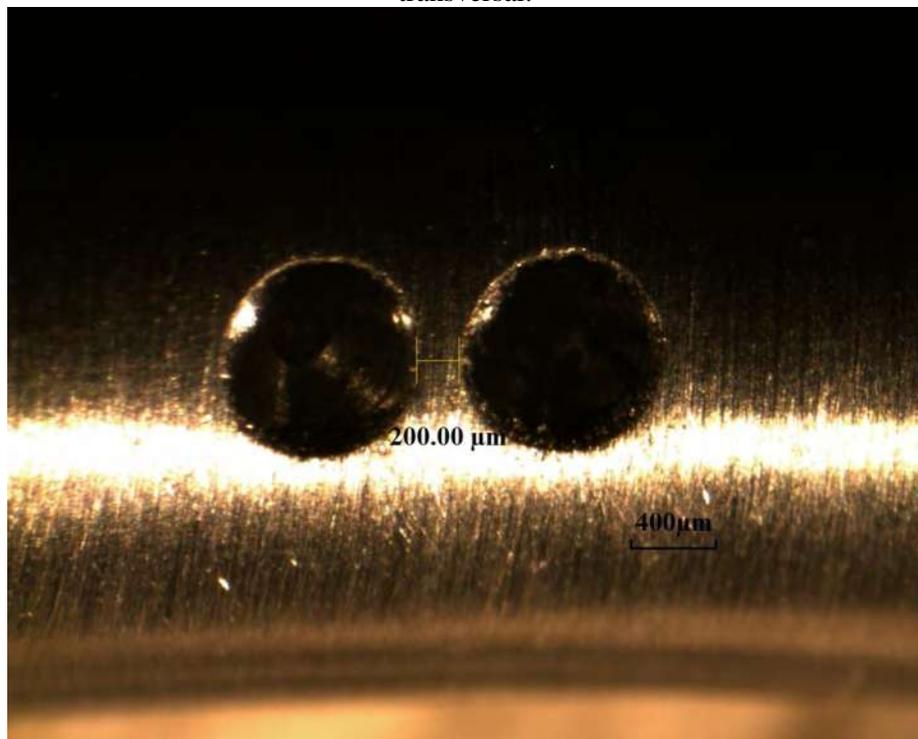


Figura 3.9 Distancias de separación en pittings iguales ( $1000 \mu\text{m}$ ) separados  $200 \mu\text{m}$  en dirección longitudinal.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

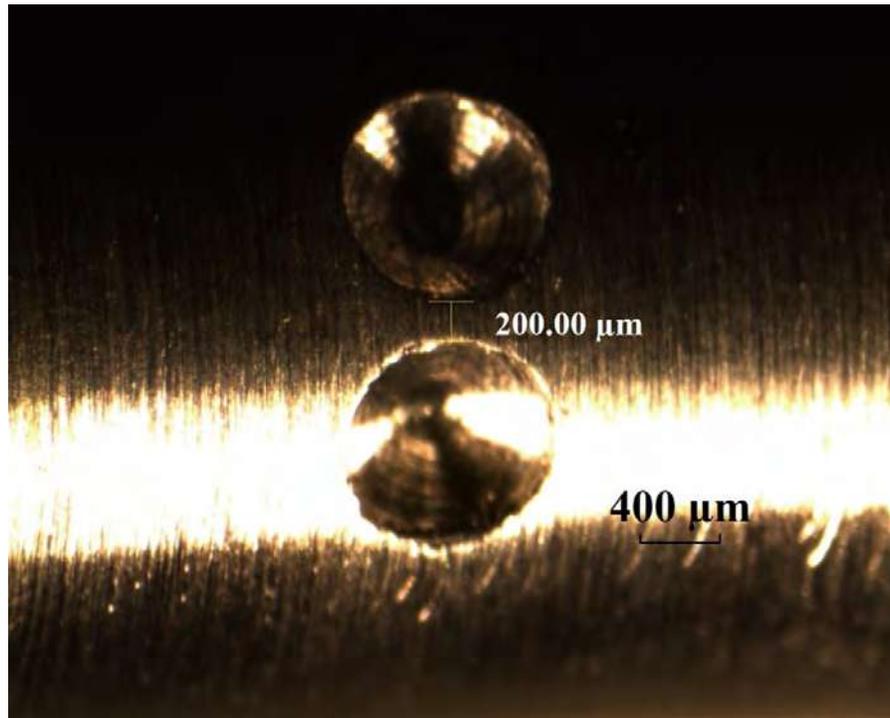


Figura 3.10 Distancias de separación en pittings iguales (1000 μm) separados 200 μm en dirección transversal.

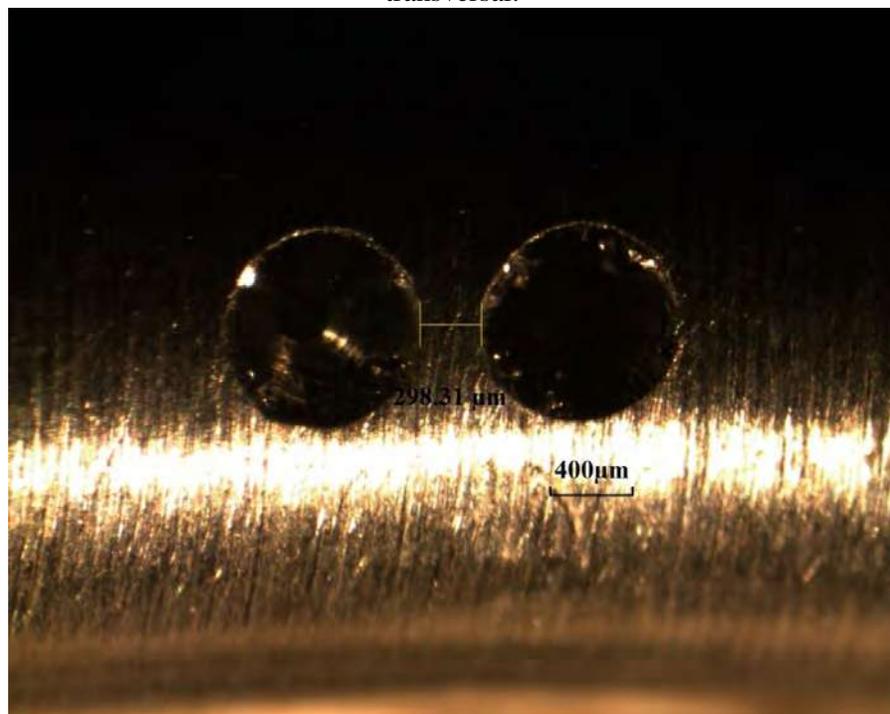


Figura 3.11 Distancias de separación en pittings iguales (1000 μm) separados 300 μm en dirección longitudinal.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

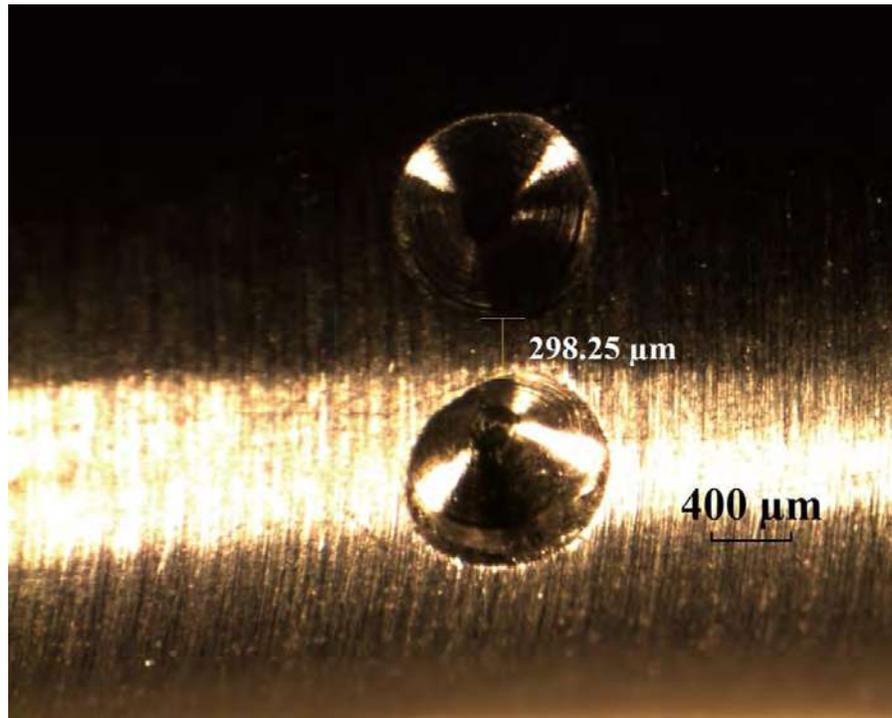


Figura 3.12 Distancias de separación en pittings iguales (1000 μm) separados 300 μm en dirección transversal.

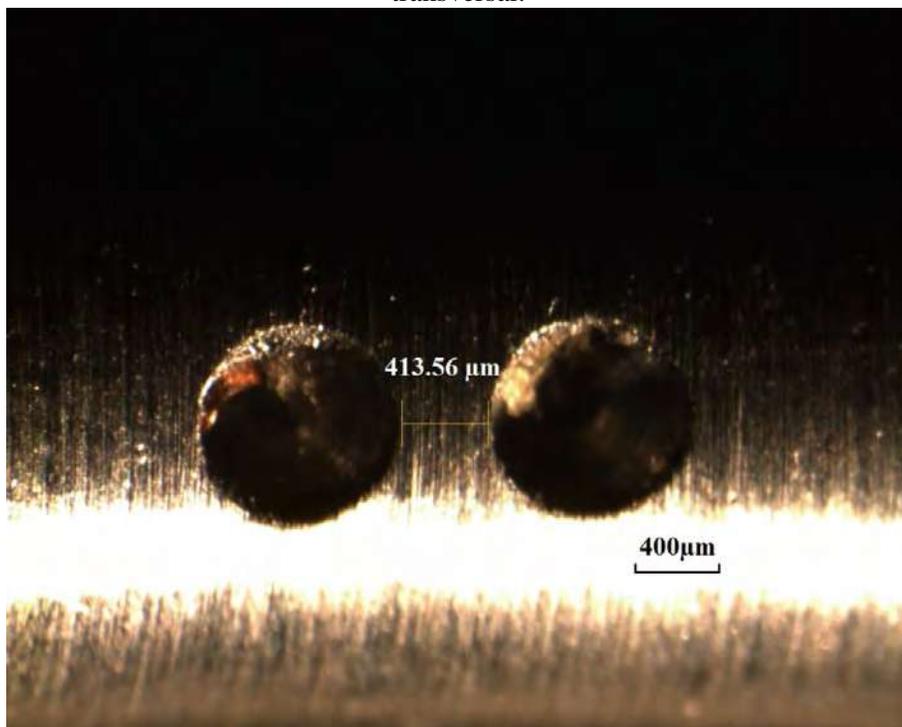


Figura 3.13 Distancias de separación en pittings iguales (1000 μm) separados 400 μm en dirección longitudinal.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

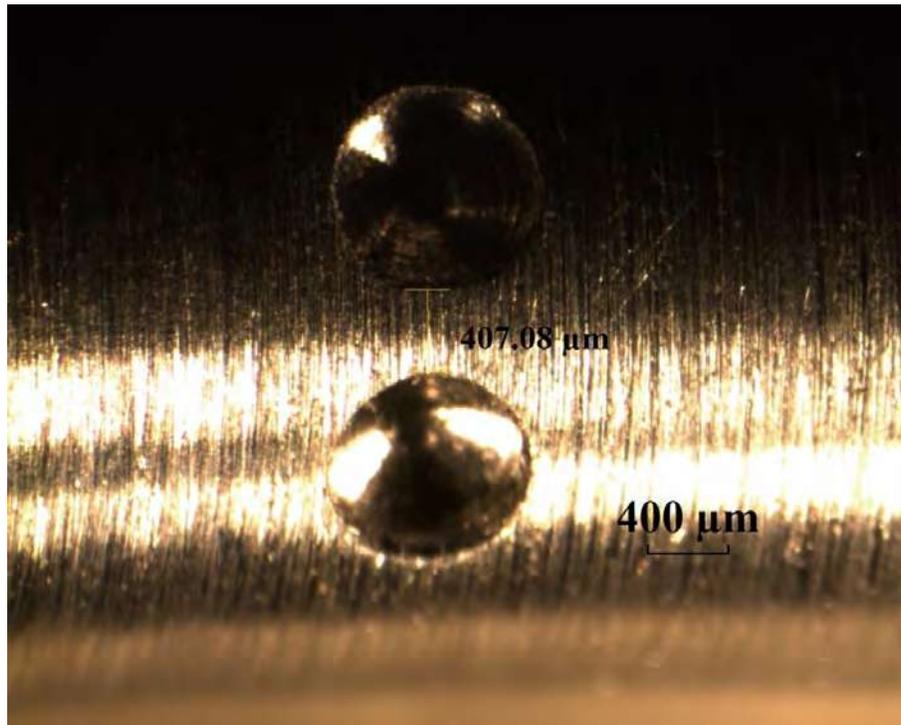


Figura 3.14 Distancias de separación en pittings iguales (1000 μm) separados 400 μm en dirección transversal.

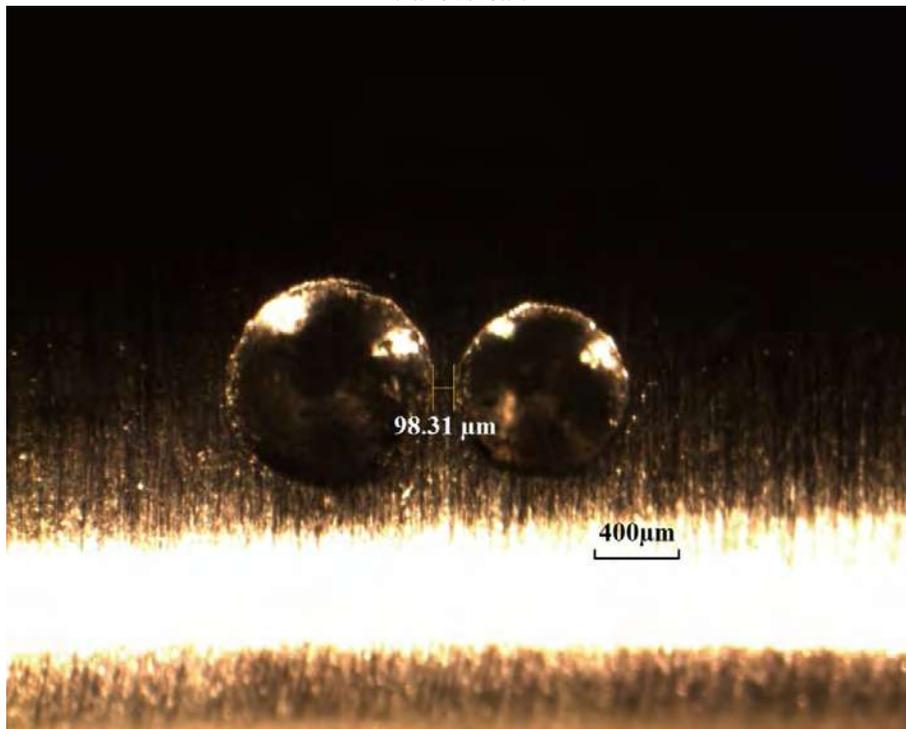


Figura 3.15 Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 μm) separados 100 μm en dirección longitudinal.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

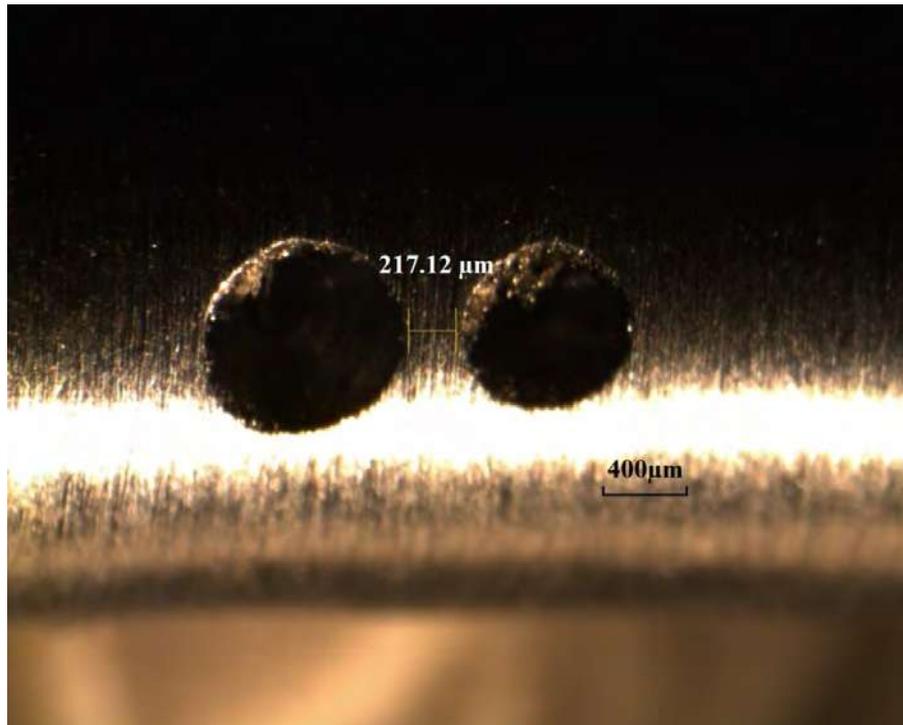


Figura 3.16 Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 μm) separados 200 μm en dirección longitudinal.

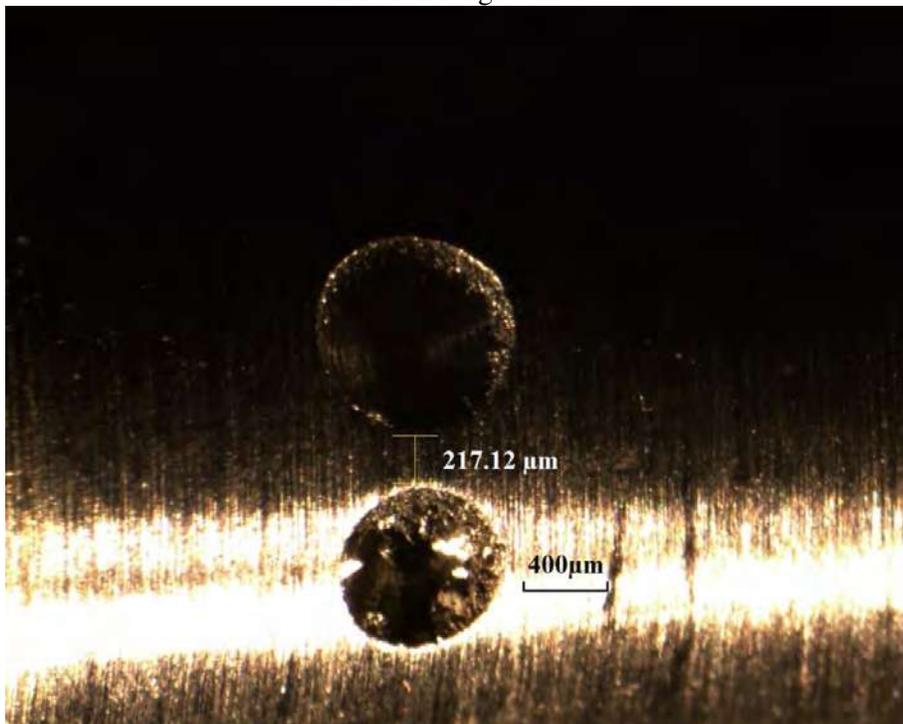


Figura 3.17 Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000 μm) separados 200 μm en dirección transversal.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

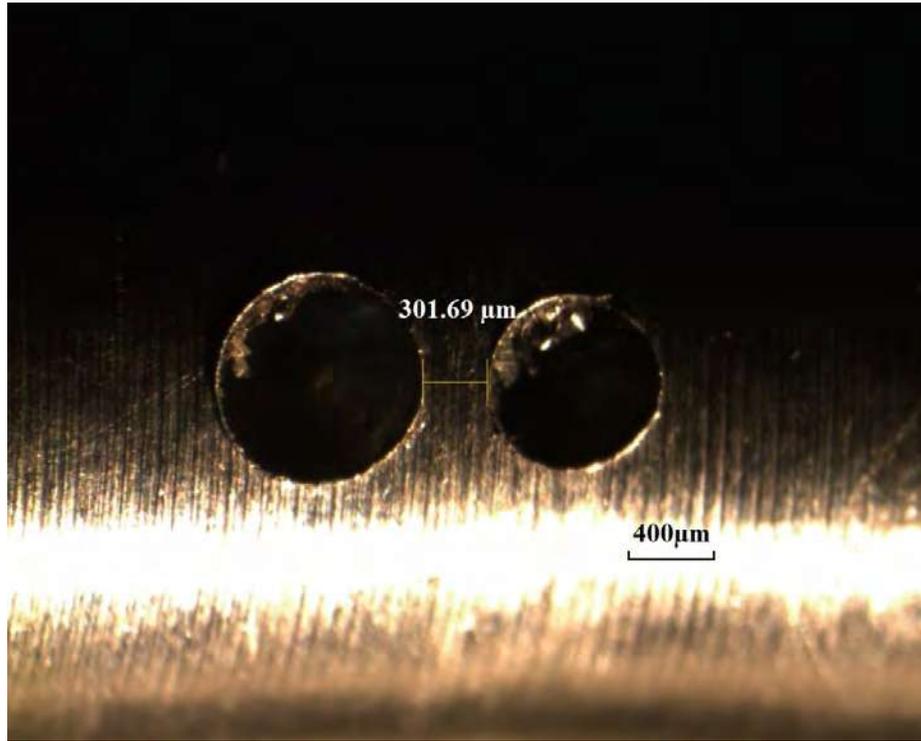


Figura 3.18 Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000  $\mu\text{m}$ ) separados 300  $\mu\text{m}$  en dirección longitudinal.

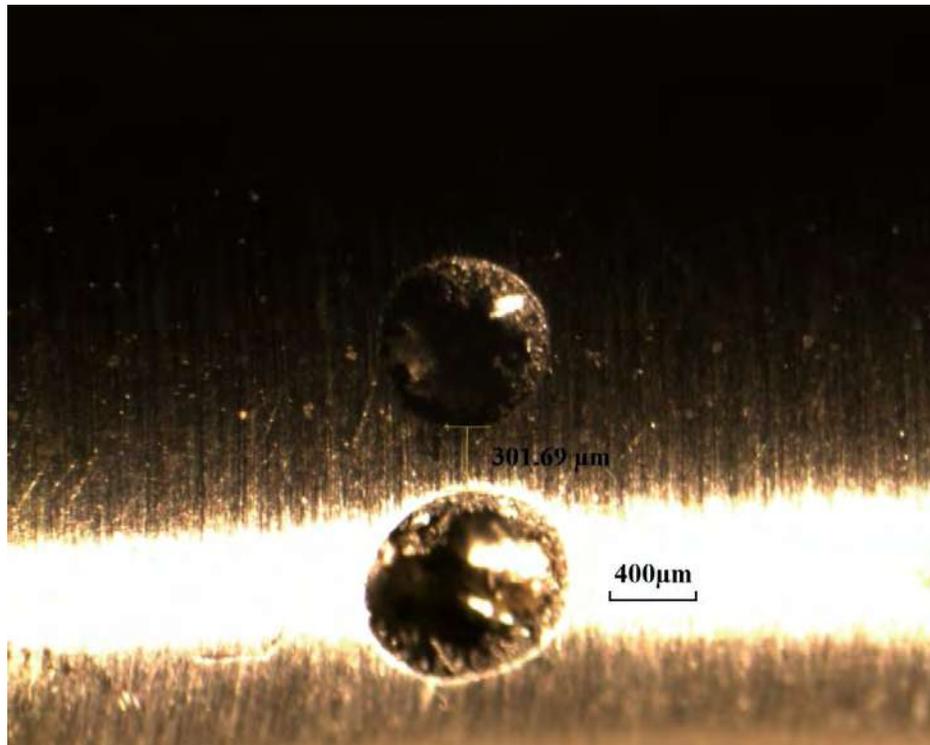
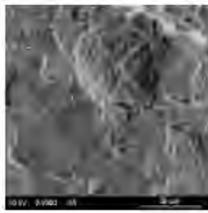


Figura 3.19 Distancias de separación en pittings diferentes (800-1000  $\mu\text{m}$ ) separados 300  $\mu\text{m}$  en dirección transversal.

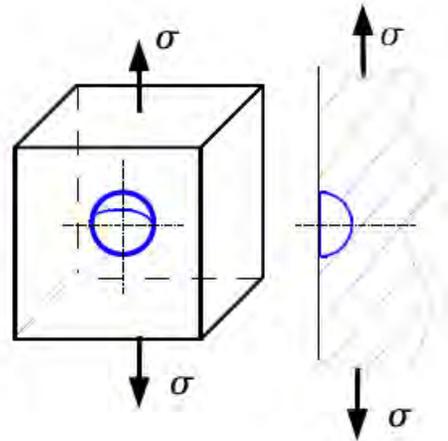
### 3.4 Factores importantes para la obtención de resultados.

Un parámetro muy importante para la obtención de resultados es el denominado factor de concentrador de esfuerzos ( $K_t$ ), este factor se determina en específico para cada tipo de ensayo, ya que es diferente el utilizado para un solo pitting que el utilizado para 2 pittings, a continuación se muestran las ecuaciones para determinar ambos casos, una de ellas se sacó de la literatura el que se necesita para obtener 1 solo pitting (Figura 3.4) [36] y el otro se determinó mediante ensayos numéricos que se realizaron en ANSYS, mediante el método de prueba y error se fue ajustando una ecuación que se adecuara a los resultados obtenidos mediante simulación numérica.

- Hemispherical surface cavity



$$K_t = 1.522 \left( 1 + \frac{2}{7 - 5\nu} \right)$$

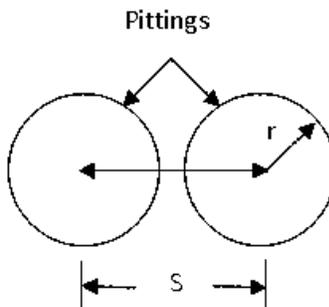


**Figura 3.20** Ecuación para determinar el factor de concentrador de esfuerzos para un solo pitting.

Donde  $\nu$  es el módulo de poisson, que para el aluminio es de 0.33, por lo tanto haciendo operaciones en factor de concentración de esfuerzos para probetas con un solo pitting es: 2.09.

$$K_t = 1.76 (S/r - 2)^{-0.33}$$

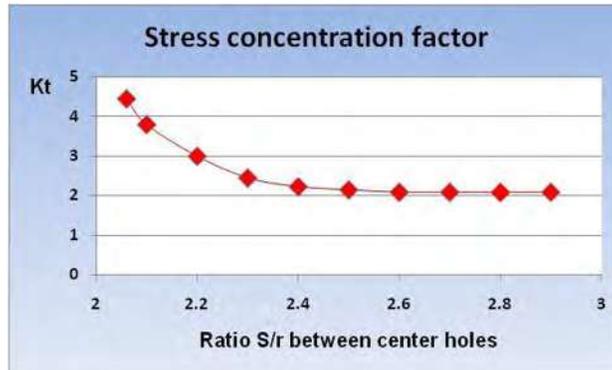
**Figura 3.21** Ecuación para determinar el factor de concentrador de esfuerzos para dos pittings cercanos.



**Figura 3.22** Variantes de relación S y r.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---



**Figura 3.23** Gráfica para determinar el factor de concentrador de esfuerzos en función de S/r.

Los resultados muestran que para 2 pittings de forma hemisférica con el mismo diámetro y separados  $S/r = 2.2$  (que es el utilizado en nuestros ensayos), el factor de concentrador de esfuerzos es :  $K_t = 3$ , también podemos ver que cuando  $S/r = 2.6$ , el factor de concentrador de esfuerzos es el mismo que el que se obtuvo para un solo hueco (2.09), para esto formulamos una ecuación empírica como la que se muestra en este trabajo, donde se relaciona el factor de concentrador de esfuerzos en función de S/r para este aluminio en el rango  $2.05 < S/r < 2.6$ . Esto nos dice que cuando S/r es 2.05 los huecos están casi pegados y es cuando se obtiene el máximo concentrador de esfuerzos y cuando S/r es 2.6 el factor de concentrador de esfuerzos es el mismo que para un solo pitting o sea 2.09.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

## CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados

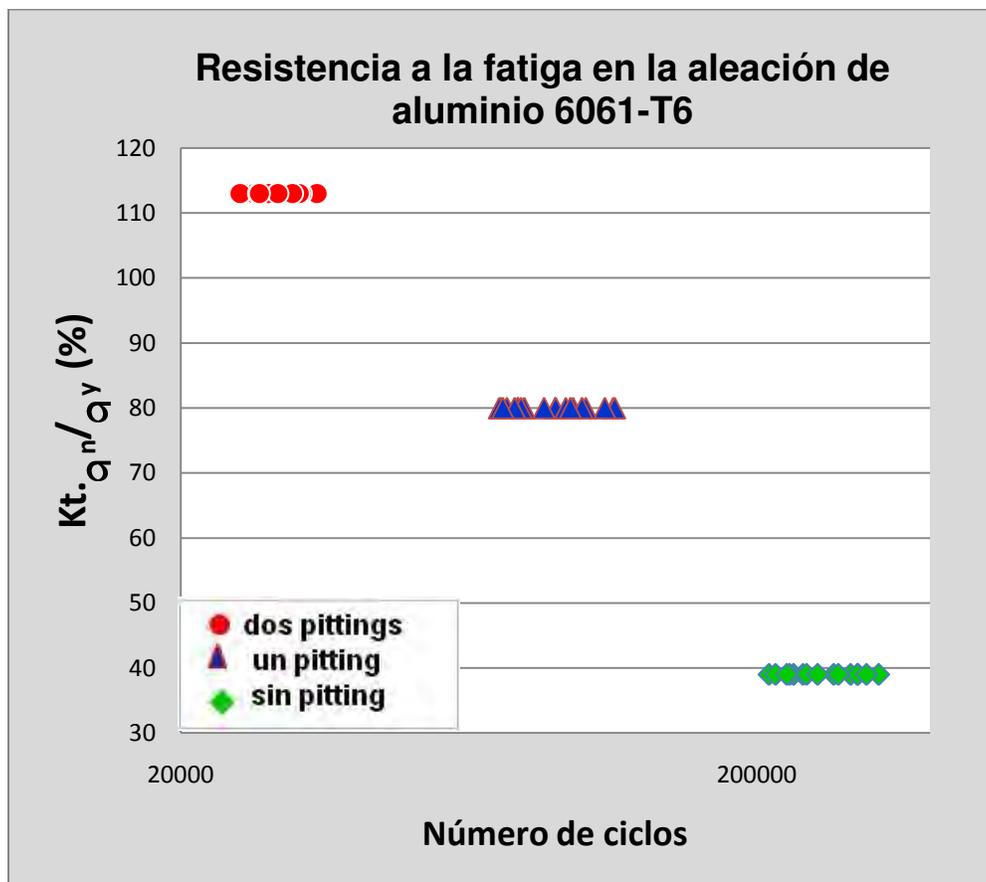
En la tabla 4.1 se muestran los parámetros experimentales y resultados. El número total de ensayos que se realizarón fue de un total de 55; la frecuencia a la que se manejo los ensayos estuvo entre 25 y 100 Hz. La carga que se aplico fue de 39 Newtons para todos los ensayos.

Tabla 4.1 Parámetros experimentales y resultados.

Ensayos	Sin Pitting	Un Pitting	Dos Pitting Cercanos	Frecuencia (Hz)	Carga Aplicada (N)	— (%)	Número de Ciclos
1				50	39	39	291000
2				50	39	39	240500
3				50	39	39	210000
4				50	39	39	299500
5				75	39	39	231600
6				50	39	39	325500
7				100	39	39	228000
8				25	39	39	215500
9				50	39	39	272000
10				50	39	39	299000
11				75	39	39	310000
12				100	39	39	244000
13				25	39	39	277000
14				25	39	39	225500
15				50	39	39	255000
16				50	39	80	89450
17				50	39	80	89550
18				50	39	80	72000
19				50	39	80	96000
20				50	39	80	77000
21				50	39	80	73700
22				50	39	80	112750
23				100	39	80	113400
24				100	39	80	109000
25				100	39	80	71500
26				50	39	80	93250
27				50	39	80	77000
28				100	39	80	79000
29				100	39	80	85500
30				100	39	80	101000
31				50	39	80	99500
32				25	39	80	95000
33				50	39	80	78000
34				50	39	80	76000
35				50	39	80	72500
36				25	39	113	34475
37				25	39	113	25750
38				50	39	113	32400
39				50	39	113	26300
40				50	39	113	30650
41				50	39	113	26850
42				50	39	113	25375

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

43				25	39	113	31520
44				25	39	113	29400
45				50	39	113	27300
46				50	39	113	30750
47				50	39	113	29850
48				25	39	113	31250
49				50	39	113	28400
50				25	39	113	27500
51				25	39	113	32100
52				25	39	113	31250
53				25	39	113	28400
54				50	39	113	29500
55				25	39	113	27400



**Figura 4.1** Gráfica de la resistencia a la fatiga de los diferentes tipos de ensayos.

La Resistencia a la fatiga para probetas sin pitting está comprendida entre  $2.1 \times 10^5$  y  $3.3 \times 10^5$  ciclos, las probetas con un solo pitting tienen una resistencia a la fatiga entre  $7.1 \times 10^4$  y  $1.14 \times 10^5$  ciclos y por último y como se observa en la tabla anterior que la resistencia cae drásticamente para probetas con 2 pittings que está comprendida entre  $2.5 \times 10^4$  y  $3.5 \times 10^4$  ciclos, tal y como se muestra en la Figura 4.1.

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

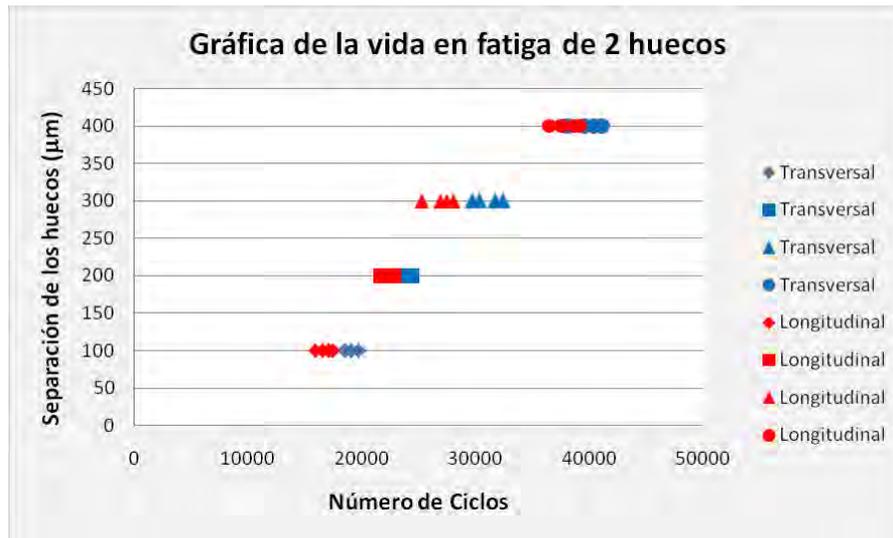
---

También se obtuvieron resultados para los casos de 2 pittings cercanos con diferentes distancias de separación, diferentes diámetros y diferentes posiciones (transversal, longitudinal), tal y como se muestran en la tabla 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 Parámetros experimentales y resultados para 2 pittings cercanos mismos diámetros (1000 $\mu$ m).

Ensayos	Distancias de Separación ( $\mu$ m)	Posición de los Huecos	Frecuencia (Hz)	Carga Aplicada (N)	— (%)	Número de Ciclos
1	100	longitudinal	50	39	76	13550
2	100	longitudinal	50	39	76	12880
3	100	longitudinal	50	39	76	12570
4	100	longitudinal	50	39	76	13700
5	100	transversal	50	39	92	19100
6	100	transversal	50	39	92	19750
7	100	transversal	50	39	92	17150
8	100	transversal	50	39	92	18550
9	200	longitudinal	50	39	80	18100
10	200	longitudinal	50	39	80	19750
11	200	longitudinal	50	39	80	18330
12	200	longitudinal	50	39	80	17900
13	200	transversal	50	39	86	23100
14	200	transversal	50	39	86	23400
15	200	transversal	50	39	86	24400
16	200	transversal	50	39	86	23800
17	300	longitudinal	50	39	80	24600
18	300	longitudinal	50	39	80	23400
19	300	longitudinal	50	39	80	22900
20	300	longitudinal	50	39	80	23900
21	300	transversal	50	39	92	32400
22	300	transversal	50	39	92	29750
23	300	transversal	50	39	92	30350
24	300	transversal	50	39	92	31725
25	400	longitudinal	50	39	78	30300
26	400	longitudinal	50	39	78	31250
27	400	longitudinal	50	39	78	29950
28	400	longitudinal	50	39	78	31850
29	400	transversal	50	39	89	41100
30	400	transversal	50	39	89	38000
31	400	transversal	50	39	89	39560
32	400	transversal	50	39	89	40350

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”



**Figura 4.2** Evolución de la vida en fatiga para 2 huecos con mismos diámetros (1000µm).

La Resistencia a la fatiga para probetas con 2 pittings cercanos, diámetros iguales (1000µm) y separados 100µm en dirección longitudinal y transversal está comprendida entre  $1.2 \times 10^4$  a  $1.4 \times 10^4$  ciclos y  $1.7 \times 10^4$  a  $2.0 \times 10^4$  respectivamente, para 200µm está comprendida entre  $1.7 \times 10^4$  a  $2.0 \times 10^4$  ciclos y  $2.3 \times 10^4$  a  $2.5 \times 10^4$ , para 300µm está comprendida entre  $2.2 \times 10^4$  a  $2.5 \times 10^4$  ciclos y  $2.9 \times 10^4$  a  $3.3 \times 10^4$ , para 400µm está comprendida entre  $2.9 \times 10^4$  a  $3.2 \times 10^4$  ciclos y  $3.8 \times 10^4$  a  $4.2 \times 10^4$ , tal y como se muestra en la Figura 4.2.

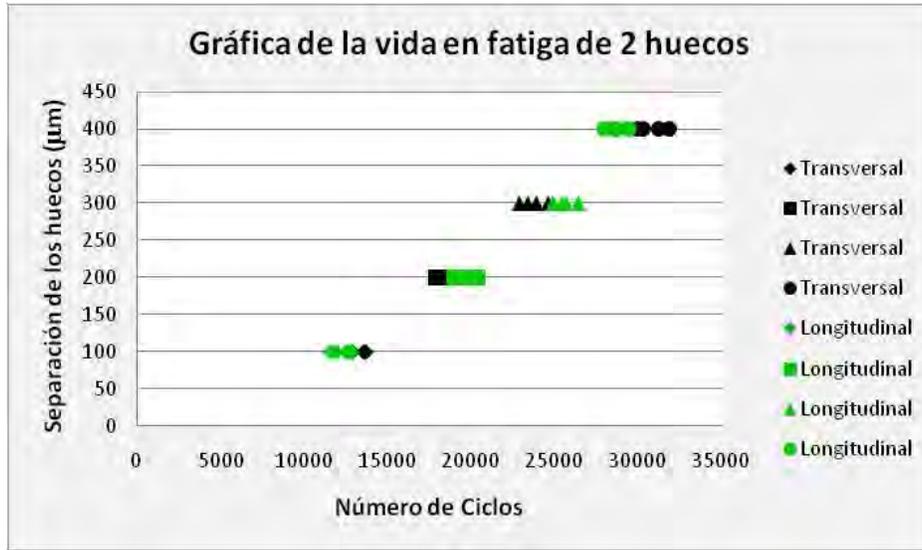
**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

Tabla 4.3 Parámetros experimentales y resultados para 2 pittings cercanos diferentes diámetros (1000 $\mu$ m-800 $\mu$ m).

Ensayos	Distancias de Separación ( $\mu$ m)	Posición de los Huecos	Frecuencia (Hz)	Carga Aplicada (N)	— (%)	Número de Ciclos
1	100	longitudinal	50	39	77	12600
2	100	longitudinal	50	39	77	11950
3	100	longitudinal	50	39	77	12880
4	100	longitudinal	50	39	77	11560
5	100	transversal	50	39	92	17100
6	100	transversal	50	39	92	15900
7	100	transversal	50	39	92	16550
8	100	transversal	50	39	92	17480
9	200	longitudinal	50	39	77	21700
10	200	longitudinal	50	39	77	22250
11	200	longitudinal	50	39	77	22850
12	200	longitudinal	50	39	77	22550
13	200	transversal	50	39	86	20400
14	200	transversal	50	39	86	19560
15	200	transversal	50	39	86	18990
16	200	transversal	50	39	86	19270
17	300	longitudinal	50	39	76	28000
18	300	longitudinal	50	39	76	25250
19	300	longitudinal	50	39	76	27440
20	300	longitudinal	50	39	76	26880
21	300	transversal	50	39	86	26450
22	300	transversal	50	39	86	25450
23	300	transversal	50	39	86	24880
24	300	transversal	50	39	86	25700
25	400	longitudinal	50	39	76	28750
26	400	longitudinal	50	39	76	27980
27	400	longitudinal	50	39	76	29430
28	400	longitudinal	50	39	76	28550
29	400	transversal	50	39	86	36500
30	400	transversal	50	39	86	39100
31	400	transversal	50	39	86	38700
32	400	transversal	50	39	86	37560

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”



**Figura 4.3** Evolución de la vida en fatiga para 2 huecos con diferentes diámetros (1000µm-800 µm).

La Resistencia a la fatiga para probetas con 2 pittings cercanos, diámetros diferentes (1000µm-800µm) y separados 100µm en dirección longitudinal y transversal está comprendida entre  $1.1 \times 10^4$  a  $1.3 \times 10^4$  ciclos y  $1.5 \times 10^4$  a  $1.8 \times 10^4$  respectivamente, para 200µm está comprendida entre  $2.1 \times 10^4$  a  $2.3 \times 10^4$  ciclos y  $1.8 \times 10^4$  a  $2.1 \times 10^4$ , para 300µm está comprendida entre  $2.5 \times 10^4$  a  $2.9 \times 10^4$  ciclos y  $2.4 \times 10^4$  a  $2.7 \times 10^4$ , para 400µm está comprendida entre  $2.7 \times 10^4$  a  $3.0 \times 10^4$  ciclos y  $3.6 \times 10^4$  a  $4.0 \times 10^4$ , tal y como se muestra en la Figura 4.3.

## 4.2 Análisis sobre las superficies de fractura

### 4.2.1 Probeta sin pitting

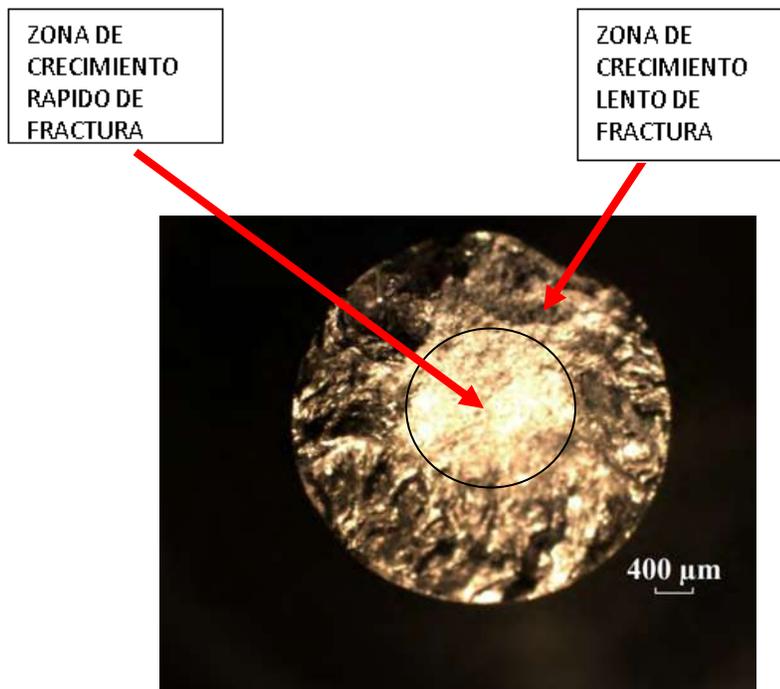


Figura 4.4 Imagen frontal de la superficie de fractura de la Probeta No. 2.

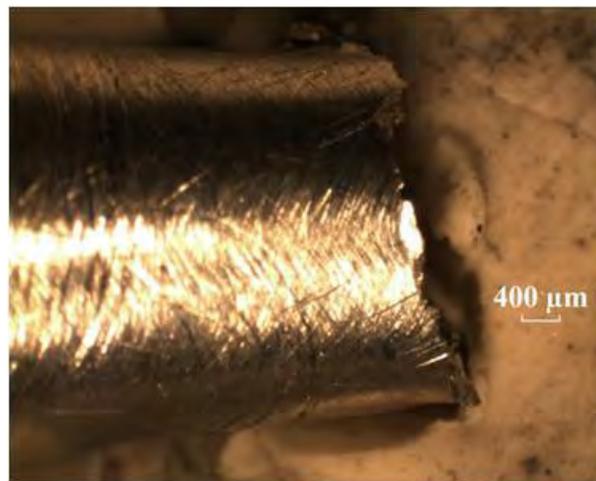


Figura 4.5 Imagen lateral de la superficie de fractura de la Probeta No. 2.

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran las superficies de fractura frontal y lateral respectivamente, en ellas se pueden observar claramente las denominadas zonas de crecimiento lento de fractura o zonas de máxima deformación plástica que son las zonas que mas se oponen a

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

que el material se fracture, después de esto podemos encontrar la zona de fractura rápida o también denominada zona granular que es la zona que menos se opone a la fractura del material.

#### 4.2.2 Probeta con 1 pitting

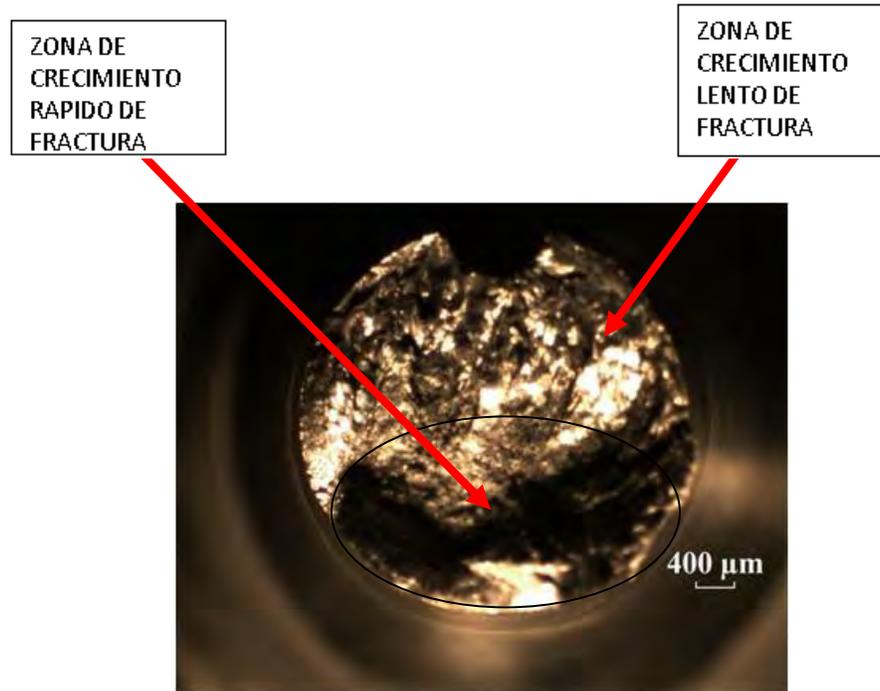


Figura 4.6 Imagen frontal de la superficie de fractura de la Probeta No. 16.

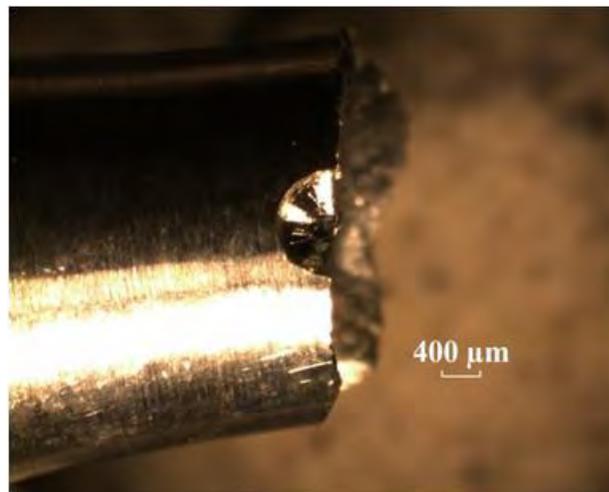


Figura 4.7 Imagen lateral de la superficie de fractura de la Probeta No. 16.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran las superficies de fractura frontal y lateral respectivamente, en ellas se pueden observar claramente las denominadas zonas de crecimiento lento de

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

fractura o zonas de máxima deformación plástica que son las zonas que mas se oponen a que el material se fracture, después de esto podemos encontrar la zona de fractura rápida o también denominada zona granular que es la zona que menos se opone a la fractura del material.

#### 4.2.3 Probeta con 2 pittings cercanos



Figura 4.8 Imagen frontal de la superficie de fractura de la Probeta No. 39.

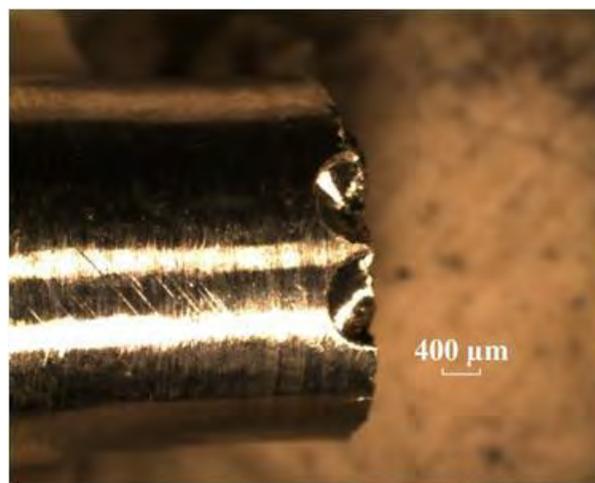


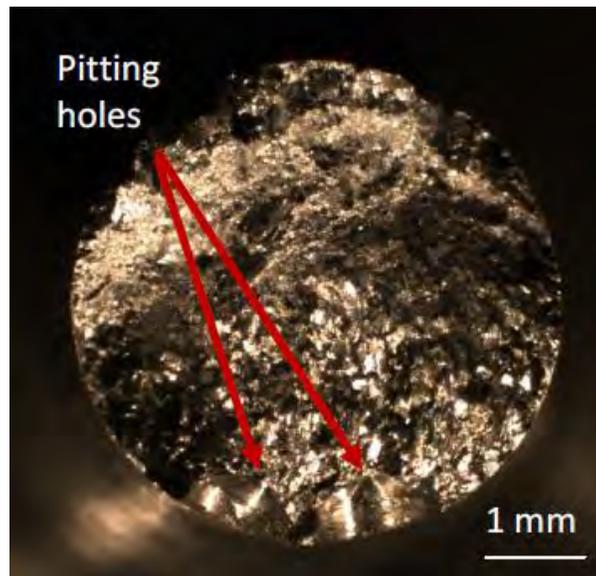
Figura 4.9 Imagen lateral de la superficie de fractura de la Probeta No. 39.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

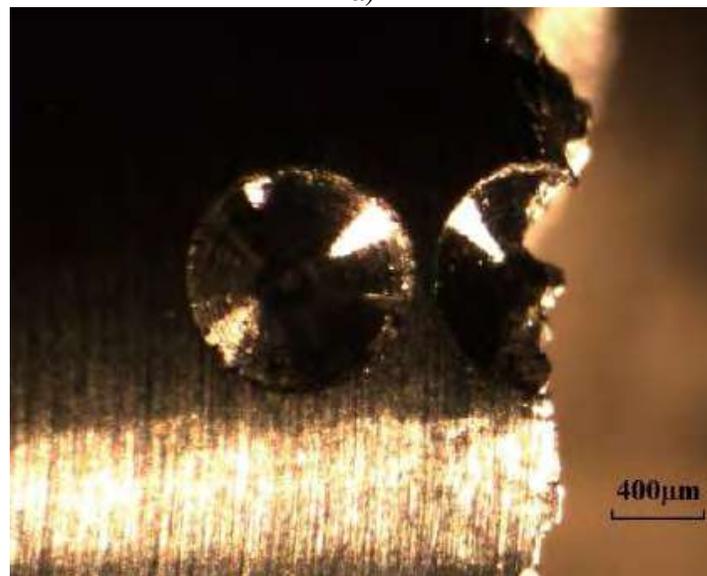
---

Las figuras 4.8 y 4.9 muestran las superficies de fractura frontal y lateral respectivamente, en ellas se pueden observar claramente las denominadas zonas de crecimiento lento de fractura o zonas de máxima deformación plástica que son las zonas que mas se oponen a que el material se fracture, después de esto podemos encontrar la zona de fractura rápida o también denominada zona granular que es la zona que menos se opone a la fractura del material.

**4.2.4 Probeta con 2 pittings cercanos mismos diámetros (1000 $\mu$ m)**



a)



b)

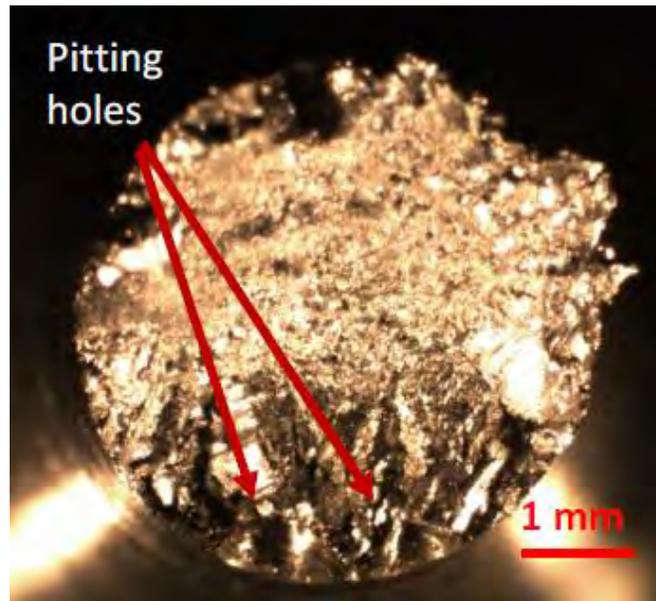
Figura 4.10 Superficies de fractura para 2 huecos iguales separados 100 $\mu$ m en dirección transversal a) y longitudinal b).

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

La figuras 4.10 a y b muestran las superficies de fractura frontal y lateral respectivamente de una probeta con diámetros iguales en dirección longitudinal, en ellas se pueden observar claramente donde están los pittings así como también donde se origino la fractura, que para diámetros iguales se observo que esta fue indistintamente en uno u otro hueco, esto se puede atribuir a que alguno de ellos presento una mayor cantidad de defectos microscópicos.

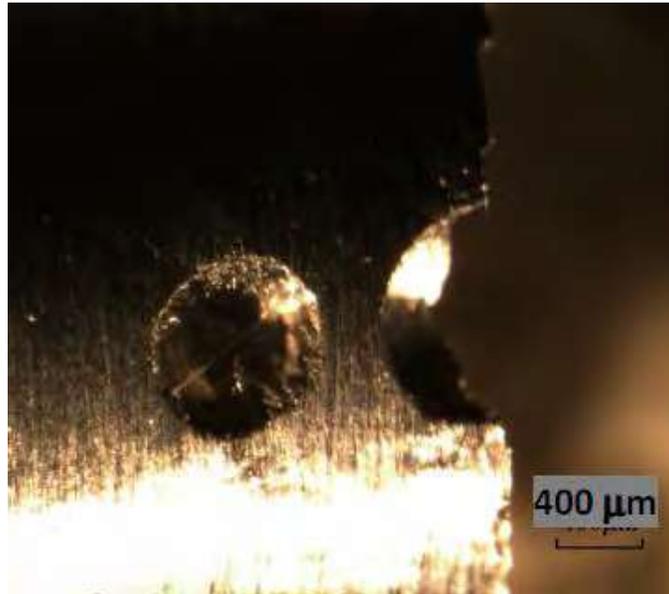
**4.2.5 Probeta con 2 pittings cercanos diferentes diámetros (1000 $\mu$ m-800 $\mu$ m)**



a)

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---



b)

Figura 4.11 Superficies de fractura para 2 huecos diferentes separados 100μm en dirección transversal a) y longitudinal b).

La figuras 4.11 a y b muestran las superficies de fractura frontal y lateral respectivamente de una probeta con huecos diferentes en dirección longitudinal, en ellas se pueden observar claramente donde están los pittings así como también donde se origino la fractura, que para diámetros diferentes se observo que esta fue siempre en el hueco de mayos diámetro.

## CONCLUSIONES

- 1) La resistencia a la fatiga en flexión rotativa en las aleaciones de aluminio 6061-T6, se reduce considerablemente con la presencia de un solo pitting y aun más dramático para dos pittings cercanos.
- 2) Para aplicaciones industriales de aleaciones metálicas que sufren de ataque corrosivo y fatiga, la probabilidad de generarse dos o más pittings cercanos es alta; luego entonces la denominada fatiga-corrosión puede generar una alta concentración de esfuerzos inducidos por dos o más pittings cercanos.
- 3) El concentrador de esfuerzos debido a la presencia de dos o más pittings cercanos se localiza en la pared donde estos fueron hechos.
- 4) También podemos concluir que el rango de frecuencia entre 25 y 100 Hz. no afecta la vida en fatiga de los tres tipos de ensayos que se realizaron.
- 5) La vida en fatiga disminuye ligeramente cuando los dos huecos se encuentran en dirección longitudinal a la probeta, comparado con la dirección transversal en mismas condiciones y mismos diámetros.
- 6) El máximo concentrador de esfuerzos debido a la presencia de dos huecos en dirección longitudinal se encuentra en una dirección diametral que es perpendicular al eje longitudinal de la probeta.
- 7) Es posible concluir también que el concentrador de esfuerzos presenta una evolución de tipo exponencial creciente en la medida que los 2 huecos se aproximan.
- 8) Este estudio permite concluir que materiales industriales sometidos a fatiga-corrosión pueden tener una vida en fatiga mucho más corta debido a la aparición de huecos de corrosión y a su proximidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G.M. Domínguez Almaraz, V.H. Mercado Lemus, J.J. Villalón López, “Rotating bending fatigue tests for aluminum alloy 6061-T6, close to elastic limit and with artificial pitting holes” *Procedia Engineering*, 2 (2010), 805-813.
- [2] C.R. Sohar, A. Betzwar-Kotas, C. Gierl, B. Weiss, H. Danninger, *Gigacycle fatigue behavior of a high chromium alloyed cold work tool steel*, *Int. J. Fatigue*, 30 (2008), p. 1137-1149.
- [3] Arnd Jung and Alexander Schnell, *Crack growth in a coated gas turbine superalloy under thermo-mechanical fatigue*, *Int. J. Fatigue*, 30-2 (2008), p. 286-291.
- [4] Gonzalo M. Dominguez Almaraz, *Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels, based on the inclusion geometrical properties*, *Mechanics of Materials*, 40 (2008), p. 636-640.
- [5] František Nový, Marián Činčala, Peter Kopas, Otakar Bokůvka, *Mechanisms of high strength structural materials fatigue failure in ultra-wide life region*, *Material Science. And Engineering*, A 462 (2007), p. 189–192.
- [6] I. Marines, G. Domínguez, G. Baudry, J-P. Vittory, J-P Doucet, and C. Bathias, *Ultrasonic Fatigue Test on Bearing Steel AISI-SAE 52100 at Frequency Of 20 kHz and 30 kHz*, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 1037-1046, 2003.
- [7] “Whöler’s Experiments on the Strength of Metals,” *Engineering*, August 23, 1967, p.160.
- [8] “Whöler’s Experiments on the Strength of Metals,” *Engineering*, August 23, 1967, p.160.
- [9] J. Bauschinger, “On the Change of the position of the Elastic Limit of Iron and Steel Under Cyclic Variations of Stress,” *Mitt. Mech-tech. Lab., Munich*, Vol. 13. No. 1 , 1986.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

- [10] J.A. Erwing and J.C. W. Humfrey, “The Fracture of Metals Under Repeated Alterations of Stress”, Phil Trans. Roy. Soc., London, Vol. CC, 1903, p241.
- [11] O.H. Basquin, “The Experimental Law of Endurance Test,” Proc. ASTM, Vol 10. Part II, 1910. p. 625.
- [12] H.J. Gough, The Fatigue Of Metals, Scott, Greenwood and Son, London, 1924.
- [13] H.F. Moore and J.B. Kommers, The Fatigue of Metals, McGraw-Hill Book Co., New York, 1927.
- [14] A.A. Griiffith “The Phenomena of Ruoture and Flow in solids”, Trans, Roy. Soc., London, Vol. A221, 1920, p. 163.
- [15] B.P. Haigh, “The Relative Safety of Mild and High-Tensile Alloy Steels Under Alternating and Pulssating Stresses,” Proc. Inst. Automob. Eng., Vol. 24, 1929/1930, pag. 30.
- [16] J.O Almen and P.H. Black, Residual Stresses and Fatigue in Metals, McGraw-Hill Book Co., New York, 1963.
- [17] O.J. Horger and T. L. Maulbetsch, “Increasing the Fatigue Strength of Press Fitted Axle Assemblies by Cold Rolling,” Trans. ASME, Vol. 58, 1936,p. A91.
- [18] H.Neuber, Kerbspannungsehre, Springer-Verlag, Berlin, 1937 (in German); also theory of Notches, J.W. Edwards, Ann Arbor, MI, 1946.
- [19] E.Gassner, “Festigkeitsversuche mit Wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau,” Deutsche Lufwacht, Ausg. Luftwissen, Vol. 6, 1939, p. 43 (in German).

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

- [20] M.A. Minner, “Cumulative Damage in Fatigue,” *Trans. ASME, J. Appl. Mech*, Vol. 67, 1945, p. 159.
- [21] A.Palmgren, “Die Lebensdauer von Kugellagern,” “*ZDVI*”, Vol. 68, No. 14, 1924, p. 320.
- [22] R.E. Peterson “Notch Sensivity,” *Metal Fatigue*, G. Sines and J.L. Waisman, eds., McGraw-Hill Book Co., New York, 1959, pag. 293.
- [23] R.E. Peterson, *Stress Concentration Design Factors*, John Wiley and Sons, New York, 1953.
- [24] R.E. Peterson, *Stress Concentration Factors*, John Wiley and Sons, New York, 1974.
- [25] G.R. Irwin, “analysis of Stresses and Strain Near the End of a Crack Traversing a plate,” *Trnas. ASME, J. Appl. Mech.* Vol. 24, 1957, p. 361.
- [26] W. Weibull, “A Statical Distribution Function of Wide Applicability,” *J. Appl. Mech.*, Sept. 1951, p. 293.
- [27] P.C. Paris, M.P. Gomez, and W.E. Anderson, “A Rational Analytical Theory Of Fatigue,” *Trend Eng.*, Vol. 13, No. 9, 1961. p. 9.
- [28] J. Schijve and D. Broek, “Crack Propagation Test Based on a Gust Spectrum with Variable Amplitude Loading.” *Aircraft Eng.*, Vol. 34, 1962. pag. 314.
- [29] J.A Bennett and H. Mindlin, “Metallurgical Aspects of the Failure of the Point Pleasant Bridge,” *J. Test. Eval.*, Vol I, No. 2, 1973, p. 152.
- [30] W. Elber, “Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension,” *Eng. Fracutre Mech.* Vol. 2, No. 5, 1970.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

- [31] P.C. Paris, “Testing for Very Slow Growth Of Fatigue Cracks”, Closed Loop, Vol.2, No.5, 1970.
- [32] R.A. Schmidt and P.C. Paris, “Threshold for Fatigue Crack Propagation and the Effects of Load Ratio and Frequency,” Prog. Flaw Growth Fract. Toughness Testing, ASTMSTP 536, ASTM, West Conshocken, PA, 1973. p. 79.
- [33] W. Schütz, “Standardized Stress-Time Histories- An Overview,” Development of Fatigue Loading Spectra, J.M. Potter and R.T. Watanabe, ed., ASTM STP 1006, ASTM, West Conshocken, PA, 1989. p. 3.
- [34] L.E. Tucker and S.L. Bussa, “The SAE Cumulative Fatigue Damage Test Program,” Fatigue Under Complex Loading, R.M. Wetzell, ed., SAE Warrendale, PA, 1977.p. 1.
- [35] M.V. Brown and K.J. Miller, “A Theory for Fatigue Failure Under Multiaxial Stress Strain Conditions,” Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 187, No. 65, 1973,p. 745.
- [36] R.P. Reed, J.H Smith and B.W Christ “The Economic Effects of Fracture in the United States,” U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Special Publication 647, march 1983.
- [37] L. Witek, “Failure analysis of turbine disc of an aero engine”, Engineering Failure Analysis, Volume 13, Issue 1, January 2006, pp. 9-17.
- [38] G. Dominguez Almaraz, J. Soriano Peña, and H. Gutierrez Sanchez, “Rotating bending fatigue simulation of hourglass shape specimen of AISI C1020 steel”, Proc. 9<sup>th</sup> International Fatigue Congress, Atlanta, Georgia, USA, May 2006.
- [39] Z. Mazur, R. Garcia-Illescas, J. Aguirre-Romano and N. Perez-Rodriguez, “Steam turbine blade failure analysis”, Engineering Failure Analysis, Volume 15, Issues 1-2, January-March 2008, pp. 129-141.

## ANEXO I

### Artículos en revistas indexadas, congresos nacionales e internacionales realizados durante el desarrollo de la tesis

#### 1) International Conference on Crack Paths.

September 23-25, 2009.

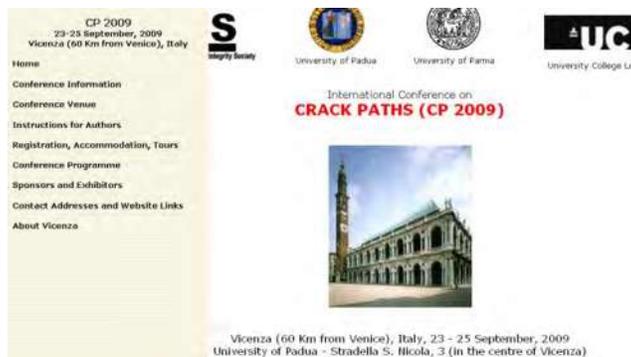
Vicenza, Italy.

“Crack Initiation and Propagation on AISI Stainless Steel 304 Under Rotating Bending Fatigue Tests and Close to Elastic Limit”.

G.M. Domínguez Almaraz<sup>1</sup>, V.H. Mercado Lemus<sup>1</sup>, M.L. Mondragón Sánchez<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica, Santiago Tapia No. 403, Col. Centro, 58000, Morelia Mich., dalmaraz@umich.mx.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Morelia, Postgrado en Metalurgia, Av. Tecnológico 1500, Colonia Lomas de Santiaguito, C.P. 58120, Morelia, Mich., México.



**ABSTRACT.** This work deals with crack initiation and propagation on AISI 304 stainless steel undergoing rotating bending fatigue tests and loading stresses close the elastic limit of material. Simulation results are obtained by Visual Nastran software in order to determine the numerical stresses and strains distributions inside the specimen; then, this information is used for the experimental set up. A general description concerning the experimental test machine and experimental conditions are developed in further sections. Later, experimental results are presented and discussed according the observed crack origin related to high stress zones. Finally, a simple model is proposed involving the plastic strain at fracture, the crack propagation and the total fatigue life for this steel loaded close to its elastic limit.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

## INTRODUCTION

Stainless steels have been manufactured and used from the beginning of last century; nevertheless, the improvements on physical and mechanical properties in last decades allow diversifying the industrial application of these alloys. Austenitic stainless steels present no magnetic properties and are commonly used in food, health, transport, energy production and heat exchange, chemical, electronic and nuclear industries. The nomination AISI 304 is known as the “all applications stainless steel” due to its wide range of industrial use. Recent work on fatigue endurance and crack initiation and propagation on stainless steels has been carried out coupling simulation results by Finite Element Method with a multiaxial fatigue criterion for the crack initiation and growth prediction, together with experimental results [1]. This approach applies for the prediction of fatigue behavior of notched members under constant-amplitude loading and step loading. Nevertheless, assuming that real material is a Continuous Medium and that stress and strain distributions obtained by numerical simulation represent real conditions may lead to miscalculations. Furthermore, fatigue failure on stainless steels is often related to stress concentration developed close to impurities and discontinuities inside the material [2], and these ones are not generally included in numerical simulations. Furthermore, the separation point between crack initiation and propagation is not still clear after a large number of studies in steels; recent works [3, 4] accord that most of fatigue life (above 90%) is consumed in crack initiation and that the corresponding physical mechanisms are developed at crystallographic scale [5]. A dual scale approach [6], has been developed in an attempt to understand the physical behavior of crack initiation and propagation at micro and macro material scale; however, few studies have been oriented to investigate the crack initiation and propagation on stainless steels under high cycling loading (high plastic deformation). A new high speed (150 Hz) rotating bending fatigue test machine [7] has been build up to perform the results herein presented.

### Testing Material

AISI 304 stainless steel is a well weldable and high temperature resistance material with low carbon content. Table 1 presents the corresponding chemical composition and Table 2 the mechanical properties.

**Table 1. Chemical composition (% weight)**

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
<b>0.08 max</b>	<b>18 - 20</b>	<b>8 - 11</b>	<b>2 max</b>	<b>1 max</b>	<b>0.04 max</b>	<b>0.03 max</b>

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

Table 2. Mechanical properties

Density (Kg/m <sup>3</sup> )	E (Gpa)	Yield stress (MPa)	Ultim. stress (MPa)	Hardness (HRB)
7900	193	760	1100	97

### Testing machine

Figure 1 shows the principal components of the high speed rotating bending machine: electrical motor 1 provides motion to rotating axis 2 which is connected to specimen 3. Electronic system (not shown) located close to back side of rotating axis is destined to count the number of cycles; it is composed by an electronic sensor, electronic card, personal computer and software. The applying load system 4 is simplified in Figure 1; it consists of a bearing at the free side of specimen allowing communicating the applied load P and a spring frame supporting the bearing. When the specimen is failing the distance between this one and the proximity sensor 5 increases, this leads to the automatic stop of electrical motor and test by electric relay 6.

### Specimen

Tests were carried out on hourglass shape specimens with the dimensions shown in Figure 2. No international standardization is available for the rotating bending fatigue 962 specimens; thus, narrow section diameter  $D_0$  was determined by numerical simulation varying the applied load P for the corresponding mechanical properties of this steel, in order to induce stresses in the narrow section close to elastic limit (75%), Figure 3. During the test, temperature at the specimen narrow section is controlled by a cooling system with pressurized cool air.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

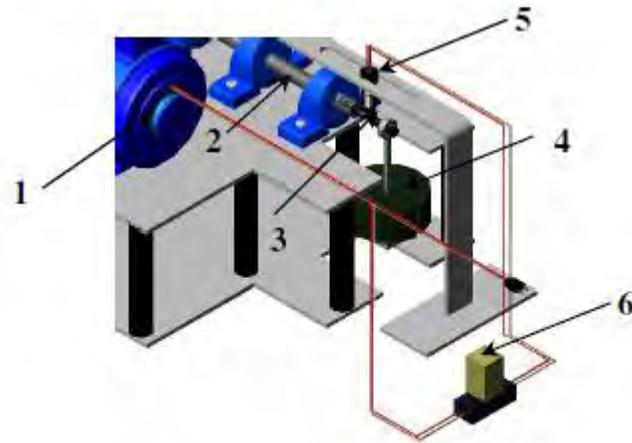


Figure 1. Principal components of high speed rotating bending machine.

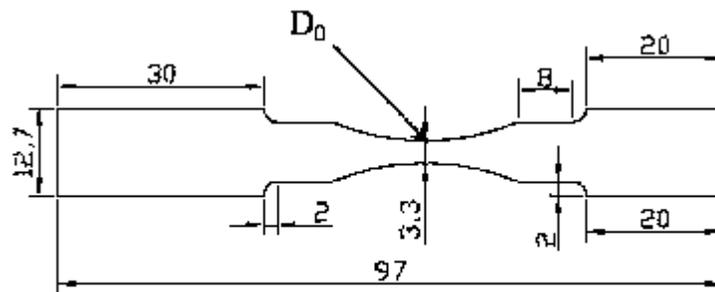


Figure 2. Dimensions (mm) of testing specimen.

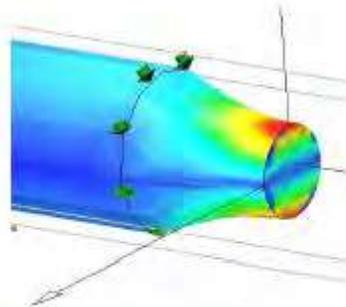


Figure 3. Numerical results for rotating bending fatigue specimen.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

**RESULTS**

Table 1 presents the tests parameters and fatigue endurance results on this stainless steel when the applying load P induces stresses close to 75% of the elastic limit of material.

Table 3. Testing parameters and fatigue endurance results on AISI 304 stainless steel.

Test No.	D <sub>0</sub> (mm)	P (N)	Number of Cycles	Temperature (°C)
1	3.3	40	22350	35
2	3.3	40	18800	32
3	3.3	40	15300	30
4	3.3	40	28875	34
5	3.3	40	17450	33
6	3.3	40	33550	32
7	3.3	40	36560	31
8	3.3	40	40250	35
9	3.3	40	40010	32
10	3.3	40	25600	30
11	3.3	40	32550	35
12	3.3	40	23450	33

Temperature was measured at fracture surface after specimen cracking, last column.

Figure 4 shows the fracture surface of specimen number 9 listed on Table 3. Fatigue crack initiation in metals generally presents a slowly grow on a perpendicular plane with regard to applied load; this plane direction is modified with crack grow until an angle of 45° is reached. The final rotation angle on crack propagation occurs at the transition point where the onset of fast crack propagation takes place [8]. In Figure 4 are shown different crack initiation points around the perimeter of fracture surface, where highest stress zones are located under rotating bending fatigue.

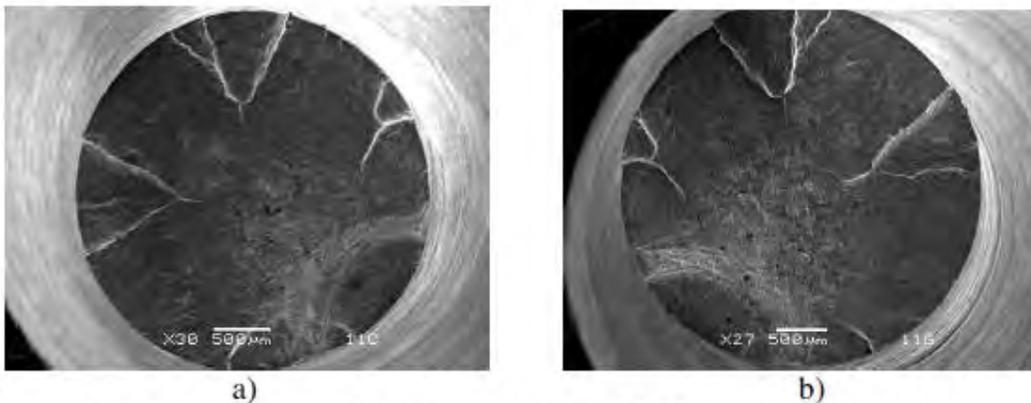


Figure 4. Fracture surfaces: a) right and b) left on specimen No.9

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

Three transition points are clearly observed in Figure 4; the origins are located at the specimen surface (perimeter on fracture surface) and present a convergence triangular tendency towards the center of fracture surface. The triangle vertices close to fracture surface center are the transition points.

## DISCUSSION

Fatigue endurance in ductile materials is related to plastic deformation inside the material: partial mechanical energy from applied load is transformed to plastic deformation energy [9]. In this process the mechanical properties decrease gradually with the increase of plasticity; particularly, the remaining ductility and the elastic stiffness. Recent works [10, 11], have postulated the “Damage rule” to approach a realistic evolution law and the consequences of damage to material strength: ductility damage is defined as the relative reduction of deformability to quantify damage. The power law damage evolution is:

$$dD = m \left[ \frac{\epsilon_p}{\epsilon_f} \right]^{m-1} \frac{d\epsilon_p}{\epsilon_f} \quad (1)$$

Where:  $dD$  is the differential variation on ductility damage,  $m$  is the damage exponent for the evolution law,  $\epsilon_p$  is the current plastic strain and  $\epsilon_f$  is the strain in the fracture envelope located at the “Cylindrical decomposition of damage” [11]. Integration on  $dD$  yields:

$$D = \int_0^{\epsilon_c} dD = 1 \quad (2)$$

In last expression,  $\epsilon_c$  is the plastic strain at fracture on the given loading history and  $\epsilon_c = \epsilon_f$  for a single value of  $m$  and  $\epsilon_f = \text{constant}$ . The strain  $\epsilon_f$  is expressed by:

$$\epsilon_f = \epsilon_{f0} \mu_p(p) \mu_x(\chi) \quad (3)$$

Here,  $\epsilon_{f0}$  is a reference fracture strain indicated by zero mean stress tension and the functions  $\mu_p(p)$  and  $\mu_x(X)$  represent the pressure and Lode angle dependence, respectively. Plastic strain  $\epsilon_p$  is generally no constant along the deformation path; then, this variable strain should be associated with each step of loading by the equation:

$$\epsilon_p = c \frac{\epsilon_{f0}}{N^k} \quad (4)$$

Representing the current plastic strain at each loading step  $N$ , with:  $k \neq m$  and  $c = \text{constant}$ . The value of  $\epsilon_p$  is higher in the first steps and decreases to zero at fracture (at total number of cycles  $N_f$ ). Integrating and solving last equation gives:

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

$$\epsilon_c = \int_1^{N_f} \epsilon_p = c \epsilon_{f0} \int_1^{N_f} \frac{1}{N^k} dN = \frac{c \epsilon_{f0}}{-k+1} N^{-k+1} \Big|_1^{N_f} \quad (5)$$

The plastic strain at fracture  $\epsilon_c$  is a function of the material isotropic property  $\epsilon_{f0}$ , the constant  $k$  which is related to ductility, the constant  $c$  which is a function of hardness and loading conditions and the total fatigue cycles  $N_f$  to fracture. If  $k$  and  $c$  increase (ductile material and high loading regime),  $d\epsilon_p/dN$  is higher in the first  $N$  fatigue steps; furthermore,  $\epsilon_c$  increases even if  $N_f$  decreases because the high loading regime. Figure 5 presents the graph  $\epsilon_p - N$ ; the total area below the curve is  $\epsilon_c$  and the tangent at each point is  $d\epsilon_p/dN$ .

Taking the specimen No. 9 in Table 3, the values are:  $N_f = 40,000$  cycles,  $k = 0.5$  ( $0 < k < 1$ ),  $\epsilon_{f0} = 0.8$  and  $c = 4 \times 10^{-3}$ , that yields:  $\epsilon_c = 1.27$  (curve in red).

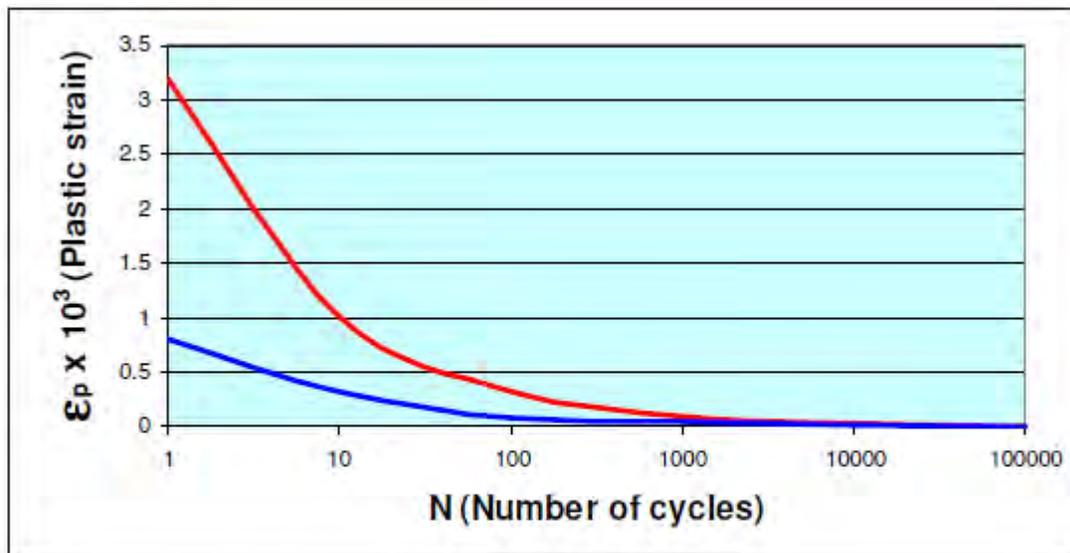


Figure 5. Evolution of  $\epsilon_p$  with the number of cycles for two materials.

The curve in blue has been estimated for a different material:  $c = 0.001$ ,  $k = 0.4$ ,  $N_f = 70000$  cycles and the same loading regime (75% of elastic limit). Increase in hardness lead to decrease  $c$  and  $k$ ; then, plastic strain at fracture in this case is lower than the previous one:  $\epsilon_c = 1.07$  (curve in blue) as it is shown in Figure 5 by the areas below the corresponding curves, even if  $N_f$  increases for the blue line.

## CONCLUSION

Fatigue loading on metallic alloys systematically leads to plastic strain at micro or micro-macro scales [12, 13, 14]. Furthermore, crack initiation and propagations is closely related to plasticity development on one site (or different sites) inside the material; then, the plasticity initiation and propagation should be coupled to crack initiation and propagation [15, 16, 17]. In this work is presented a simple model

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

associating the plastic strain at fracture with: the number of cycles of fatigue life, the isotropic properties of material and two constant related to hardness and loading regime. Current plastic strain is higher in the first fatigue steps and decreases with the number of cycles until fracture. Plastic strain at fracture is higher for ductile alloys undergoing high loading, even if fatigue life decreases. No intermediate effects such as hardening rule (change in yield condition with the progression of plastic deformation) were taken into account in this model.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We want to express our gratitude to the University of Michoacán (UMSNH) and the Technologic Institute of Morelia (ITM) in Mexico for the facilities received to carry out this work; a special mention of gratitude to CONACYT (The National Counsel for Science and Technology in Mexico) for the financial support destined to this project.

## REFERENCES

1. Feifei F., Kalnaus S., Yanyao J. (2008) *J. Mech. Of Mate.*, **40**, 961-973.
2. Masaki K., Ochi Y., Matsumura T., (2006) *Int. Jour. Fatig.*, **28**, 1603-1610.
3. Bathias C., Paris P.C. (2005) *Gigacycle fatigue in mechanical practice*, Marcel Dekker (Ed.) New York.
4. Ravichandran K.S., Ritchie R.O., Murakami Y., (1999) *Small fatigue cracks: mechanics, mechanisms and applications*, Elsevier, New York.
5. Paris P.C., Lados D., Tada H., (2008), *Eng. Fract. Mecha.*, **75**, 299-305.
6. Sih G.C. (2008) *Theoret. and Appl. Fract. Mech.*, **50**, 142-156.
7. Dominguez almaraz G., Guzmán Tapia M., (2007) *Fourth International Conference on Very High Cycle Fatigue (VHCF-4)*, Ann Arbor, University of Michigan, August 19-22, 153-160.
8. Sih G.C. (1988) *Theoret. and Appl. Fract. Mech.*, **9**, 175-198.
9. Lemaître J. A. (1985) *J. Engng. Mater. Technol.* – Trans ASME, **107**, 83–90.
10. Xue L. (2007) *Int. J. Solids Struct.* **44**, 5163–81.
11. Xue L., Wierzbicki T. (2008) *J. Engng Fract. Mech.*, **75**, 3276-93.
12. Ladani L., Dasgupta A. (2008) *Int. Jour. Fatig.*, article in press.
13. Stouffer CD, Dame LT.(1996) *Inelastic deformation of metals: models, mechanical properties, and metallurgy*. New York, US: John Wiley & Sons Inc.
14. Lämmer H, Tsakmakis CH. (2000) *Int. J. Plasticity*, **16**(5), 495–523.
15. Sackett E.E, Germain L., Bache M.R. (2007) *Int. Jour. Fatig.*, **29**(9-11), 2015-2021.
16. Hirakata H., Takahashi Y., Truong D.V., Kitamura T. (2007) *Int. Jour. Fract.*, **145** (4), 261-271.
17. Lukas P., Kunz L. (2002) *Mat. Scie., and Engin. A*, **322**(1), 217-227.

# “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

## 2) X International fatigue Congress Prague, Czech Republic.

### “Rotating bending fatigue tests for aluminum alloy 6061-T6, close to elastic limit and with artificial pitting holes”.

G. M. Domínguez Almaraz<sup>1</sup>, V. H. Mercado Lemus<sup>1</sup>, J. J. Villalón Lopez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Michoacana (UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Morelia Michoacán, 58000, México.



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

ScienceDirect

Procedia Engineering 2 (2010) 805–813

Procedia  
Engineering

[www.elsevier.com/locate/procedia](http://www.elsevier.com/locate/procedia)

Fatigue 2010

Rotating bending fatigue tests for aluminum alloy 6061-T6, close to elastic limit and with artificial pitting holes

Gonzalo M. DOMINGUEZ ALMARAZ<sup>1\*</sup>, Victor H. MERCADO LEMUS<sup>1</sup>, J. Jesús VILLALON LOPEZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Michoacana (UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Morelia Michoacan, 58000, Mexico

Received 28 February 2010, revised 10 March 2010, accepted 15 March 2010

**Abstract:** This work deals with rotating bending fatigue tests on aluminum alloy 6061-T6, under loading condition close to elastic limit of material. Results have been obtained for three types of specimens: without artificial pitting, specimens with one artificial pitting hole and specimens with two close artificial pitting holes. Results show that fatigue endurance is reduced in the case of one pitting hole and considerably for two close pitting holes. In order to explain this behavior, numerical analysis by FE were carried out to determine the stress concentrations for the three types of specimens. It is found that the stress concentration for two close pitting holes is an exponential function of the separation between the two holes, under uniaxial loading. The probability to find two or more close pitting holes in real industrial materials, such as cast iron, corroded or pitting metallic alloys is high; then, the stress concentration for two or more close pitting holes should be considered for the fatigue prediction life under fatigue loading and corrosion attack applications.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

### Introduction

The aluminium alloy 6061-T6 is a precipitation hardening alloy with high content of magnesium and silicon, presenting good mechanical properties and weldability and one of the most common aluminium alloys for general purpose use: aircraft fittings, brake pistons, hydraulic pistons, appliance fittings, valves and valve parts, bike frames, camera lens mounts, couplings, marines fittings and hardware, electrical fittings and connectors, decorative or misc. hardware, hinge pins, magneto parts and others.

Modern industrial applications of aluminum alloys imply frequently environmental corrosion attack; this is the reason of some recent works dealing with the problem: development of the “Corrosion Pit Growth Law” and corrosion fatigue lives [1], surface corrosion protection of aluminium structures on marine environments [2], non destructive quantification of pittings [3], pitting corrosion behavior of aluminum alloy on welded joint [4], the effect of temper conditions and corrosion on the fatigue endurance of an aluminium alloy [5], improving pitting corrosion resistance of aluminium alloy by laser surface melting [6], or proposing a model of probability for the growth of corrosion pits in aluminium alloys [7].

This work is devoted to the study of fatigue endurance of aluminium alloy 6061-T6 under rotating bending fatigue tests, when one or two artificial pitting holes are machined at the narrow section of the hourglass shape specimen. Special attention was focused on the stress concentration factors caused by the artificial pitting holes and the relationship to experimental fatigue endurance.

### Nomenclature

$D_0$	Narrow section diameter of specimen
SRz	Maximum height roughness
$D_p$	Diameter of artificial pitting hole
$\sigma_n$	Nominal stress
P	Applying load
Kt	Stress concentration factor
$\nu$	Poisson coefficient
$\sigma_y$	Elastic limit
f	Test frequency

### Material

In Table 1 and Table 2 are shown the chemical composition and mechanical properties respectively, for the tested material:

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

Table 1. Chemical composition for aluminum alloy AISI-SAE 6061-T6

Chemical composition [Wt. %]	
Al	95.8 - 98.6
Cr	0.04 - 0.35
Cu	0.15 - 0.4
Fe	Max. 0.7
Mg	0.8 - 1.2
Mn	Max. 0.15
Si	0.4 - 0.8
Ti	Max. 0.15
Zn	Max. 0.25
Other,	each Max. 0.05
Other,	total Max. 0.15

Table 2. Mechanical properties for aluminum alloy AISI-SAE 6061-T6.

Mechanical properties	
Density [Kg/m <sup>3</sup> ]	2700
Hardness, Brinell	95
$\sigma_y$ [MPa]	270
$\sigma_u$ [MPa]	310
E [GPa]	68.9
Poisson ratio	0.33
Elonga. at Break [%]	17

***Specimen***

Figure 1 presents the image, shape and dimensions of hourglass shape testing specimen. An important parameter is the narrow section diameter  $D_0$ , where the stress concentration is located under rotating bending fatigue. No international standardization is available for the rotating bending fatigue test specimen; then, the specimen dimensions were fixed from machining and numerical simulation criteria and references [8,9].

***Testing conditions***

Tests were carried out at room temperature; a cooling system with cooling air was implemented in order to keep the testing temperature below 60° C at the critical specimen narrow section. Under this condition, no modification in the crystallographic structure of testing material was expected. Machining process for all specimens was as homogeneous as possible in order to avoid important variation on the surface roughness; the average value for SRz, the “maximum height roughness” was 14  $\mu$ m. In Figure 2 are shown the artificial pitting holes machined on the narrow section of specimens: Figure 2a for one single artificial pitting hole and Figure 2b for two close artificial pitting holes.

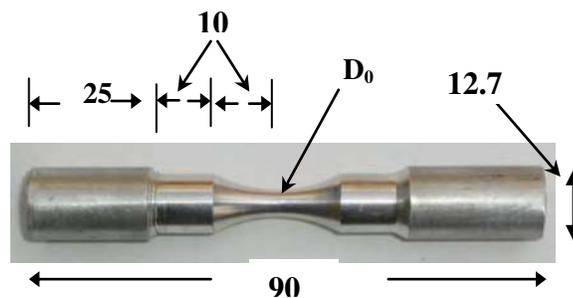


Figure 1. Specimen picture and dimensions (mm).

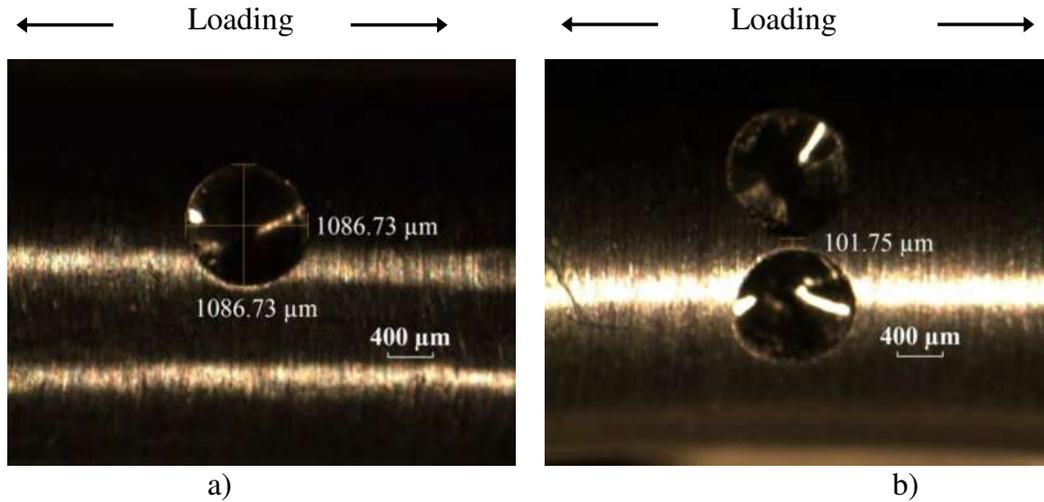


Figure 2. Artificial pitting holes: a) single pitting hole, b) Two close pitting holes.

Diameter of artificial pitting holes  $D_p$  was comprised between 1060 and 1140  $\mu\text{m}$ . The separation of the two pitting holes was about 100  $\mu\text{m}$ ; this last parameter was controlled by automatic machining. Uniaxial fatigue loading was achieved for the three types of testing specimens; the stress concentration factor for the single pitting hole (hemispherical surface cavity), is evaluated according the expression [10,11]:

$$K_t = 1.522 \left( 1 + \frac{2}{7 - 5\nu} \right) \quad (1)$$

Here  $\nu$  is the Poisson coefficient. For an aluminium alloy with  $\nu = 0.33$ , the stress intensity factor  $K_t = 2.09$ ; important increase on stress is developed at the bottom of hemispherical cavity for one artificial pitting hole [12]; the stress is higher for the same applied load  $P$  in the case of two close pitting holes located at the narrow section of specimen. The stress concentration factor and fatigue endurance relationship for tested specimens is analysed in further sections of this work.

### Numerical simulation

In order to determine the loading condition and the stress distribution inside the specimen, numerical simulation by software Visual Nastran (specimens without pitting) and Ansys were carried out, Figure 3. It was found that with a bending load of  $P = 39 \text{ N}$ , the induced Von Mises stress at the narrow section of the specimens without pitting was close to  $\sigma_n = 105 \text{ MPa}$ , the 39 % of elastic limit of this material: 270 MPa,

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

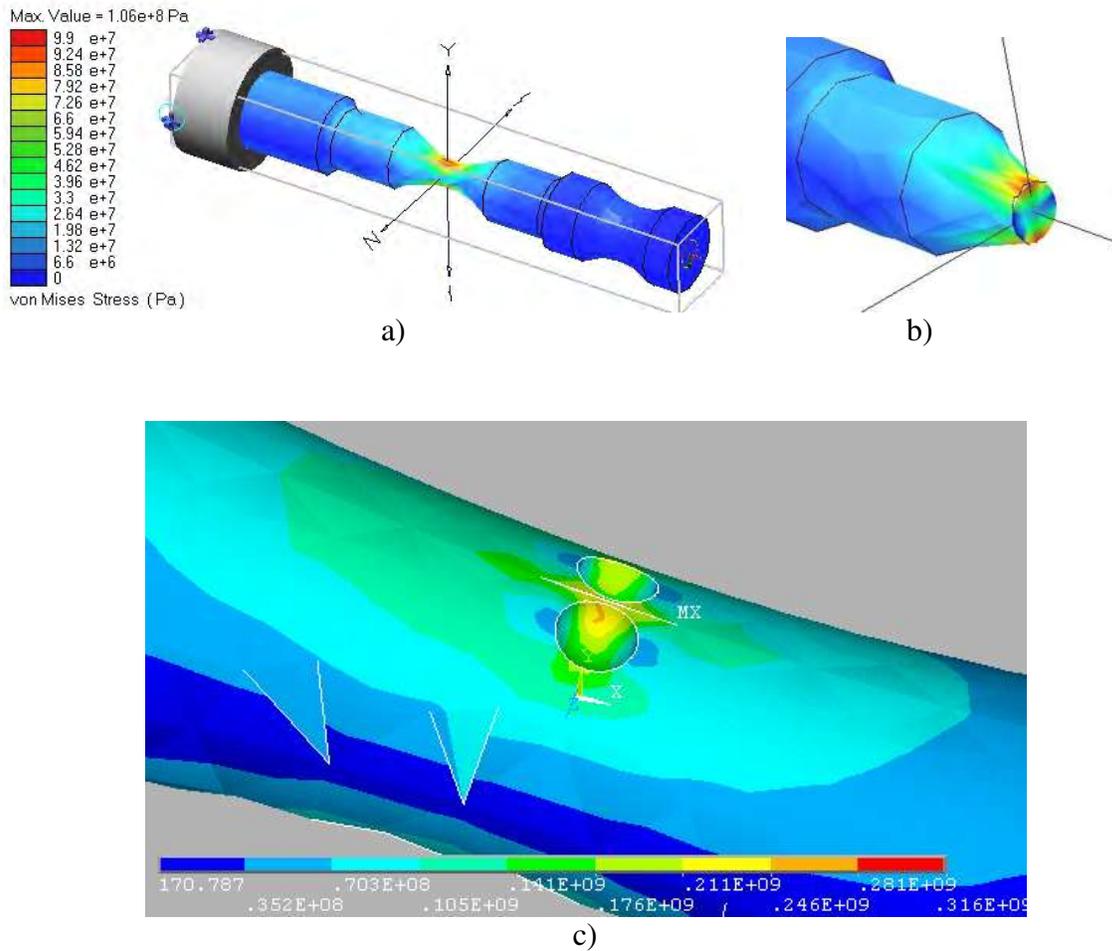


Figure 3. Numerical simulation: a) for a specimen without pitting hole, b) clipping at the narrow section, and c) stress distribution for specimen with two close artificial pitting holes.

According to recent work [12], oriented to numerical simulation for stress concentration factors on semi-elliptical corrosion pits, the pit aspect ratio:  $a/2c$  (the depth of pit “a” and the diameter “2c”), is a main parameter for the stress concentration. These results seem agree with analytical results presented in the middle of last century [13]; nevertheless, two close pitting holes under uniaxial loading may induce stress concentration in function of its proximity when the geometrical dimensions of pitting holes remain constant. In this work is presented an exponential function for the relationship between the stress concentration factor  $K_t$  and the proximity of two pitting holes under uniaxial loading.

#### Results

In Table 3 are shown the experimental parameters and results. The number of testing specimens was 28; the test frequency was comprised between 25 to 100 Hz, 39 Newtons were used in all tests for applying load and the rate (%) between the stress concentration

**“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”**

---

factor  $K_t$  at the narrow section multiplied by nominal stress  $\sigma_n$  and the elastic limit of material  $\sigma_y$ , is presented. In the last column are listed the fatigue life for each specimen.

Table 3. Experimental parameters and results.

Test No.	Without Pitting	One Pitting	Two Close Pitting	Test Frequency f (Hz)	Apply Load (N)	$K_t\text{-}\sigma_n/\sigma_y$ (%)	No. of Cycles (Fatigue life)
1				50	39	39	291000
2				50	39	39	240500
3				50	39	39	210000
4				50	39	39	299500
5				75	39	39	231600
6				50	39	39	355500
7				50	39	39	228000
8				25	39	39	204500
9				50	39	80	89450
10				50	39	80	89550
11				50	39	80	62000
12				50	39	80	96000
13				50	39	80	57000
14				50	39	80	53700
15				50	39	80	124750
16				100	39	80	119400
17				100	39	80	109000
18				100	39	80	71500
19				50	39	80	93250
20				25	39	80	102000
21				25	39	113	35475
22				25	39	113	25750
23				50	39	113	32400
24				50	39	113	26300
25				50	39	113	30650
26				25	39	113	26850
27				25	39	113	25375
28				25	39	113	31520

Fatigue life for specimens without pitting was comprised between  $2 \times 10^5$  and  $3.6 \times 10^5$  cycles, whereas for the one artificial pitting hole specimens these values were  $5.4 \times 10^4$  and  $1.25 \times 10^5$  cycles. Fatigue endurance for the two close pitting holes specimens decreases dramatically to  $2.5 \times 10^4$  and  $3.5 \times 10^4$  cycles. It is observed a factor close to 10 from these results comparing the fatigue life of first and last specimens. In Figure 4 are plotted these results in the  $K_t\text{-}\sigma_n/\sigma_y - N$  graph.

### Fracture surface analysis

Fracture surfaces pictures were taken in order to analyze the trend of stress concentration and fatigue life of some tested specimens, Figure 5.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

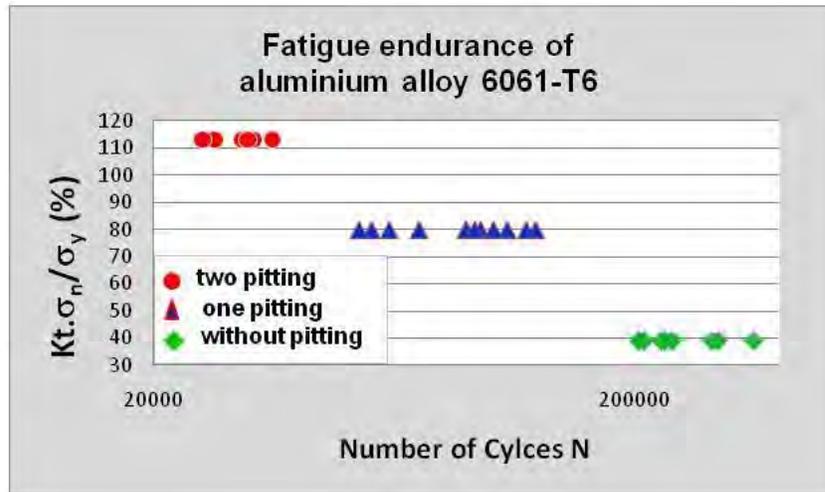


Figure 4. Fatigue endurance for the three types of specimens

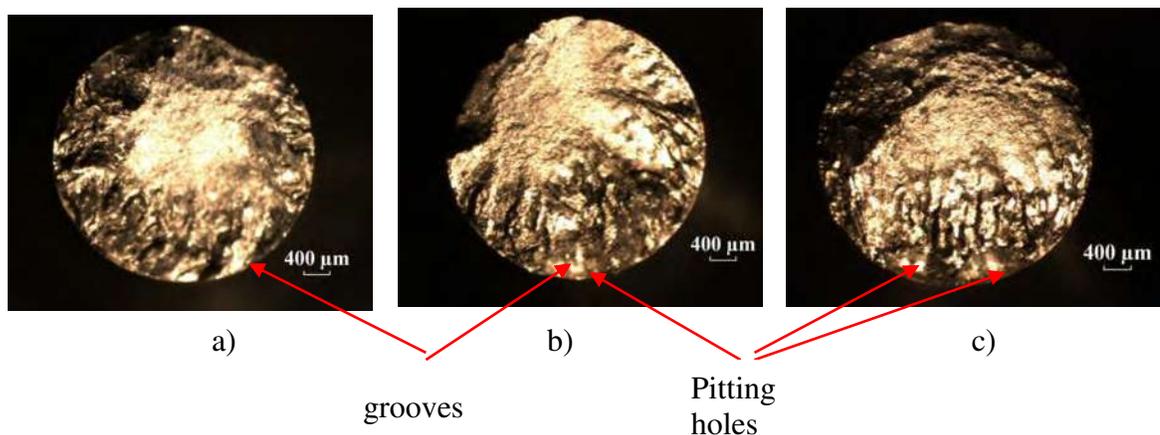


Figure 5. Fracture surfaces for the three types of specimens on Table 3: a) without pitting, specimen No. 2; b) one pitting, specimen No. 17; c) two pitting, specimen No. 25.

Figure 5a presents the fracture surface for one specimen without pitting. Under rotating bending fatigue tests the high stress zones are located at the fracture surface perimeter and decrease to the fracture surface center: the size of grooves decreases from fracture surface perimeter to the center [14]. Furthermore, for this type of specimen the center of fracture surface is characterized by the “granular zone” or fast crack growth zone where the plastic deformation is small or zero. Concerning the one pitting hole fracture surface, Figure 5b, contouring grooves related to plastic deformation are observed around the pitting hole:  $K_t = 2.09$  and  $K_t \cdot \sigma_n = (2.09) (104 \text{ MPa}) \approx 217 \text{ MPa}$  close to 80% of the elastic limit of this material. The two pitting holes fracture surface, Figure 5c, present high concentrated plastic deformation observed by parallel grooves pointing to the two close pitting holes; in this case

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

$K_t \approx 3$ , then:  $K_t \cdot \sigma_n = (3) (104 \text{ MPa}) \approx 312 \text{ MPa}$ . For this last fracture surface, the applied load at the narrow section of specimen surpasses the elastic limit of material. We have carried out these last tests, even under this condition, in order to point out the effect of pitting holes and the proximity of two pitting holes on the stress concentration and the fatigue life of testing material.

**Discussion.**

In Figure 6 are shown the lateral fracture pictures for one and two artificial pitting holes specimens. In both cases the fracture follows the diameter direction perpendicular to applied load on the hemispherical pitting holes.

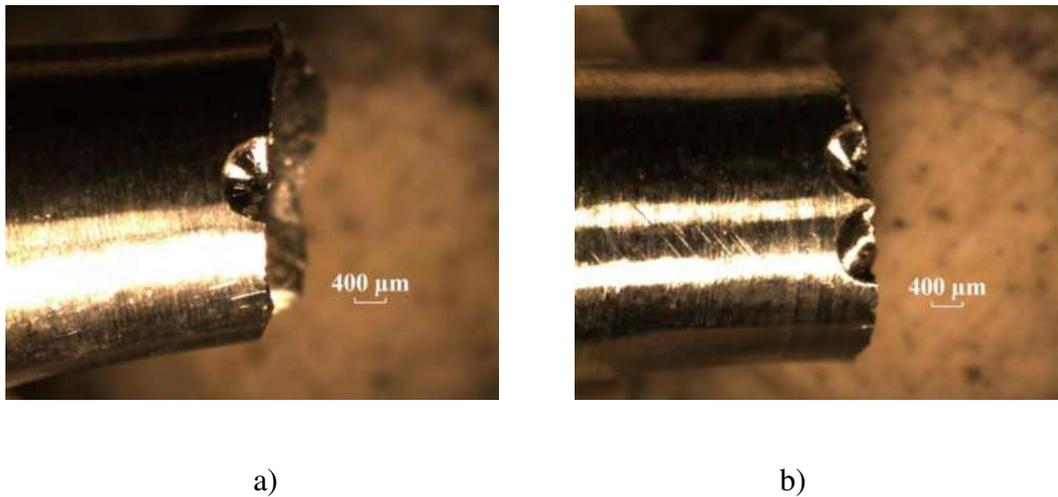


Figure 6. Lateral fracture pictures of specimen in Table 3: a) Specimen No. 9, b) Specimen No. 24.

Stress concentration on hemispherical voids under uniaxial load is located at the bottom of pitting hole [12]; from the numerical results developed in this work, the stress concentration in the case of two close pitting holes seems to be located at the comun separation wall, Figure 3c. In order to investigate the stress concentration factor  $K_t$  in function of the separation  $S$  between the centers of two close hemispherical pitting holes, Figure 7a, some numerical simulation were carried out, Figure 7b.

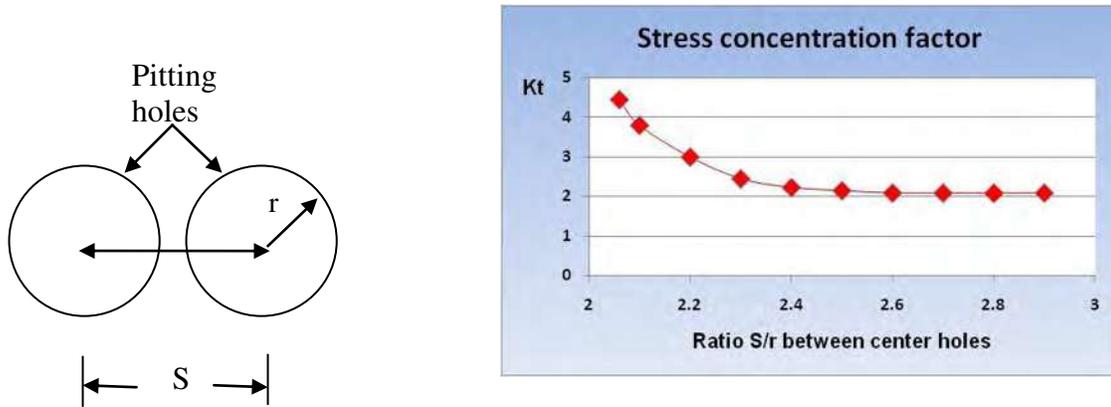


Figure 7. Stress concentration factor: a) geometrical parameters between two close pitting holes, b) evolution of stress concentration factor with the ratio  $S/r$  between center holes.

The numerical results show that for two hemispherical pitting holes with same diameter and separated by  $S/r = 2.2$ , the stress intensity factor is:  $K_t = 3$ . On the other hand, when the separation between the two hemispherical pitting holes is  $S/r = 2.6$ , the stress concentration factor is the corresponding for a single hemispherical pitting hole: no interaction is developed in this case. An empirical formulation for the stress concentration factor  $K_t$  in function of  $S/r$  is proposed for this aluminum alloy in the range  $2.05 < S/r < 2.6$ :

$$K_t = 1.76 (S/r - 2)^{-0.33} \quad (2)$$

The “Multiaxial fatigue limit criterion for defective materials” has been presented in recent works [15,16] relating fatigue endurance and stress distribution. It was corroborated that the gradient of the hydrostatic part of the stress distribution at the tip of the defect seems to be a good parameter to represent the defect influence on the fatigue resistance in the range of the fatigue limit under multiaxial loading. Nevertheless, the analytical development based on one single defect, which is a very hypothetical case in real material with surface defects (cast iron, corroded or pitting material ...), cannot represent the real hydrostatic stress gradient at the interacting zone of two close hemispherical holes. Further investigation should be necessary for the understanding of fatigue-corrosion phenomena; particularly, the interaction between fatigue crack growth and pitting growth [17,18]; pitting holes geometrical dimensions and proximity; grain boundaries, size, shape, and orientation versus fatigue-corrosion [19,20]; multiaxial loading and others factors.

## Conclusion

- 1) Fatigue endurance under rotating bending fatigue tests of aluminum alloy 6061-T6 decreases with the presence of one artificial pitting hole and dramatically with two close artificial pitting holes.
- 2) For industrial applications of metallic alloys enduring corrosion attack and fatigue, the probability to generate two or more close pitting holes is high; then, fatigue-corrosion design should consider the presence of high concentration stresses induced by two or more close pitting holes.
- 3) Stress concentration for two close pitting holes seems to be located at the common separation wall.
- 4) The range of test frequency: 25 to 100 Hz, does not affect fatigue life of three types specimens, as it is shown on Table.
- 5) Stress concentration factor increases exponentially with the proximity of two close pitting holes; an exponential expression is presented in this work for a range of proximity.
- 6) For real material with pitting holes (cast iron, corroded or pitting elements), the probability to find two or more closer pitting holes is high; then, stress gradients should be estimated under this condition, not for a single pitting hole.

## Acknowledgements

The authors acknowledge the University of Michoacan (UMSNH, Morelia, Mexico) for the facilities received in the development of this work. Special mention of gratitude to CONACYT (National Counsel for Science and Technology, Mexico City) for the financial support devoted to this study.

## References

- [1] Ishihara S, Saka S.S., Nan Z.Y., Goshima T. and Sunada S., Prediction of Corrosion Fatigue Lives of Aluminium Alloy on the Basis of Corrosion Pit Growth Law, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 2006; **29**: 472–480.
- [2] Allachi H., Chaouket F., Draoui K., Protection against corrosion in marine environments of AA6060 aluminium alloy by cerium chlorides, *Journal of Alloys and Compounds* 2010; **491**: 223–229.
- [3] Santanu De, Palit Sagar S., Dey S., Prakash A., Chattoraj I., Quantification of pitting in two tempers of 7075 aluminium alloy by non-destructive evaluation, *Corrosion Science* 2010, in press.
- [4] Kang J., Fu R., Luan G., Dong Ch., He M., In-situ investigation on the pitting corrosion behavior of friction stir welded joint of AA2024-T3 aluminium alloy, *Corrosion Science* 2010; **52**:620–626.
- [5] Kermanidis A.T., Zervaki A.D., Haidemenopoulos G.N., Pantelakis G., Effects of temper condition and corrosion on the fatigue performance of a laser-welded Al–Cu–Mg–Ag (2139) alloy, *Materials and Design* 2010; **31**:42–49.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

- [6] Xu W.L., Yue T.M., Man H.C., Chan C.P., Laser surface melting of aluminium alloy 6013 for improving pitting corrosion fatigue resistance, *Surface & Coatings Technology* 2006;**200**:5077–5086.
- [7] Rajasankar J., Nagesh R. I., A probability-based model for growth of corrosion pits in aluminum alloys, *Engineering Fracture Mechanics* 2006; **73**:553–570.
- [8] Oguma N., Harada H., Sakai T., Strength level dependence of long-life fatigue behavior for bearing steels in rotating bending, *Proc. 3<sup>rd</sup> VHCF Int. Conf. Eds. T. Sakai and Y. Ochi*, University of Electro-Communications pub. 2004, Kyoto, Japan: 617-624.
- [9] Sakai T., Murase T., Yoshiyama S., Tadahiko T., Takeda M., Rotating bending fatigue property of structural steels having different strength levels in gigacycle regime, *Proc. 3<sup>rd</sup> VHCF Int. Conf. Eds. T. Sakai and Y. Ochi*, University of Electro-Communications pub. 2004, Kyoto, Japan: 641-648.
- [10] Pilkey W.D., Pilkey D.F., *Peterson's Stress Concentrations Factors*, Third Edition, John Wiley & Sons (Edit.); 2007.
- [11] Paris P.C, Palin-Luc T., Tada H. and Santier N., Stresses and crack tip stress intensity factors around spherical and cylindrical voids and inclusions of differing elastic properties and with misfit sizes, *Crack Paths 2009*, September 23-25<sup>th</sup> 2009, Vicenza, Italy: 495-502.
- [12] Cerit M., Genel K., Eksi S., Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit, *Engineering Failure Analysis* 2009; **16**: 2467–2472.
- [13] Sadowsky M.A., Sternberg E., Stress concentration around an ellipsoidal cavity in a body under arbitrary plane stress perpendicular to the axis of revolution of cavity, *Journal of Applied Mechanics* 1947, A191-A201.
- [14] Domínguez Almaraz G.M., Mercado Lemus V.H., Mondragón Sánchez M.L., Crack Initiation and propagation on AISI-SAE stainless steel 304 under rotating bending fatigue tests and close to elastic limit, *Crack Paths 2009*, September 23-25<sup>th</sup> 2009, Vicenza, Italy: 961-968.
- [15] Billaudeau T., Nadot Y., Bezine G., Multiaxial Fatigue Limit for Defective Materials: Mechanisms and Experiments, *Acta Materialia* 2004;**52**:3911-3920.
- [16] Nadot Y., Billaudeau T., Multiaxial Fatigue Limit Criterion for Defective Materials, *Engineering Fracture Mechanics* 2006; **73**:112-133.
- [17] Van der Walde K., Hillberry B.M., Characterization of pitting damage and prediction of remaining fatigue life, *International Journal of Fatigue* 2008; **30**:106–118.
- [18] Burns J.T., Sangshik Kim S., Gangloff R.P., Effect of corrosion severity on fatigue evolution in Al–Zn–Mg–Cu, *Corrosion Science* 2010; **52**:498–508.
- [19] Van der Walde K., Hillberry B.M.,
- [20] Jones K., Hoepfner D.W., The interaction between pitting corrosion, grain boundaries, and constituent particles during corrosion fatigue of 7075-T6 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue* 2009; **31**: 686–692.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

**3) Revista Semestral de la Facultad de Ingeniería Mecánica UMSNH. CIENCIA, TECNOLOGÍA Y HUMANIDADES N°1, Enero 2010.**

**“Crack Initiation and Propagation on AISI-SAE Stainless Steel 304 Under Rotating Bending Fatigue Tests and Close to Elastic Limit”.**

V. H. Mercado Lemus<sup>1</sup>, G. M. Domínguez Almaraz<sup>1</sup>, Erasmo Cadenas Calderón<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Michoacana (UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Morelia Michoacán, 58000, México.

E-mail: vic\_210583@yahoo.com.mx, dalmaraz@umich.mx, ecadenas@umich.mx  
Morelia, Michoacán.

ISBN: 978-703-475-0



**Abstract:** This work deals with crack initiation and propagation on AISI 304 stainless steel undergoing rotating bending fatigue tests and loading stresses close to elastic limit of material. Simulation results are obtained by Visual Nastran software in order to determinate the numerical stresses and strains distributions inside the specimen; then, this information are used for the experimental set up. A general description concerning the experimental test machine and experimental conditions are developed in further sections. Later, experimental results are presented and discussed according the observed crack origin related to high stress zones. Finally, a simple model is proposed involving the plastic strain at fracture, the crack propagation and the total fatigue life for this steel loaded close to its elastic limit.

**4) XIX International Materials Research Congress. Cancún, Quintana Roo, México.**

**Agosto. 15-19, 2010.**

**“STRESS CONCENTRATION ON ARTIFICIAL PITTING HOLES AND FATIGUE LIFE FOR ALUMINUM ALLOY 6061-T6, UNDERGOING ROTATING BENDING FATIGUE TESTS”.**

V. H. Mercado Lemus<sup>1</sup>, G. M. Domínguez Almaraz<sup>1</sup>, J. J. Villalón Lopez<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Universidad Michoacana (UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Morelia Michoacán, 58000, México.

E-mail: vic\_210583@yahoo.com.mx

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

TO WHOM IT MAY CONCERN

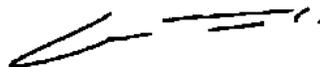
P r e s e n t

This is to certify that *Víctor Hugo Mercado Lemus, Gonzalo Mariano Domínguez Almaraz, Juan Jesus Villalón López* presented the contribution:

**STRESS CONCENTRATION ON ARTIFICIAL PITTING HOLES AND FATIGUE LIFE FOR ALUMINUM ALLOY 6061-T6, UNDERGOING ROTATING BENDING**

**FATIGUE TESTS**, in the Advanced Structural Materials Symposium at the XIX International Materials Research Congress held in Cancun, Mexico from August 15th to 19th, 2010.

Sincerely,



Luis Enrique Sansores Cuevas  
President

**Abstract:** This work deals with rotating bending fatigue tests on aluminum alloy 6061-T6, under loading condition close to elastic limit of material. Results have been obtained for three types of specimens: without artificial pitting, specimens with one artificial pitting hole and specimens with two close artificial pitting holes. Results show that fatigue endurance is reduced in the case of one pitting hole and considerably for two close pitting holes. In order to explain this behavior, numerical analysis by FE were carried out to determine the stress concentrations for the three types of specimens. It is found that the stress concentration for two close pitting holes is an exponential function of the separation between the two holes, under uniaxial loading. The probability to find two or more close pitting holes in real industrial materials, such as cast iron, corroded or pitting metallic alloys is high; then, the stress concentration for two or more close pitting holes should be considered for the fatigue prediction life under fatigue loading and corrosion attack applications.

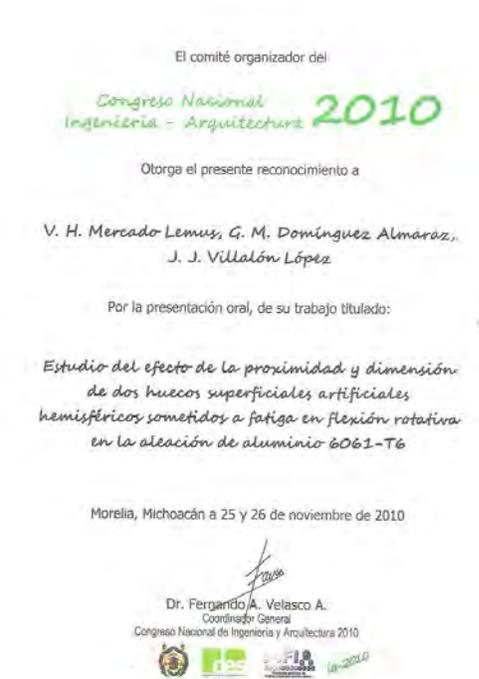
“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

**5) Congreso Nacional Ingeniería – Arquitectura 2010.**

**“Estudio del efecto de la proximidad y dimensión de dos huecos superficiales artificiales sometidos a fatiga en flexión rotativa en la aleación de aluminio 6061-T6”.**

V. H. Mercado Lemus, G. M. Domínguez Almaraz, J. J. Villalón López  
Facultad de Ingeniería Mecánica, UMSNH.



**Resumen:** Este trabajo está orientado al estudio del efecto de dos huecos superficiales artificiales, su proximidad y dimensiones, sometidos a ensayos de fatiga en flexión rotativa en la aleación de aluminio 6061-T6. El inducir huecos superficiales artificiales nos va a generar concentradores de esfuerzos los cuales están relacionados con la vida en fatiga del material. Se ha encontrado que el concentrador de esfuerzos se incrementa exponencialmente con la separación de los dos huecos, lo cuales generan una importante caída de la vida en fatiga. En lo concerniente a las dimensiones de los huecos no se encontró alguna influencia significativa relacionada con la vida en fatiga; esto implica que la separación entre los dos huecos superficiales artificiales es el principal parámetro de la caída en la vida en fatiga de este material bajo estas condiciones. Varios resultados son discutidos en este trabajo, relacionando las dimensiones y separaciones de los huecos, así como también las superficies de fractura del material.

6) TMS 2011 Annual Meeting & Exhibition, February 27 - March 3, 2011, San Diego Convention Center • San Diego, California.

“EFFECT OF PROXIMITY AND DIMENSION OF TWO ARTIFICIAL PITTING HOLES ON THE FATIGUE ENDURANCE OF ALUMINUM ALLOY 6061-T6 UNDER ROTATING BENDING FATIGUE TESTS”.

G. M. Domínguez Almaraz<sup>1</sup>, V. H. Mercado Lemus<sup>1</sup>, J. J. Villalón Lopez<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Universidad Michoacana (UMSNH), Santiago Tapia No. 403, Morelia Michoacán, 58000, México.

### **Abstract**

This work is oriented to study the effect of two artificial pitting holes, its dimensions and proximity, on the fatigue endurance of aluminum alloy 6061-T6 under rotating bending fatigue tests. Stresses concentration induced by artificial pitting holes is analyzed and correlated with the experimental fatigue life. It is found that the stresses concentration increases exponentially when the two pitting holes approach and this induces an important reduction on the fatigue life. Concerning the dimensions variation of one pitting in regard the second, no important influence was observed on fatigue life for a given separation between them; this implies that separation between the two artificial pitting holes and the associated stress concentration is the principal parameter on the fatigue life under these conditions. The results are discussed and conclusions are presented involving the fatigue life, proximity and dimension of pitting holes, stress concentration and the fracture surfaces related to failure origin.

### **Introduction**

ALUMINUM alloys are largely used in modern industries, such as: aeronautical, automotive, sport items, buildings construction, office and domestic furniture, marine vessels, electrical transmission, packaging, etc. Concerning the aluminum alloy AISI-SAE 6061-T6, it is known as the “aluminum alloy for general purpose use” because of a wide industrial uses: truck bodies and frames, screw machine parts, structural components, aircraft and aerospace components, rail coaches, ship building, helicopter rotor skins, camera lenses, electrical fittings and connectors, valves, driveshafts, brake components, couplings,...

Alloy 6061 has excellent corrosion resistance to atmospheric conditions and good corrosion resistance to sea water and other environments [1-5]. Nevertheless for some industrial applications, fracture on aluminum alloys is associated with corrosion pitting holes [6-9]. In order to study the fatigue behavior of this material under rotating bending fatigue tests and pitting holes, artificial pitting holes were machined on hourglass shape specimens [10].

### **Experimental details**

Table 1 presents the chemical composition of this alloy and in Table 2 are shown the corresponding mechanical properties. Figure 1 shows the testing specimen with dimensions in mm and in Figure 2 is presented the numerical simulation for two close pitting holes with diameter of 1 mm separated 100  $\mu\text{m}$  one from another and in transversal direction regarding the principal axis of specimen [11].

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

Table 1. Chemical composition for aluminum alloy AISI-SAE 6061-T6

Chemical composition [Wt. %]	
Al	95.8 - 98.6
Cr	0.04 - 0.35
Cu	0.15 - 0.4
Fe	Max. 0.7
Mg	0.8 - 1.2
Mn	Max. 0.15
Si	0.4 - 0.8
Ti	Max. 0.15
Zn	Max. 0.25
Other,	each Max. 0.05
Other,	total Max. 0.15

Table 2. Mechanical properties for aluminum alloy AISI-SAE 6061-T6

Mechanical properties	
Density [Kg/m <sup>3</sup> ]	2700
Hardness, Brinell	95
$\sigma_y$ [MPa]	270
$\sigma_u$ [MPa]	310
E [GPa]	68.9
Poisson ratio	0.33
Elonga. at Break [%]	17

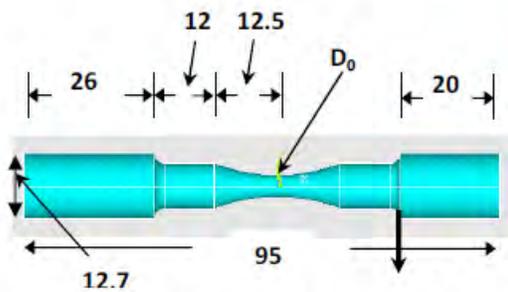


Figure 1. Specimen picture and dimensions (mm).

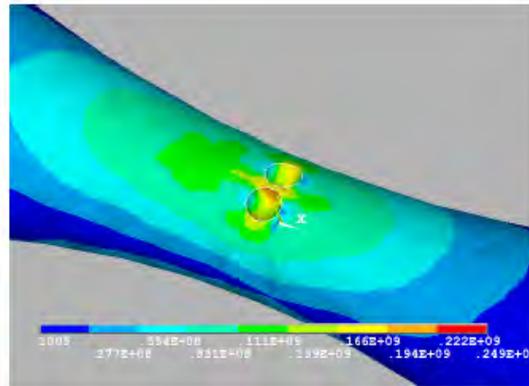


Figure 2. Numerical simulation for the specimen with two close pitting holes with same diameter (100  $\mu\text{m}$  of separation) at the narrow section and in transversal direction.

The high Von Mises stress in Figure 2 is 249 MPa when the specimen is loaded in vertical direction with  $P = 39$  N, as indicated in Figure 1. The specimen is fixed at 14 mm from the left side in order to obtain the rotating bending condition. Numerical results for the specimen without pitting holes under identical loading condition yields 100 MPa for the high Von Mises stress; this implies a stress concentration factor  $K_t$  2.5.

In all experimental tests the narrow section diameter was  $D_0 = 4.1$  mm, the applying load was  $P = 39$  N and 50 Hz of testing frequency. The number of tested specimens was 64; 4 specimens for each of the following classifications: two pitting holes with identical diameter (1 mm) separated 100, 200, 300 and 400  $\mu\text{m}$  in longitudinal and transversal

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

direction, and the same for two pitting holes with different diameters (1 and 0.8 mm). A cooling system was implemented with cool air in order to maintain the highest temperature at narrow section below 80° C; under this condition it was expected no important crystallographic transformation on tested material.

Images of two artificial pitting holes located at narrow section and separated 100 mm in transversal and longitudinal direction are presented in Figure 3. Stress concentration factor  $K_t$  was close to 2.5 in both cases.

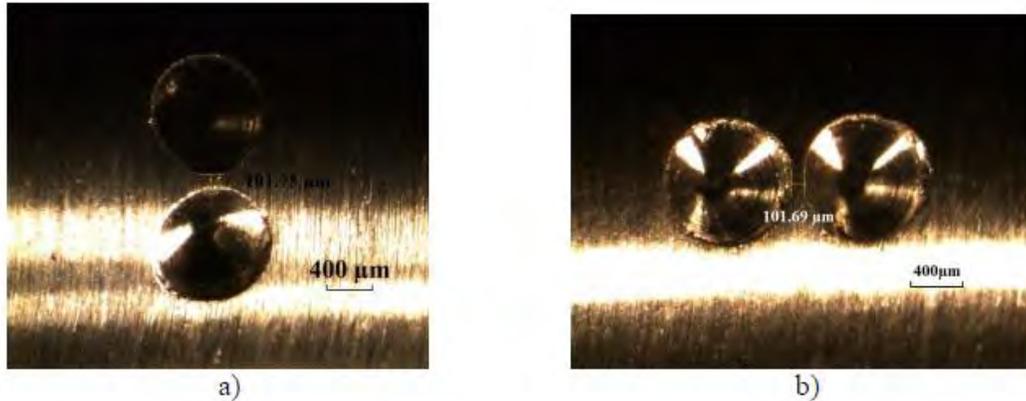


Figure 3. Two pitting holes separated 100 μm, in transversal a) and longitudinal b) direction.

Furthermore, for two pitting holes presenting different diameter (1000 and 800 μm) and separated 100 μm in transversal direction, the stress concentration factor was again  $K_t$  2.5, Figure 4; whereas for the same conditions but in longitudinal direction this was  $K_t$  2.1, Figure 5. In the case of transversal direction, the high stress moves from the bottom of pitting hole for a single hemispherical pitting hole [12,13], to the common wall when the two pitting holes approach, as shown in Figures 2 and 4. In the case of longitudinal direction, the high stress is located following a diametrical direction, perpendicular to the principal axis of specimen, Figure 5.

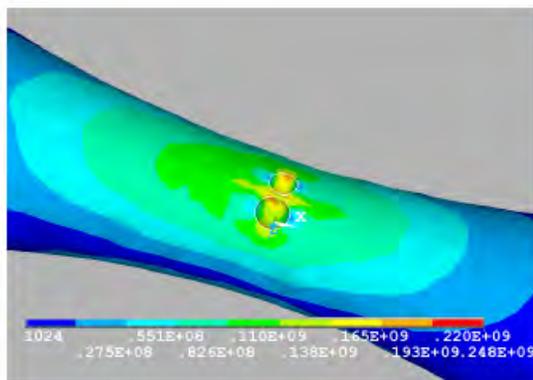


Figure 4. Von Mises Stresses for the two pitting holes 1000 and 800 μm diameter, in transversal direction.

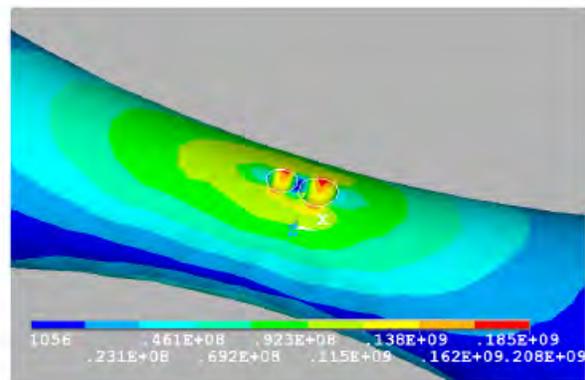


Figure 5. Von Mises Stresses for the two pitting holes 1000 and 800 μm diameter, in longitudinal direction.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

**Results**

Figure 6 presents the fatigue endurance evolution under rotating bending fatigue tests when the specimen presents two pitting holes with identical diameter (1000 μm) in transversal and longitudinal direction and 100, 200, 300 and 400 μm of separation.

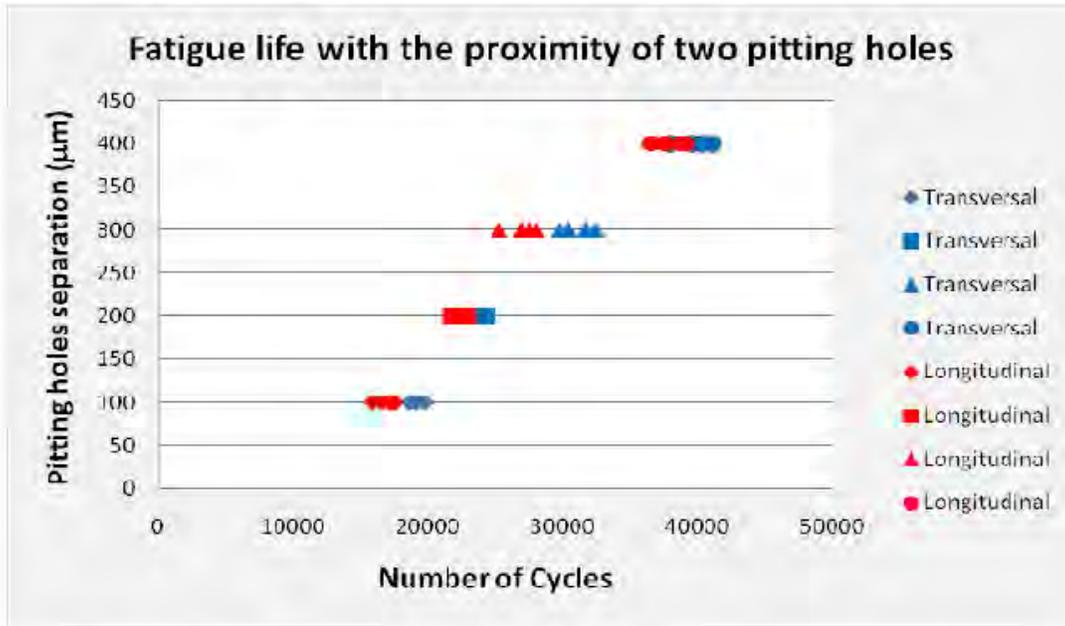


Figure 6. Fatigue life with the proximity of two pitting holes with identical diameter (1 mm), placed on transversal and longitudinal direction.

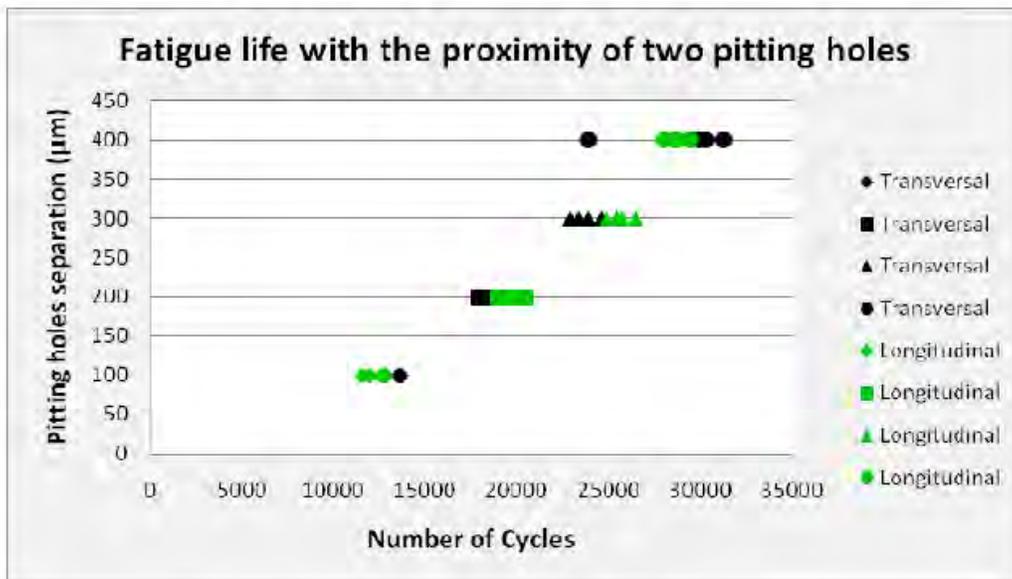


Figure 7. Fatigue life with the proximity of two pitting holes of different diameter (1 and 0.8 mm), placed on transversal and longitudinal direction

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

Results for experimental tests with two pitting holes of different diameter are plotted in Figure 7.

**Fracture surfaces**

Fracture surface for two pitting holes with similar diameter (1 mm) and separated 100  $\mu\text{m}$  in transversal and longitudinal direction is shown in Figure 8a and 8b, respectively.

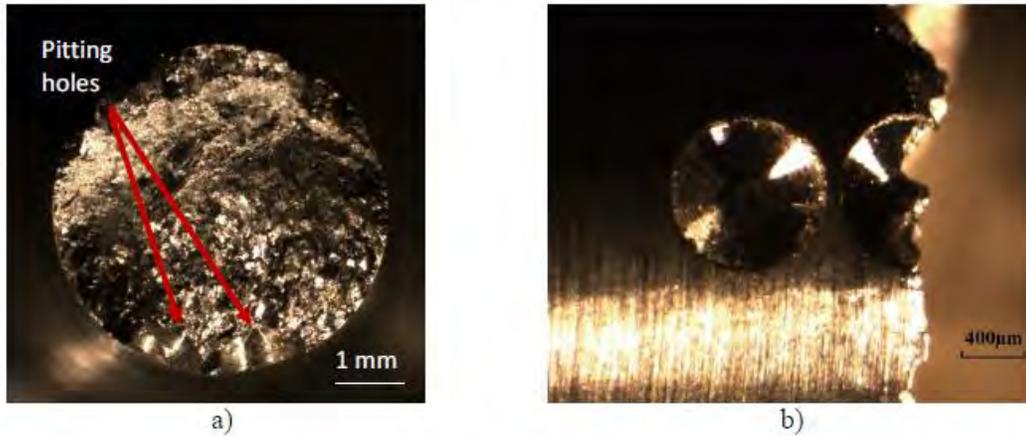


Figure 8. Fracture surface for two similar pitting holes with 100 mm of separation: a) transversal and b) longitudinal.

Concerning the fracture surface for two pitting holes with different diameters (1 and 0.8 mm) and separated 100  $\mu\text{m}$ , the pictures are presented in Figures 9a and 9b for the transversal and longitudinal direction, respectively.

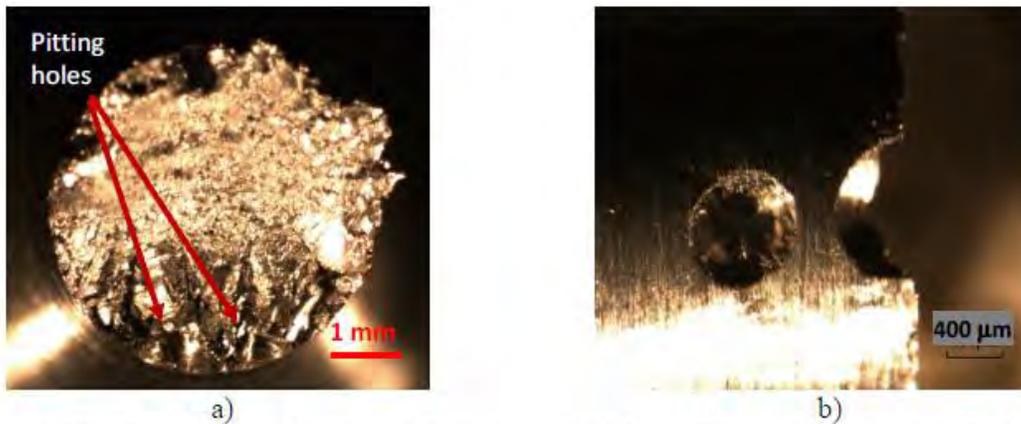


Figure 9. Fracture surfaces for two pitting holes with different diameters and separated 100  $\mu\text{m}$ : a) transversal and b) longitudinal.

### Discussion

Results plotted in Figures 6 and 7 shown a clear tendency: in reducing the proximity of two close pitting holes the fatigue life is reduced dramatically, for both the transversal and longitudinal direction. A factor of 2 on fatigue life is observed when it is compared separation between 100 and 400  $\mu\text{m}$  for both direction and identical or different diameters of the two artificial pitting holes; nevertheless, in the case of pitting holes with different diameter, the fatigue life is reduced of some thousands of cycles compared with the similar diameter pitting holes, particularly for the 100 and 400  $\mu\text{m}$  of separation. In Figure 6 the longitudinal pitting holes for the 4 separation present a fatigue life slightly lower than de the transversal pitting holes. The shear stress in the plane XY for the longitudinal pitting holes is higher in all the cases compared to transversal pitting holes; this should be at the origin of the difference on fatigue life. Concerning Figure 7, no clear tendency is observed: for the 200 and 300  $\mu\text{m}$  of separation fatigue life for longitudinal direction is higher than transversal direction and the points for the 100 and 400  $\mu\text{m}$  of separation are overlapped. Concerning the transversal pitting holes, an exponential increase of the stress concentration factor is observed when the two pitting holes approaches: the high stress moves from the bottom of the single hemispherical pitting hole under uni-axial loading [12-13] to the common wall of the two pitting holes when approaching, as shown in Figure 10 obtained by numerical simulation.

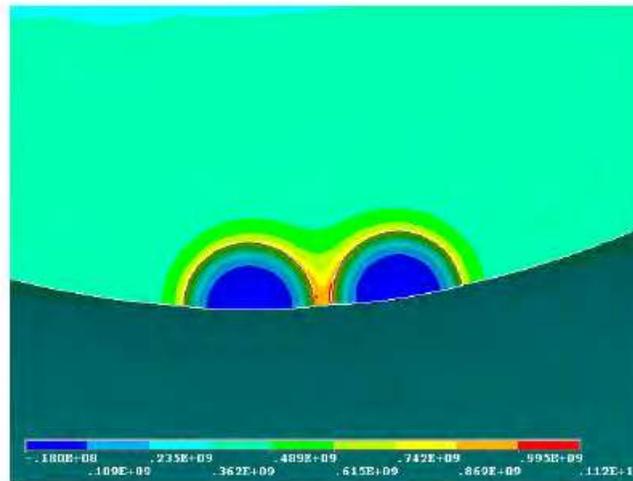


Figure 10. Localization of high stress for two close pitting holes on transversal direction and uni-axial loading.

For the fracture surface, the stress concentration factors localized close the pitting holes induce an important plastic deformation, as shown in Figures 8 and 9. The granular zones related to fast crack growth and low plastic deformation are localized at the opposite of the pitting holes; fracture origin is, then, associated to pitting holes and the stress concentration factor.

### **Conclusion**

Stress concentration factors induced by pitting holes reduce dramatically the fatigue life of tested specimens. [14, 15]. Stress concentration factor for two pitting holes increases exponentially in reducing its separation [10]; then, fatigue life is reduced by a factor of two when the proximity between the two pitting holes moves from 400  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ , all others parameters resting unchanged. Fatigue endurance for longitudinal direction seems to be slightly lower than in transversal direction; particularly for the pitting holes of same diameter. This should be related to the highest shear stress in the plane XY presenting in the case of longitudinal pitting holes. Fracture in the case of two pitting holes presenting different diameter was systematically observed passing by the high pitting hole, Figure 9; this should be associated with a dimension effect of the pitting holes and the stress concentration factor [14, 16-18]. The fracture surfaces show an important plastic deformation close the pitting holes, where high stresses are induced.

### **Acknowledgments**

The authors express their gratitude to the University of Michoacán (UMSNH) for the facilities received in the development of this work. Particular mention of gratitude to CONACYT (National Council for Science and Technology, Mexico City), for the financial support to this research project.

### **References**

1. K. Toh and S. Kanno, “Surface integrity effects on turned 6061 and 6061-T6 aluminum alloys” *J. of Material Science*, 39 (2004), 3497-3500.
2. S.J. Pawel and E.T. Manneschildt, “Corrosion of type 6061-T6 aluminum in mercury and mercury vapor” *J. of Nuclear Materials*, 318 (2003), 355-364.
3. J.R. Davis: ASM International, 2000, Second Edition, ISBN: 0-87170-629-6.
4. P. Traverso, R. Spiniello and L. Monaco, “Corrosion inhibition of Al 6061 T6/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p 10% (v/v) composite in 3.5% NaCl solution with addition of cerium (III) chloride” *Surface and Interface Analysis*, 34 (2002), 185-188.
5. R. Braun, U. U. Alfaro Mercado, G. Biallas, “Investigation on Strength and Corrosion Behaviour of Friction Stir Welded Similar and Dissimilar Aluminum Alloys” *Materials Science Forum, Aluminium Alloys - ICAA10 (2006)*, 1113-1118.
6. W.L. Xu, T.M. Yue, H.C. Man, and C.P. Chan, “Laser surface melting of aluminium alloy 6013 for improving pitting corrosion fatigue resistance” *Surface & Coatings Technology*, 200 (2006), 5077-5086.
7. S. Ishihara, Z.Y. Nan, A.J. McEvily, T. Goshima, S. Sunada, “On the initiation and growth behavior of corrosion pits during corrosion fatigue process of industrial pure aluminum”, 30 (2008), 1659-1668.
8. D.L. DuQuesnay, P.R. Underhill, H.J. Britt, “Fatigue crack growth from corrosion damage in 7075-T6511 aluminium alloy under aircraft loading” *Int. Journal of Fatigue*, 25 (2003), 371-377.
9. H. Allachi, F. Chaouket, K. Draoui, “Protection against corrosion in marine environments of AA6060 aluminium alloy by cerium chlorides” *Journal of Alloys and Compounds*, 491 (2010), 223-229.

“ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA EN FLEXIÓN ROTATIVA Y EL INICIO DE FRACTURA EN LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061-T6, CON HUECOS HEMISFÉRICOS ARTIFICIALES EN LA SUPERFICIE”

---

10. G.M. Domínguez Almaraz, V.H. Mercado Lemus, J.J. Villalón López, “Rotating bending fatigue tests for aluminum alloy 6061-T6, close to elastic limit and with artificial pitting holes” *Procedia Engineering*, 2 (2010), 805-813.
11. M. Cerit, K. Genel, S. Eksi, “Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit”, *Engineering Failure Analysis*, 16 (2009), 2467-2472.
12. W.D. Pilkey, D.F. Pilkey: *Peterson’s Stress Concentrations Factors*, (River Street, NJ: John Wiley & Sons Editions, 2007.
13. P.C Paris, T. Palin-Luc, H. Tada and N. Santier, “Stresses and crack tip stress intensity factors around spherical and cylindrical voids and inclusions of differing elastic properties and with misfit sizes” *Crack Paths 2009*, September 23-25th 2009, Vicenza, Italy, 495-502.
14. S. I. Rokhlin, J. -Y. Kim, H. Nagy and B. Zoofan, “Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life, *Engineering Fracture Mechanics*, 62 (1999), 425-444.
15. R. Pérez Mora, G. Domínguez Almaraz, T. Palin-Luc, C. Bathias, J.L. Arana, “Very High Cycle Fatigue Analysis of High Strength Steel with Corrosion Pitting” *Key Engineering Materials*, 449 (2010), 104-113.
16. M.R. Bayoumi, A.A. Ismail and A.K. Abd El Latif, “Finite element analysis of stresses due to pitting of steel specimens under different cyclic bending stresses”, *Engineering Fracture Mechanics*, 53 (1996), 141-151.
17. K. Sun, “Effect of Stress Concentration Factors due to Corrosion on Production Tubing Design” *SPE Production & Facilities*, 20 (2005), 334-339.
18. G.S. Chen, K.-C. Wan, M. Gao, R.P. Wei and T.H. Flournoy, “Transition from pitting to fatigue crack growth—modeling of corrosion fatigue crack nucleation in a 2024-T3 aluminum alloy”, *Materials Science and Engineering A*, 219 (1996), 126-132.