



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO II**



**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN  
DE ALUMINIO 6063 EN ÁCIDO NÍTRICO AL 15%**

**Tutor:  
Ing. Julio Silva**

**Autor:  
Aurisel Y. Jiménez R.**

Valencia, Marzo 2009

## **DEDICATORIA**

**A Ti mi Amigo, Dios Fiel y Justo,  
Mi Amado Padre,  
Mi Consolador,  
Mi Señor Jesucristo.**

**En Memoria de Sofia.  
La vida me ha enseñado que  
Cada día se debe dar el todo  
Porque el mañana es sólo un día  
que esperamos ver.  
Lamento no hayas visto este día en mi vida,  
Nos vemos en el Cielo.**

## RECONOCIMIENTOS

A mi Tutor, Prof. Julio Silva. Gracias por su apoyo, su enseñanza y la confianza de guiarme en tan arduo trabajo. No podría ser sin usted. Me encanta saber que además somos hermanos en Cristo. Muchísimas gracias.

A los Profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Por su dedicación a la enseñanza y la paciencia para formar hombres y mujeres. Muchas gracias.

A todo el personal Administrativo, Técnicos y Trabajadores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, quienes hacen una muy buena labor. Muchas gracias.

A ti ilustre Universidad de Carabobo. Agradecida por tu enseñanza. Orgullosa de ser UC-ISTA.

## AGRADECIMIENTOS

“Después de la caída sólo queda alguien, que no sólo disfruta de mi bienestar, que no sólo aparece cuando todo es fiesta...el va conmigo al paso que puedo andar. Aún cuando me abandonaron, apuntándome con el dedo para señalar... Tú sin comentarios no arrojaste la piedra, dejándola en el suelo me diste ¡LIBERTAD!”

**A Ti mi Padre Dios**, Gracias por tu abrazo lleno de Amor que me ha cobijado todos los días de mi vida. Es Maravilloso tenerte a mi lado y disfrutar lo hermoso de caminar contigo. Eres Todo para mí, estás en mis pensamientos y mi corazón. Sin Ti JAMÁS lo hubiese logrado. Te Amo con todo mi Corazón, con toda mi Alma y con todo mi Ser.

**A Ti Papi**, Te debo lo que soy y los principios que me diste. Gracias por tu paciencia y porque aún a pesar de mis fallas creíste en mí. Eres parte de mi vida y mi corazón. Eres un Papá único, estoy muy agradecida con Dios por darme el honor de tenerte como mi Padre. Este logro te pertenece. Te amo.

**A Ti Mami**, Lo logramos!! Gracias por estar siempre conmigo, por ser mi amiga. Formas parte importante en los lugares de mi corazón. Expresarte lo que significas para mí es tan difícil porque, ¿cómo se explica que eres mi vida?... Estoy muy orgullosa de Ti, y te digo un secreto...”cada vez que quería colgar la toalla, sólo cerraba los ojos y te recordaba” Te amo.

**A Ti mi Herma, Karina**. Tus palabras llegaron a lo más profundo de mi corazón...”espero ver este día en tu vida”... Eres muy especial para mí y por eso luché para no defraudarte. Cada palabra, cada alegría, cada pelea, me ayudaron a seguir adelante...no quería show!.Es tuyo mi Herma. Te amo.

**A mis Hermanos**, Juan C., Jumer, Auri C., Juan C.(Jr) y Junietzon, porque de cada uno de ustedes tuve una enseñanza que me impulso a no dejar mi norte. Gracias!! Los quiero.

**A mis Abuelos**, Aura Cecilia, Nicolás, Francisco “Maneque” y Cruz María “Maita Cucha”, Sin el complemento de ustedes cuatro estas palabras no existirían. A ti Cucha...gracias por tantas rodillas dobladas y dejarme el mejor regalo que he tenido en mi vida...Conocer a Cristo, El te dará los detalles... Nos vemos en el cielo.

**A José**, Bello llegaste para darme el toque de motivación que me hacía falta, y no llegaste de último, al contrario... llegaste en el comienzo de mi futuro...construyendo el cordón de tres dobleces, el cual no se rompe fácilmente. Te amo.

[A mi Amada Familia CENTECRIV](#), Dios me dio el hermoso regalo de no estar sola en esta ciudad tan grande. Son realmente mi familia, y como tal he recibido apoyo, palabras de aliento, motivación y me han regalado lo más importante...Palabra de Dios. Nombrarlos a todos es hacer una lista interminable...Los amo.

[A toda mi Familia Jiménez Rodríguez](#), Gracias por todo el apoyo durante todos estos años. Sólo les dejo la reflexión de las sabias palabras “El que persevera Vence”.

[A Marilys](#), Negra... a paso lento pero seguro. Gracias por ser quién eres. Nuestra amistad va más allá de lo que cualquiera puede imaginar. Se que te hace feliz verme feliz y eso lo sientes porque más que mi amiga...eres mi Hermana! Te quiero de corazón.

[A mis Amigos Únicos](#), Patricia, Rossemary, Adriana y Gustavo. Ustedes me han enseñado el verdadero significado de una amistad, como dice la Biblia... “El hombre que tiene amigos ha de mostrarse amigo; Y amigo hay más unido que un hermano”. Proverbios 18:24. Los quiero.

[A mis Amigos de la Vida](#), Jesús Alberto, Jesús Páez, Rommel, Marle, Malou y Angelito, porque siempre estuvieron pendientes de cada uno de mis pasos. Los quiero.

[A mi Tío Edgar](#), Agradezco cada palabra “gritada o hablada” que me impulsaron a no dejar caer mis metas, me ayudaste a seguir adelante y te confieso que has sido de gran ejemplo para mí. Ya sabes que no sólo eres mi Tío... eres mi Tío preferido. Te quiero.

[A mi Familia Bárcenas Riera](#), No podré olvidar los años de apoyo, de cobijo, de consuelo, de alegrías que viví a su lado. Les debo mucho!!. Agradecida con todo mi corazón. Los quiero.

[A todas Mis Familias](#), Son muchas las familias a quienes quiero agradecerles por estar a mi lado, por hacerme sentir que si podía: Soledad Rivera, ustedes no son mis vecinos...son mi familia. Valera Rodríguez, ¡Hasta que por fin!... tarde pero seguro, ustedes saben el lugar que ocupan en mi vida y mi corazón. Familia García Gómez, ustedes son especiales para mí y lo saben. Les debo la alegría de darme mis hermosos sobrinos (Julio C., Isabela y Camila) mientras esperábamos este logro. Familia Leal... más Leal imposible. Familia Vera, Compadres...Nunca es tarde...la dicha llegó!. Familia Paredes, los lazos de amistad que nos unen van mucho más allá!. Familias Barazarte, Lasala, Sanguinetti, Pepina y Daxi, desde el corazón...Muchísimas gracias!!

A mis Amigos, Maria Vaccarini, Dania, Engelberth, Pedro y todos los compañeros de nuestra escuela. Gracias por risas, sustos, rabias y resignaciones, sólo ustedes pueden saber lo que significa lograrlo. Señores para ustedes un dos por delante!!!

A Ti, Que por alguna razón especial estas leyendo este agradecimiento, quiero decirte que seguramente también formas parte este logro. Quizá creíste... quizá no!!, hoy dirás “siempre supe que lo haría” o “pensé que no lo lograría”... Lo cierto es vaya para ti esta enseñanza. “Los objetivos siempre pueden lograrse, con constancia, lucha, perseverancia.... Probablemente ya todo lo hayas hecho... quiero decirte que sólo una cosa le faltaba a mi vida y era el Amor de Dios que sobrepasa todo entendimiento. El es el único que sabe hasta donde puedes llegar, cuan bueno puedes resultar, siempre verá lo mejor de Ti... y lo mejor... Nunca falla. Te aseguro que sin su Amor ni su Poder su Gloria jamás la hubiese visto... Así que no fue nada, fue sólo misericordia de Dios que me tomó del lodo más pegajoso, me levantó, me cambió las vestiduras y me dijo...Eres la Niña de Mis Ojos”.

Aurisel Yanira Jiménez Rodríguez

# EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 6063 EN ÁCIDO NÍTRICO AL 15%

**Autor:** Aurisel Y. Jiménez R.

**Tutor:** Ing. Julio Silva

**Fecha:** Marzo 2009

## RESUMEN

Se ha llevado a cabo un estudio sobre el comportamiento a la fatiga en condiciones de flexión rotativa de la aleación de aluminio 6063 sometida a corrosión. Se pretende comparar el resultado obtenido en ensayos con ácido nítrico como medio corrosivo, con los obtenidos al aire, con el propósito de realizar una observación de su resistencia y vida útil. Se ensayaron 25 probetas para cada condición, con esfuerzos teóricos del orden de 95, 90, 85, 80 y 75% del esfuerzo de fluencia del material para ambas condiciones. Tanto para ensayos de fatiga al aire como en ácido nítrico al 15%, se usó el mismo esfuerzo de fluencia, para luego realizar la comparación dada las mismas condiciones pero con distintos medios acuosos. Se realizó un análisis comparativo usando la ecuación de Basquin la cual se graficó, arrojando resultados evidentes en la reducción de vida útil del aluminio 6063 sometido a fatiga sumergido en ácido nítrico al 15%. Así mismo se llevó a cabo un análisis con el microscopio electrónico de barrido (MEB) de las superficies de fractura seleccionadas, con la finalidad de caracterizar los mecanismos de fractura presentes. Finalmente, se observó que la vida de fatiga del aluminio 6063 expuesto al aire, es mucho mayor que cuando se expuso al ácido nítrico al 15%.

**Palabras clave:** Aleación de aluminio 6063, Microscopía electrónica de barrido (MEB), número de ciclos, fatiga, flexión rotativa, corrosión, fatiga con corrosión.

## ÍNDICE

### Índice general

PÁGINA DE GUARDA.....	i
PORTADA.....	ii
PÁGINA DE TÍTULO.....	iii
CERTIFICADO DE APROBACIÓN.....	iv
DEDICATORIA.....	v
RECONOCIMIENTOS.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
RESUMEN.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
EL PROBLEMA	
1.1. TÍTULO.....	2
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2.1. Formulación del problema.....	4
1.3. OBJETIVOS	
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. JUSTIFICACIONES.....	5
1.5. LIMITACIONES, DELIMITACIONES Y ALCANCES	
1.5.1. Limitaciones.....	6
1.5.2. Delimitaciones.....	7
CAPÍTULO 2	
MARCO TEÓRICO	
2.1. ANTECEDENTES.....	8
2.2. BASES TEÓRICAS.....	9
2.2.1. Nomenclatura de las aleaciones de aluminio.....	13

2.2.2. Características y aplicaciones de las aleaciones de aluminio	
6063.....	14
2.2.3. Fatiga en las aleaciones de aluminio.....	15
2.2.4. Etapas en el proceso de fatiga.....	16
2.2.5. Manifestación y proceso de la falla.....	17
2.2.6. Análisis del origen de las fallas por fatiga.....	19
2.2.7. Cargas que originan la fatiga.....	22
2.2.8. Características fractográficas.....	22
2.2.9. Comportamiento del aluminio frente a la corrosión .....	25
2.2.10. Fatiga con corrosión.....	29
2.2.11. Iniciación de la grieta en fatiga con corrosión.....	31
2.2.12. Propagación de la grieta en fatiga con corrosión.....	33
2.2.13. Corrosión atmosférica.....	35
2.2.14. Corrosión filiforme.....	35
2.2.15. Corrosión intergranular.....	35
2.2.16. Fragilización por hidrógeno.....	36
2.2.17. Corrosión por exfoliación.....	37
2.2.18. Conductos enterrados.....	37
2.2.19. Corrosión en aguas salinas.....	37
2.2.20. Ensayos de corrosión.....	38
2.2.21. Clasificación de los ensayos de corrosión.....	41
2.2.22. Muestreo.....	42
2.2.23. Preparación de la superficie.....	43
2.2.24. Mediciones y pesaje.....	43
2.2.25. Técnicas de exposición.....	44
2.2.26. Temperatura.....	44
2.2.27. Aireación durante los ensayos.....	45
2.2.28. Duración de los ensayos.....	45
2.2.29. Limpieza de muestras después de la exposición.....	46
2.2.30. Expresiones estándar para la velocidad de corrosión.....	47
2.2.31. Presentación y resumen de datos.....	48

## CAPÍTULO 3

### MARCO METODOLÓGICO

3.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	50
3.2. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN.....	51
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	51
3.3.1. Materiales y equipos.....	51
3.3.1.1. Barras de aleación de aluminio 6063.....	51
3.3.1.2. Máquina de tracción.....	52
3.3.1.3. Máquina de fatiga.....	53
3.3.1.4. Microscopía electrónica de barrido.....	54
3.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	54
3.4.1. Mecanizado y corte de las probetas.....	54
3.4.2. Ensayos de tracción.....	56
3.4.2.1. Procedimiento de ensayos de tracción.....	56
3.4.3. Ensayos de fatiga.....	58
3.4.4. Ecuación de Basquin para la construcción de las gráficas S-N.....	60

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. RESULTADOS

4.1.1. ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	63
4.1.2. ENSAYOS DE FATIGA.....	64
4.1.2.1. Velocidad de giro.....	65
4.1.2.2. Resultado de los ensayos de fatiga en aire.....	65
4.1.2.3. Resultado de ensayos de fatiga en ácido nítrico al 15%.....	66
4.1.2.4. Análisis estadístico y gráfico de los ensayos de fatiga.....	71
4.1.2.4.1. Análisis estadístico y gráfico de los ensayos de fatiga con probetas expuestas en aire.....	71

4.1.2.4.2. Análisis estadístico y gráfico de los ensayos de fatiga con probetas expuestas en ácido nítrico al 15%.....	72
4.1.3. FRACTOGRAFÍA.....	77
4.1.3.1. Fractografía de muestras ensayadas en aire.....	77
4.1.3.2. Fractografía de muestras ensayadas en ácido nítrico al 15%.....	84
4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
CONCLUSIONES.....	93
RECOMENDACIONES.....	94
BIBLIOGRAFÍAS.....	96
GLOSARIO.....	98

## Índice de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Conjunto de propiedades promedio.....	10
<b>Tabla 2.2.</b> Intervalo de composición química de la aleación 6063.....	11
<b>Tabla 3.1.</b> Composición química del material adquirido AA-6063. ALUCASA.....	52
<b>Tabla 4.1.</b> Esfuerzo de fluencia experimental arrojado por la máquina de tracción.....	63
<b>Tabla 4.2.</b> Momento flector aplicado en cada probeta según el porcentaje.....	64
<b>Tabla 4.3.</b> Resultados de ensayos de fatiga de la aleación de aluminio 6063 en aire.....	65
<b>Tabla 4.4.</b> Resultados de ensayos de fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.....	67
<b>Tabla 4.5.</b> Valores necesarios para el cálculo de la ecuación de Basquin de los ensayos en aire.....	71
<b>Tabla 4.6.</b> Valores necesarios para el cálculo de la ecuación de Basquin de los ensayos en ácido nítrico al 15%.....	72
<b>Tabla 4.7.</b> Porcentaje de variación del número de ciclos para el mismo esfuerzo de fluencia.....	77

## Índice de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Diagrama cuasi-binario.....	12
<b>Figura 2.2.</b> Diagrama de la composición de las aleaciones de aluminio.....	13
<b>Figura 2.3.</b> Evolución de la falla.....	18
<b>Figura 2.4.</b> Nucleación.....	20
<b>Figura 2.5.</b> Características de la superficie de falla típica de un metal dúctil sometido a cargas cíclicas alternantes.....	24
<b>Figura 2.6.</b> Resistencia de la aleación de aluminio 1100 en ácido nítrico.....	27
<b>Figura 2.7.</b> Rata de corrosión de la aleación de aluminio 1100 en ácido nítrico, demostrando la influencia de concentración y temperatura.....	28
<b>Figura 2.8.</b> Efecto de la concentración y la temperatura en la resistencia de la aleación de aluminio 1100 en ácido sulfúrico.....	29
<b>Figura 2.9.</b> Curva S-N para aleaciones de aluminio en aire y con corrosión.....	30
<b>Figura 2.10.</b> Fatiga con corrosión de una aleación de Ti-6Al-4V en aire ambiente.....	31
<b>Figura 2.11.</b> Comparación de esfuerzo-número de ciclos de un material en medio inerte y un medio agresivo (corrosivo).....	32
<b>Figura 2.12.</b> Efecto del esfuerzo vs frecuencia de la carga en fatiga con corrosión en el acero 4340 expuesto en agua destilada a 23 °C.....	34
<b>Figura 2.13.</b> Tipos de corrosión.....	37
<b>Figura 3.1.</b> Diseño de la investigación.....	50
<b>Figura 3.2.</b> Máquina de tracción.....	52
<b>Figura 3.3.</b> Máquina de fatiga.....	53
<b>Figura 3.4.</b> Microscopio electrónico de barrido.....	54
<b>Figura 3.5.</b> Probetas para ensayo de tracción según norma ASTM-A370.....	55
<b>Figura 3.6.</b> Probetas para ensayo de fatiga según norma ASTM-E606.....	55

<b>Figura 3.7.</b> Método Off Set para hallar el esfuerzo de fluencia.....	57
<b>Figura 3.8.</b> Probeta para ensayo de fatiga de AA-6063.....	59
<b>Figura 4.1.</b> Gráfica S-N de la aleación de aluminio 6063 en aire.....	68
<b>Figura 4.2.</b> Gráfica S-N de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.....	69
<b>Figura 4.3.</b> Gráfica comparativa del S-N de la aleación de aluminio 6063 para las dos condiciones ensayadas.....	70
<b>Figura 4.4.</b> Gráfica S-N de la aleación de aluminio 6063 en aire, en escala bilogarítmica.....	74
<b>Figura 4.5.</b> Gráfica S-N de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico, en escala bilogarítmica.....	75
<b>Figura 4.6.</b> Gráfica comparativa S-N de la aleación de aluminio 6063 en los dos ambientes ensayados en escala bilogarítmica.....	76
<b>Figura 4.7.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°5 en aire con 95% del esfuerzo de fluencia.....	78
<b>Figura 4.8.</b> MEB de la muestra N°5 en aire con 95% del esfuerzo de fluencia...	78
<b>Figura 4.9.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°8 en aire con 90% del esfuerzo de fluencia.....	79
<b>Figura 4.10.</b> MEB de la muestra N°8 en aire con 90% del esfuerzo de fluencia.....	80
<b>Figura 4.11.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°14 en aire con 85% del esfuerzo de fluencia.....	80
<b>Figura 4.12.</b> MEB de la muestra N°14 en aire con 85% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 1000x.....	81
<b>Figura 4.13.</b> MEB de la muestra N°14 en aire con 85% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 100x.....	82
<b>Figura 4.14.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°23 en aire con 75% del esfuerzo de fluencia.....	82
<b>Figura 4.15.</b> MEB de la muestra N°23 en aire con 75% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 100x.....	83

<b>Figura 4.16.</b> MEB de la muestra N°23 en aire con 75% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 60x.....	84
<b>Figura 4.17.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°2 en ácido nítrico al 15% con 95% del esfuerzo de fluencia.....	85
<b>Figura 4.18.</b> MEB de la muestra N°2 en ácido nítrico al 15% con 95% del esfuerzo de fluencia.....	85
<b>Figura 4.19.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°7 en ácido nítrico al 15% con 90% del esfuerzo de fluencia.....	86
<b>Figura 4.20.</b> MEB de la muestra N°7 en ácido nítrico al 15% con 90% del esfuerzo de fluencia.....	87
<b>Figura 4.21.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°12 en ácido nítrico al 15% con 85% del esfuerzo de fluencia.....	87
<b>Figura 4.22.</b> MEB de la muestra N°12 en ácido nítrico al 15% con 85% del esfuerzo de fluencia.....	88
<b>Figura 4.23.</b> Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N°21 en ácido nítrico al 15% con 75% del esfuerzo de fluencia.....	88
<b>Figura 4.24.</b> MEB de la muestra N°21 en ácido nítrico al 15% con 75% del esfuerzo de fluencia.....	89



---

## INTRODUCCIÓN

El aluminio y sus aleaciones están tomando un auge importante dentro de la industria a nivel mundial. Se están experimentando una serie de técnicas para determinar su comportamiento mecánico y desarrollar así su potencial. Para dichos estudios se realizan una serie de ensayos y así establecer un criterio sobre la resistencia de este material en diferentes medios.

El aluminio es un metal que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no férricos. La aleación de aluminio 6063 está dentro de uno de los grandes grupos en los que se encuentra clasificado el aluminio.

Investigar el comportamiento a fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico, no es más que ampliar sus alcances y proyecciones, debido a que este ácido es un agente oxidante potente, viscoso, incoloro e inodoro, pero altamente corrosivo. Es usado comúnmente como un reactivo de laboratorio, también para fabricar explosivos, además de utilizarse en la metalurgia la cual es la técnica de la obtención y tratamiento de los metales a partir minerales metálicos incluyendo la producción de aleaciones.

En este estudio se quiere realizar ensayos de fatiga en condiciones de flexión rotativa, empleándose probetas entalladas usándose la norma ASTM-E606 y a partir de las muestras ensayadas realizar una comparación de la resistencia a la fatiga entre el aire y un medio corrosivo, el cual fue ácido nítrico al 15% de concentración.

Mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), se llevará a cabo un análisis fractográfico de las superficies de fractura.



---

## CAPÍTULO 1

### EL PROBLEMA

#### 1.1. TÍTULO

Evaluación de la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.

#### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las diferentes propiedades de las aleaciones de aluminio no pueden ser igualadas por ningún otro material. Son livianas, tienen buena resistencia a la corrosión, alta resistencia a la tracción y son de un aspecto muy atractivo. Además de estas características que permiten al fabricante producir artículos mejores y de más fácil venta, debe mencionarse la facilidad con que pueden trabajarse, reduciendo grandemente las dificultades y problemas de manufactura. La combinación de sus cualidades lo hacen el preferido para el diseño de algunas piezas o artículos completos.

Para la elaboración de perfiles, la materia prima utilizada es la aleación de aluminio 6063 (Al, Cr, Cu, Mg, Si). También puede ser usado para el transporte de medios corrosivos como el ácido nítrico, dado a que este tipo de aleaciones tienen como características: peso liviano, resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, alta flexibilidad, no magnético, atóxico, resistente, no produce chispas, fácil de trabajar e instalar y de fácil mantenimiento. Ésta aleación se usa también en perfiles de carpintería metálica, puertas, ventanas, carcasas para motores eléctricos, sistemas de ensamblado, elementos especiales para maquinaria, tubos de riego, instalaciones neumáticas y en general donde se busque una aplicación decorativa, y hasta ahora comienzan estudios sobre su resistencia a la fatiga.



---

El aluminio es un metal que reúne una serie de propiedades mecánicas excelentes dentro del grupo de los metales no férreos, de ahí su elevado uso en la industria. Los metales ferrosos se están siendo sustituidos por el aluminio, tal es el caso de los automóviles o motocicletas, donde cada día aparecen más de estas últimas con bastidores de aluminio y autos con suspensiones, partes del chasis y carrocería fabricados con aluminio y cuando se habla de aluminio, se tienen en cuenta todas sus aleaciones. .

Se han realizado muchos ensayos donde la aleación de aluminio 6063 ha sido el principal protagonista. Dichos ensayos se realizan para establecer un criterio sobre el comportamiento de este material en diferentes medios, lo cual se hace importante por el auge que está obteniendo. De aquí, el interés de estudiar todos los alcances del aluminio, y su comportamiento mecánico.

Para la aleación 6063, se han realizado estudios que involucran fallas por fatiga, agregándole a ésta la corrosión por diferentes medios. Pero no se ha determinado un estudio que involucre el ácido nítrico quizá por ser un agente oxidante poderoso.

El ácido nítrico se emplea en la preparación de diversos colorantes, fertilizantes (nitrato de amonio), productos farmacéuticos y explosivos tales como la nitroglicerina, nitrocelulosa y trinitrotolueno (TNT). El ácido nítrico también se emplea en metalurgia y para procesar combustibles nucleares no consumidos. Ocupa alrededor del decimocuarto lugar, en producción en masa, entre los productos químicos más fabricados.

La fatiga con corrosión ocurre por acción de una tensión cíclica y ataque químico simultáneo. Lógicamente los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la vida de fatiga, incluso la atmósfera normal afecta a algunos materiales. Como consecuencia pueden producirse pequeñas fisuras o picaduras que se comportarán como concentradoras de tensiones originando grietas. Éstas



---

aumentan en el medio corrosivo puesto que el mismo corroerá también el interior de la grieta produciendo nuevas fisuras.

Se desea entonces realizar un estudio de la influencia de la microestructura del comportamiento a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%. De este modo, se abrirán más puertas para diferentes estudios e investigaciones que le darán a este metal una mayor entrada al mercado, sustituyendo posiblemente a otros materiales y garantizando su permanencia en la industria por sus bajos costos.

### **1.2.1. Formulación del problema**

¿Qué resistencia tiene la aleación de aluminio 6063 cuando se encuentra sometido a agentes corrosivos como el ácido nítrico, comparándolas con la misma aleación sometida al aire, aplicándole cargas flexo-rotativas?

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.



---

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar información del comportamiento a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en aire.
- Recopilar información del comportamiento a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.
- Obtener datos de ensayos de fatiga a las probetas de aleación de aluminio 6063 mecanizada bajo la norma ASTM-E606, expuestas al aire.
- Obtener datos de ensayos de fatiga a las probetas de aleación de aluminio 6063 mecanizada bajo la norma ASTM-E606, expuestas al ácido nítrico al 15%.
- Comparar los resultados del comportamiento de las probetas de aleación de aluminio 6063 obtenido en los ensayos, tanto en el aire como en el medio corrosivo.
- Realizar un análisis de la superficie de fractura de las probetas ensayadas a fatiga en ácido nítrico al 15% y las ensayadas en aire, mediante técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), con el objeto de determinar las características fractográficas que operan en dichas probetas y comparar los resultados entre ambos medios.

### 1.4. JUSTIFICACIONES

La aleación de aluminio 6063 está siendo muy utilizada en diferentes áreas debido a su alta resistencia. Las áreas referidas son, entre otros, motos, cavas para



el transporte de diferentes ácidos, bicicletas, chasis para autos, suspensiones, carrocerías.

Dado que el ácido nítrico debe ser manejado cuidadosamente, es la razón por la cual esta investigación se basa en una concentración del 15%. A esta concentración el ácido nítrico puede conseguirse en cualquier medio donde éste se manipule, como lo es en empresas de fabricación de explosivos donde el ácido nítrico comienza a formar parte del ambiente que lo rodea.

El ácido nítrico se obtiene mezclando pentóxido de dinitrógeno ( $N_2 O_5$ ) con agua. En su mayoría las soluciones comerciales se componen de más de 50% de ácido nítrico, excepto el llamado ácido nítrico fumante, compuesto por más de un 86% de ácido nítrico. Este viene en dos variedades blanco y rojo. El ácido nítrico blanco fumante, se llama también 100% ya que sólo lo acompaña un 2% de agua.

## 1.5. LIMITACIONES, DELIMITACIONES Y ALCANCES

### 1.5.1. Limitaciones

- Una limitación la constituye el uso de la máquina de fatiga. Dicha máquina es la única en la facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo y existen actualmente varios trabajos de grado que requieren la máquina para sus respectivos estudios.
- El uso del ácido nítrico conforma una limitación debido a que se debe diseñar un contenedor para el mismo. Para la recirculación del ácido el contenedor debe ser realizado con un polímero que resista su presencia.



---

### 1.5.2. Delimitaciones

- El presente trabajo de grado tiene como fin realizar un estudio del comportamiento de fatiga del Aluminio 6063 en ácido nítrico, usando una concentración del 15%, comparándolo con el comportamiento que mostró durante su análisis en el aire.
- Se realizará un estudio microscópico de la aleación de aluminio luego de la fractura para así evaluar su microestructura y mecanismo de falla.
- Se ensayarán una cantidad de 25 probetas para el ensayo en el aire y 25 probetas en ácido nítrico al 15%.



---

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ANTECEDENTES

- **La Barbera Sosa y Pérez Meza (2002).**

En este trabajo se realizó un estudio a la aleación de aluminio 6063, sobre su comportamiento a fatiga en condición de flexión rotativa, con un tratamiento de envejecimiento. Se realizaron ensayos de fatiga a la aleación de aluminio 6063 tanto en el medio ambiente como en condiciones corrosivas, empleando para este último una solución de NaCl al 3%.

- **Merizalde y otros (2002)**

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio sobre el comportamiento a la fatiga de una aleación comercial de aluminio del tipo AA6063-T6. El estudio fue realizado mediante ensayos de fatiga en condiciones de flexión rotativa, empleándose probetas entalladas con muescas de geometría conocida. A partir de las muestras ensayadas, mediante técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB), se llevó a cabo un análisis fractográfico de las superficies de fractura, específicamente de las zonas vecinas a la localización del origen de las grietas y de la zona correspondiente a la fractura dúctil. Dichas observaciones permitieron estimar el tamaño crítico de la grieta a cada nivel de esfuerzo alternante. Finalmente, las curvas S-N obtenidas a partir de muestras entalladas y sin entallar, permitieron la determinación del factor de concentración de esfuerzos en fatiga, encontrándose que la aleación de aluminio investigada presenta una baja sensibilidad tanto a la presencia de entalladuras, como al tamaño de las mismas.



---

- **Di Prinzio y Kedzod. 1983**

Este trabajo se realizó con el objeto de caracterizar un material en particular de acuerdo a la variación de algunas de sus propiedades en función del tamaño de grano. Una AA6063 T5, fue sometida a un proceso de laminación a temperaturas de 25, 120 y 200 °C, hasta obtener un porcentaje de reducción de 59, 79 y 89% y un espesor final común.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

El desarrollo que se realiza a continuación establece las características principales de la aleación de aluminio 6063, también se hace referencia sobre la corrosión, fatiga de los metales y, en específico, de las aleaciones de aluminio.

La 6061 está comprendida dentro del grupo de las aleaciones que ofrecen resistencia intermedia a la tracción (30-35 kg/mm<sup>2</sup>), mientras que la 6063 presenta propiedades mecánicas sensibles mas bajas (20-25 kg/mm<sup>2</sup>). Estas aleaciones, están comprendidas entre las denominadas térmicamente tratables o de endurecimiento estructural, es decir, aquellas que, con un adecuado temple mejoran sus propiedades mecánicas debido a la precipitación fina de compuestos intermetálicos en el seno de la matriz. [17]

Las diferentes combinaciones de tratamientos, dan origen a distintos tratamientos térmicos, según la clasificación de Aluminum Association. Los empleos usualmente en aleaciones Al-Mg-Si, en cables, tubos y perfiles extrudidos son:

Temple T0: Está recocido

Temple T4: Tratado térmicamente y luego envejecido natural.

Temple T5: Tratado térmicamente y luego envejecido artificialmente.

Temple T6: Solubilizado y envejecido naturalmente.



En el código para una aleación de aluminio, además de indicarse la composición química, se especifican sus características físico-mecánicas mediante un sufijo formado por una letra y un número que señalan el temple o la condición de la aleación. Por ejemplo, para la universalmente empleada 6063-T6:

- El prefijo 6XXX marca que se trata de una aleación de aluminio, magnesio y silicio.
- La letra T indica que el material ha sido tratado térmicamente para obtener un temple estable.
- El número 6 que sigue a la letra T determina el tipo de temple. [18]

En la Tabla 2.1 se resumen el conjunto de propiedades promedio que se obtiene con esta aleación, en los diferentes tratamientos térmicos.

Tabla 2.1. Conjunto de propiedades promedio que se obtiene con esta aleación[19]

Tratamiento Térmico	Dureza Brinell Carga:500 kg Bola: 10 mm	Propiedades Mecánicas				
		Sy (0.2%) MPa	S <sub>ues</sub> MPa	Resistencia a la Fatiga		Elong. (%) Long. 50mm Esp.1,6
				S Mpa	N 10 <sup>6</sup>	
<b>T0</b>	25	50	90	55	500	-
<b>T1</b>	42	90	150	70	500	20
<b>T4</b>	46	90	170	-	-	22
<b>T5</b>	60	145	185	70	500	12
<b>T6</b>	73	215	240	70	500	12



Los principales elementos de esta aleación son el magnesio y el silicio. Según la Aluminum Association, los intervalos de composición química de la aleación 6063 son:

**Tabla 2.2.** Intervalos de composición química de la aleación 6063 según la Aluminum Association. [7]

AA	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn	Al
6063	<b>0,2-0,6</b>	<b>0,45-0,9</b>	<b>0,35</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>Resto</b>
<b>Valores Máximos</b>									

Dado que la solubilidad de Mg y Si en aluminio aumenta con la temperatura, un tratamiento de solubilizado permite situar la totalidad de éstos elementos químicos a la máxima cantidad de aleantes en solución, permitidos por el diagrama de equilibrio.

Se considera más favorable el exceso de silicio (Si) en vez de magnesio (Mg), ya que este último reduce la solubilidad de  $Mg_2Si$ , es decir, el compuesto endurecedor. El contenido de hierro mejora las características mecánicas, la cinética de recristalización y la conductividad eléctrica, mientras que la calidad superficial y la resistencia a la corrosión son mejores en su ausencia.

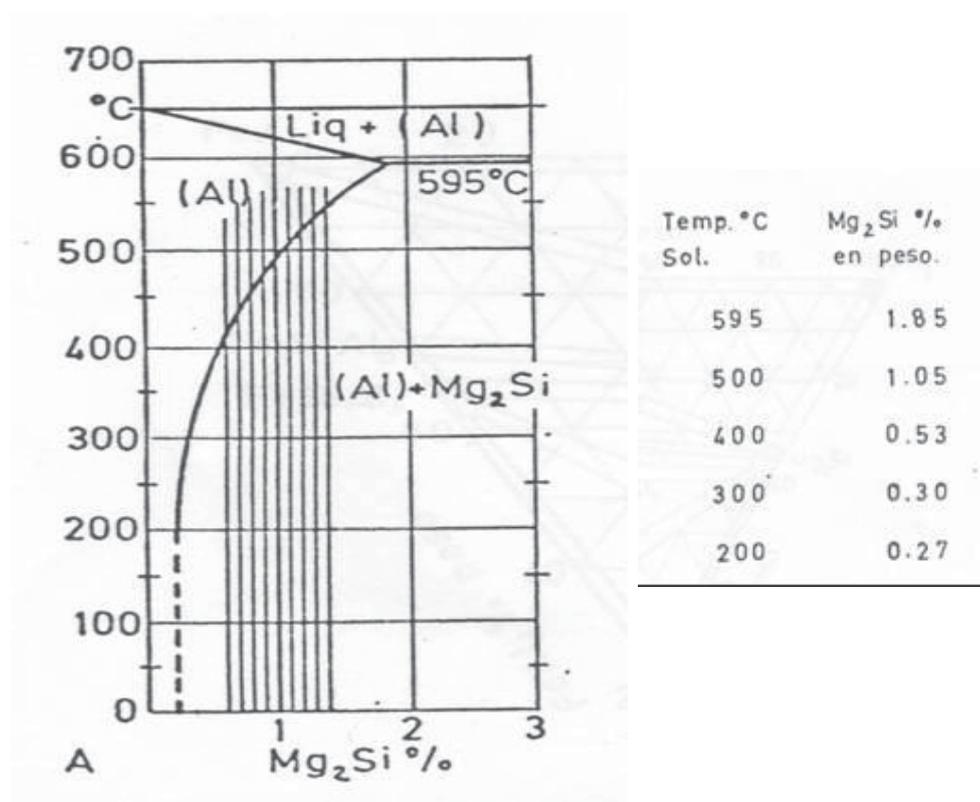
En cuanto al efecto del cobre, se ha determinado que la adición del mismo a niveles muy bajos, sobre una aleación balanceada o con exceso de Si, refina los precipitados envejecidos de  $Mg_2Si$ .

Los otros elementos como el Mn, Zr, Cr, son empleados para aumentar las propiedades mecánicas sin modificar la sensibilidad al temple, mejorar la ductilidad o para generar estructuras no recristalizadas.



Como resumen de las características más importantes de la aleación 6063, puede citarse su gran formabilidad, ya que permite velocidades de extrusión de 40-60 M por minuto, una excelente resistencia a la corrosión bajo tensiones, tanto en atmósferas industriales como en agua de mar. Posee además buena solubilidad ya sea por arco, gas o brazing y características intermedias de maquinabilidad para trabajar en frío, lo que brinda un extenso campo de aplicación en todos los usos estructurales.

En la Figura 2.1 se muestra el diagrama cuasi-binario y corte del sistema ternario, donde la región rayada corresponde al intervalo de composición de la aleación de aluminio 6063.



**Figura 2.1.** Diagrama cuasi – binario Al + Mg<sub>2</sub>Si. Corte del sistema ternario para la relación Mg/Si = 1,73, la región rayada corresponde al intervalo de composición de la 6063 según especificaciones de Aluminium Association. [9]



### 2.2.1 Nomenclaturas de las aleaciones de aluminio

La nomenclatura para aleaciones de aluminio, no está estandarizada internacionalmente. Muchas naciones han publicado sus propios estándares, incluso firmas individuales también han promovido aleaciones para sus propios usos. En Norteamérica, el sistema más comúnmente utilizado es el creado por la Aluminum Association (AA).

En la Figura 2.2, se clasifican las aleaciones en envejecibles y no envejecibles, según sus aleantes, [6].

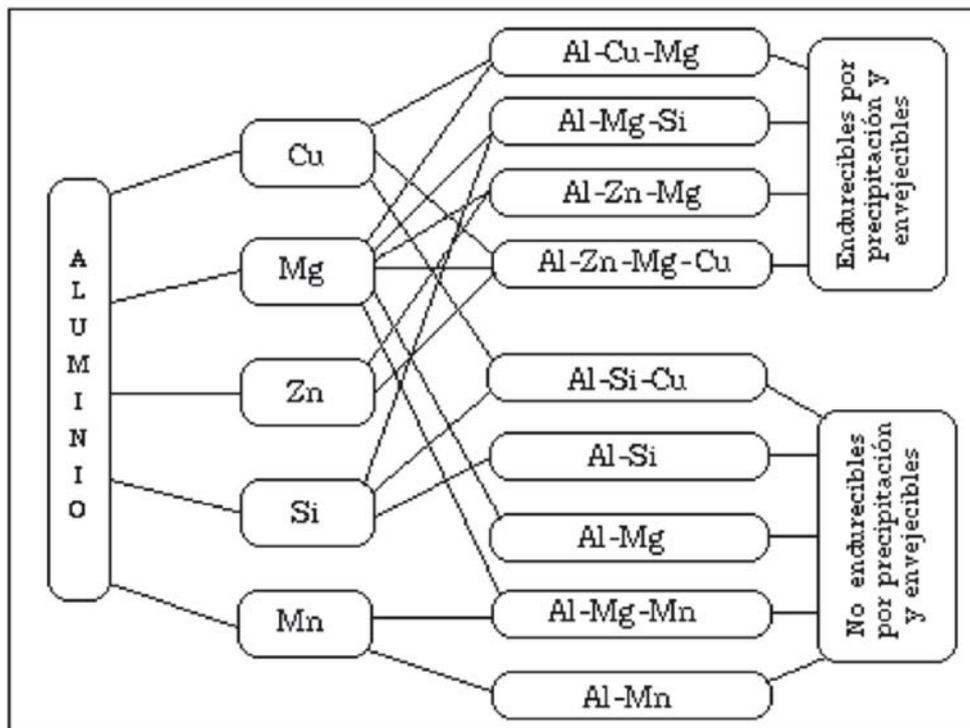


Figura 2.2. Diagrama de la composición de las aleaciones de aluminio [6]

La clasificación del aluminio y sus aleaciones se divide en dos grandes grupos bien diferenciados, estos dos grupos son: forja y fundición. Esta división se debe a



los diferentes procesos de conformado que puede sufrir el aluminio y sus aleaciones. [16]

Dentro del grupo de aleaciones de aluminio forjado encontramos otra división clara, que es la del grupo de las tratables térmicamente y las no tratables térmicamente. Las no tratables térmicamente solo pueden ser trabajadas en frío con el fin de aumentar su resistencia.

Conviene señalar que, dentro de las aleaciones para forja, los grupos principales de las no tratables térmicamente son : 1xxx, 3xxx y 5xxx. Dentro de las tratables térmicamente los grupos principales son : 2xxx, 6xxx y 7xxx. [16]

### **2.2.2. Características y aplicaciones de las aleaciones de aluminio 6063.**

Entre las características más importantes de la aleación de aluminio 6063 puede citarse su gran formabilidad, ya que permite velocidades de extrusión de 40-60 m/min, una excelente resistencia a la corrosión bajo tensión, tanto en atmósfera industriales como en ambientes químicos. Posee buena soldabilidad ya sea por arco (Mig – Tig), gas o brazing y características intermedias de resistencia mecánica y maquinabilidad para trabajo en frío, lo que brinda un extenso campo de aplicación en todos los usos estructurales, [11].

Las aleaciones de Al-Mg-Si serie 6000 según designación de la Aluminum Association, constituye el grupo más importante destinado a la extrusión de tubos, barras, cables y perfiles abiertos de variadas formas. En la actualidad, la aleación de aluminio 6063 constituye uno de los grupos más importantes destinada a la industria extrusora de aluminio. A nivel mundial el 80% de las aleaciones empleadas en el sector de la extrucción pertenecen a la serie 6000, siendo la aleación de aluminio 6063 una de las más destacadas por su gran volumen de producción, dado a los beneficios que ésta posee.



---

La aleación de aluminio 6063 la podemos conseguir en:

- Secciones arquitectónicas y decorativas: Perfiles, ventanas, escaleras y rejas.
- Conductores eléctricos, postes de luz y torres estructurales.
- En la industria del transporte: Estructuras de remolques, barras de autobuses, chasis de motos y parachoques.
- Usos domésticos: Envases, muebles y sillas.

### 2.2.3. Fatiga en las aleaciones de aluminio

La fatiga es un proceso de deterioro progresivo que ocurre en los materiales o componentes sometidos a cargas cíclicas (esfuerzos y deformaciones fluctuantes) que pueden resultar en grietas o fracturas después de un número suficiente de fluctuaciones. El agrietamiento de fatiga normalmente resulta de esfuerzos cíclicos que están muy por debajo de la resistencia a la fluencia estática del material. Sin embargo, en fatiga de bajo ciclaje o si el material tiene una apreciable velocidad de endurecimiento por deformación, los esfuerzos pueden estar también por encima de la resistencia de fluencia estática del material, [3].

El agrietamiento es un problema que afecta a cualquier componente o parte que esté en movimiento. Los automóviles en marcha, aeroplanos (principalmente las alas) en el aire, los barcos en alta mar que están sometidos constantemente al oleaje, reactores nucleares y turbinas bajo condiciones de temperatura variable (por ejemplo, en esfuerzos cíclicos térmicos) y muchos otros ejemplos, son situaciones en donde el comportamiento a la fatiga de un material asume una singular importancia.

Es bien sabido que la fatiga es la responsable de alrededor del 90% de todas las fallas que se generan en elementos de máquinas y estructuras en servicio. Ella



ocurre sin dar indicio previo de alguna deformación visible y las grietas permanecen indetectables, por lo que la predicción del comportamiento a la fatiga no puede ser considerado como un estudio opcional.

Los ensayos a fatiga proveen datos que pueden ser empleados para desarrollar criterios en la prevención de fallas por fatiga en diseños de ingeniería.

#### **2.2.4. Etapas del proceso de fatiga**

Las fracturas por fatiga son causadas por la acción simultánea de esfuerzo cíclico, esfuerzo de tensión y deformación plástica. Si alguno de estos tres no está presente, el agrietamiento por fatiga no se iniciará y propagará, [3].

El proceso consta de las siguientes etapas:

- Daño inicial de la fatiga llevando a la nucleación de la grieta.
- Crecimiento progresivo de una grieta (propagación de la grieta), durante la cual la grieta avanza de forma gradual en cada ciclo de carga.
- Rotura final, la cual ocurre rápidamente una vez que la grieta ha alcanzado un tamaño crítico.

El inicio y propagación de grietas de fatiga está en regiones donde hay mayor deformación acumulada y la mayoría de los materiales de ingeniería contienen defectos que actúan como regiones de concentración de esfuerzos que intensifican la deformación. La mayoría de las grietas por fatiga se inician y crecen a partir de defectos estructurales.

Bajo acción de la carga cíclica, una zona plástica (región de deformación) se desarrolla en la punta del defecto. Esta zona de alta deformación se convierte en



un sitio de inicio para una grieta a fatiga. La grieta se propaga bajo el esfuerzo aplicado a través del material hasta que resulta la fractura completa.

A escala microscópica la característica más importante de un proceso de fatiga es la nucleación de una o más grietas bajo la influencia de esfuerzos que exceden el esfuerzo de fluencia, seguido por el desarrollo de grietas en bandas de deslizamiento persistente o en los límites de grano, [3].

Durante la vida a fatiga de una misma muestra, varias grietas pueden ser iniciales, es decir, puede no existir una propagación de la misma. Patton-Rinaldy 1984, observaron en una aleación de aluminio 7010 que el mínimo de grietas que crecen durante la fatiga, es mayor cuando el máximo esfuerzo aplicado es mayor. De hecho, al mayor esfuerzo aplicado, son más numerosos los sitios de nucleación de grietas potenciales. Por consiguiente, para muy grandes esfuerzos aplicados,  $\sigma$  ( $\geq$  esfuerzo de fluencia estático), la ruptura final ocurrirá a través de estas grietas que crecen y que han sido nucleadas independientemente. Para esfuerzos intermedios o bajos una sola grieta crecerá hasta alcanzar el tamaño crítico.

### **2.2.5. Manifestación y proceso de la falla**

Un material sometido a tensiones repetidas o fluctuantes fallará a una tensión mucho más baja que la necesaria para producir la fractura bajo carga constante. Es decir, la aplicación repetida de una tensión ocasiona el deterioro progresivo de un material, siendo que la misma tensión aplicada estáticamente no tiene ningún efecto permanente. Este deterioro se manifiesta a través de la formación de fisuras en el material, que eventualmente pueden llevar a la rotura. Cabe recalcar que la fatiga ocurre bajo toda clase de cargas y a tensiones tanto altas como bajas; pero este fenómeno solo afecta a las piezas cuando están sometidas a sollicitaciones repetidas de una cierta amplitud, [4].

Su progreso puede explicarse de la siguiente manera: a los pocos ciclos de acción de la carga repetida comienzan a producirse cambios aislados en la

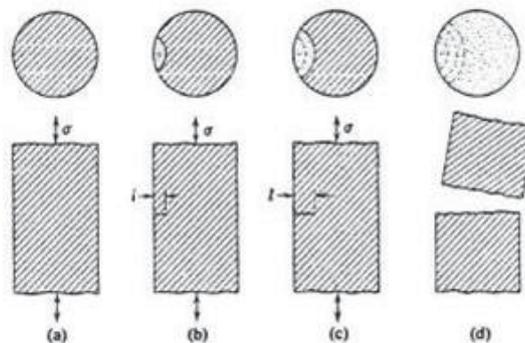


estructura atómica en puntos dispersos del material; estos rápidamente comienzan a desarrollar fisuras submicroscópicas que crecen a media que los ciclos continúan, hasta tener proporciones microscópicas y eventualmente llegan a ser visibles; finalmente, cuando la fisura llega a un tamaño tal que debilita la pieza, se produce su rotura. Si bien no existe un cambio notable en la estructura del metal que falló por fatiga, en general, se puede dividir el proceso de evolución de la falla en tres etapas denominadas: nucleación, propagación o crecimiento de la fisura y rotura, [4].

**1) Nucleación:** se produce en los metales cuando el nivel de tensión aplicada es menor que el límite elástico estático. Aparece una deformación masiva generalizada, hasta que el metal endurece lo suficiente como para resistir la tensión aplicada (Acritud Total) en un punto determinado denominado Punto de Iniciación, que suele estar situado en zonas de concentración de tensiones como ser entallas, cantos vivos, rayas superficiales o bien en inclusiones y poros, [4].

**2) Propagación:** abarca la mayor parte de la duración del proceso fatiga y se extiende desde el momento en que se produjo el endurecimiento por deformación generalizada (acritud total) hasta la formación de una grieta visible, [4].

**3) Rotura:** es la propagación de la grieta hasta que es lo suficientemente grande como para producir la rotura, [4].



**Figura 2.3.** Evolución de la falla. [4]



La superficie de la fractura tiene dos zonas características:

**a) Zona Lisa:** aparece debido al roce por la propagación de la grieta a través de la sección. Esta propagación se indica con una serie de marcas anulares (llamadas líneas de parada o de reposo, similares a las marcas que dejan las olas sobre la playa), que se generan a partir del Punto de Nucleación (punto de concentración de tensiones). A su vez, podemos distinguir:

-**Marcas de Playa:** se forman en el frente de la fisura al producirse un reposo en el funcionamiento de la pieza. Consecuentemente no aparecerán en el caso de probetas, que generalmente se ensayan sin interrupción, [4].

-**Líneas Radiales:** a veces las fisuras que se generan en la superficie (que es el lugar más frecuente) progresan según niveles levemente escalonados; en un momento dado de su desarrollo, sin embargo, quedan estas líneas radiales como huellas de las diferencias de nivel iniciales, [4].

**b) Zona Rugosa:** Aparece al romper la pieza por disminución de la sección efectiva ante el mismo valor de carga actuante. La rotura final, contrariamente a la zona con marcas de playa que es lisa y suave, presenta una superficie fibrosa y de relieve muy accidentado. Se trata de la zona de remanente sano, demasiado pequeño para aguantar un ciclo más y termina rompiéndose frágilmente, [4].

#### 2.2.6. Análisis del origen de las fallas por fatiga

La mayoría de las fisuras de fatiga comienzan en discontinuidades visibles, que actúan como multiplicadores de tensiones, como ser: orificios, empalmes, chaveteros y discontinuidades microscópicas tales como inclusiones, rechupes, defectos de fabricación, etc, [4].



**1) Nucleación:** Las fisuras se originan debido al endurecimiento producido en las regiones donde ha habido fluencia. Sabemos que en metales policristalinos sometidos a tensión simple, algunos cristales siempre estarán orientados de tal forma que deslizarán fácilmente (ver Figura 2.4). La nucleación se produce a partir de esta fluencia altamente localizada, [4].

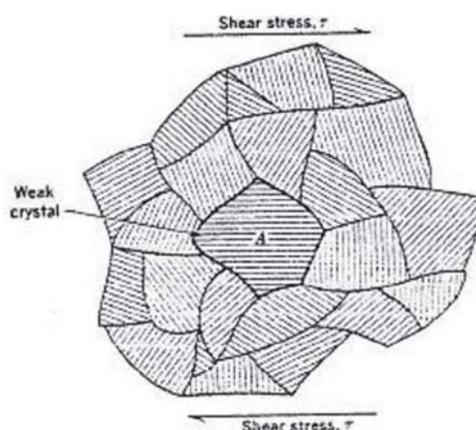


Figura 2.4. Nucleación. [4]

A medida que la tensión (o carga) aumenta, estos cristales "débiles" fluirán primero, pero como están rodeados por material elástico, no afectan apreciablemente el diagrama de tensión deformación estático. No obstante ha habido fluencia, y a una tensión nominal que generalmente no sobrepasa el límite elástico. Si el material se carga solo una vez, este efecto es completamente insignificante. Pero si la carga se repite, cada repetición produce una fluencia localizada adicional que eventualmente resulta en la formación de fisuras de fatiga en las regiones en fluencia, [4].

En resumen, el primer efecto de la fatiga en metales es la formación de bandas de deslizamiento altamente localizado en cristales individuales durante los primeros pocos ciclos. A medida que continúan los ciclos, se forman nuevas bandas de deslizamiento, por lo que la deformación permanece altamente localizada. Como los grupos de las bandas de deslizamiento crecen formando estrías, el material entre ellas pasa a ser progresivamente más duro a causa de la



acumulación de endurecimiento por deformación. En algún punto del proceso el material en las estrías llega a ser tan duro que se fisura (en escala submicroscópica). El momento exacto cuando esto sucede es aún desconocido pues la primera evidencia real de la grieta es la aparición de fisuras microscópicas. Sin embargo, se sabe que sucede dentro de los primeros ciclos de carga. Las fisuras submicroscópicas comienzan a formarse en las mismas direcciones que las bandas de deslizamiento. Las grietas individuales crecen, y los grupos de fisuras se unen hasta que el total alcanza un tamaño microscópico, [4].

**2) Propagación:** Las primeras fisuras microscópicas aparecen en las bandas de deslizamiento, en cristales desfavorablemente orientados cuya orientación es tal que las bandas de deslizamiento coinciden con los planos de corte máximos. Las fisuras microscópicas crecen en estos planos que incluyen todos los planos a  $45^\circ$  al eje de la pieza. Las fisuras comúnmente se originan en más de uno de estos planos. La intersección y unión de varias de estas fisuras produce una fisura en zigzag, cuya dirección es a ángulos rectos al eje de la pieza. A medida que cada fisura crece es precedida por un proceso de nucleación parecido al que la originó. El deslizamiento localizado tiene lugar a causa de la concentración de tensiones en el borde de la fisura, y las fisuras submicroscópicas se desarrollan en las bandas de deslizamiento, ocasionando una extensión gradual de la fisura. Cuando el área de la sección transversal remanente llega a ser lo suficientemente pequeña, ocurre la fractura final. La falla resulta así de naturaleza frágil, [4].

Si las piezas están sometidas a tensiones máximas altas, puede tener lugar la fluencia completa de la pieza. Aquí el endurecimiento por deformación es general en vez de localizado. Aún así, la inhomogeneidad natural del material, más cualquier concentrador de tensiones que pueda estar presente, produce diferencias localizadas en el endurecimiento por deformación. El resultado final es casi igual que a tensiones bajas: las fisuras se nuclean en puntos aislados y se propagan a través de la pieza. Al estar involucrada la fluencia generalizada, el mecanismo no es tan altamente localizado como en la fatiga simple. Además, la repetición de



deformación plástica en la pieza ocasiona que grandes cantidades de energía sean disipadas en forma del calor y se pueden producir efectos térmicos. Estos efectos son especialmente importantes en plásticos y goma. La fractura final es similar a la fractura bajo tensiones estáticas, aunque quedan evidencias de la reducción de ductilidad.

### 2.2.7. Cargas que originan fatiga

El tipo más simple de carga repetida es una tensión alternada (las tensiones de flexión en un eje rotativo varían de esta manera). La amplitud de tensión es igual a la tensión máxima, y la tensión media o promedio es cero.

Una pieza que es deformada alternativamente sobre cada lado de su configuración de equilibrio, está también sujeta a tensión simple alternada. Si la pieza lleva además una carga constante (como el peso de una máquina), la tensión alternada se superpone a una tensión constante que resulta de la carga constante. La tensión media no es más cero, es igual al valor de la tensión constante; la tensión máxima es igual al valor de la suma de la tensión media y la amplitud de tensión, [4].

### 2.2.8. Características fractográficas

La superficie de fractura que resulta de una falla por fatiga tiene una apariencia característica que puede ser dividida en tres zonas o etapas progresivas:

#### **Etapas I:**

Es la iniciación de las grietas y su propagación por el plano de deslizamiento de la fractura extendiéndose desde la superficie hacia el centro a aproximadamente 45° del esfuerzo axial. En esta etapa la grieta no se extiende por más de dos a 5 granos alrededor del origen. En cada grano, la superficie de la fractura está a lo largo de un plano cristalográfico bien definido. Usualmente no existen



---

estriaciones de fatiga asociados con la superficie de fractura en una etapa. En algunos casos, dependiendo del material, el ambiente y nivel de esfuerzo, la fractura de la etapa I puede que no sea perceptible, [8].

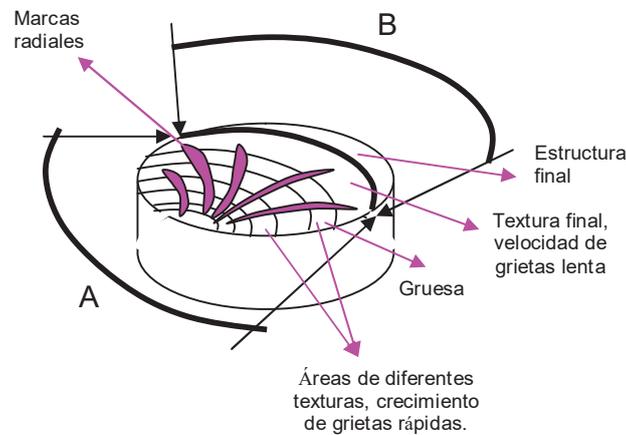
### **Etapa II:**

El crecimiento de la grieta no está gobernado por el esfuerzo cizallante local sino por el esfuerzo normal máximo principal en la vecindad de la punta de la grieta. Así, la punta de la grieta es obligada a desviarse desde su camino de deslizamiento y propagarse en una dirección perpendicular a la dirección del máximo esfuerzo normal.

La superficie de fractura durante el crecimiento de la etapa II, está caracterizado por estriaciones y marcas de playa que pueden ser relacionadas, en su densidad y ancho, con el nivel de esfuerzo aplicado. La superficie de fractura producida durante el crecimiento en la etapa II es relativamente lisa, [9].

### **Etapa III:**

Ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no puede soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es el resultado de una sobrecarga, puede ser frágil, dúctil, o una combinación de ambas.



**Figura 2.5** Características de la superficie de falla típica de un metal dúctil sometido a cargas cíclicas alternantes.

La característica más resaltante que generalmente se haya en las superficies de fractura por fatiga son las marcas de playa, las cuales están centradas alrededor de un punto en común que corresponde al origen de la grieta de fatiga. Estas marcas resultan de cambios en la carga o la frecuencia o por la oxidación de la superficie de la fractura durante períodos de arresto de la grieta de la pieza o componente, bajo un servicio intermitente.

La ausencia de estas marcas no quiere decir que un componente no haya fallado por fatiga, pero se puede tener la seguridad cuando aparecen en un componente fracturado, [4].

La zona final de una superficie de fractura por fatiga es frecuentemente fibrosa, pareciéndose a la superficie de la fractura de probetas en un ensayo de impacto o de tenacidad de fractura del mismo material.

El tamaño y la forma de la zona de fractura dependen de la magnitud, dirección y modo de carga. Los rasgos más prominentes hallados en las superficies de fractura por fatiga vistos por microscopía electrónica, son trozos de marcas paralelas finamente espaciadas, llamadas estriaciones por fatiga. Las estriaciones



de fatiga están orientadas perpendicularmente a la dirección microscópica de propagación de la grieta y con una carga uniforme, generalmente se incrementan el espaciamiento cuando éstas progresan desde el origen de fatiga.

Cada estriación es el resultado de un único ciclo de fatiga, pero cada esfuerzo cíclico no produce necesariamente una estriación; el espaciamiento de la estriación depende significativamente del nivel de carga aplicado. La definición de las estriaciones en fatiga depende entre otras cosas de la ductilidad del material. La estriaciones formadas en aleaciones de aluminio a velocidades muy bajas el crecimiento de grietas (menores de  $1.3 \cdot 10^{-4}$  mm por ciclo) son difíciles de resolver y frecuentemente no pueden ser distinguidas de la red de líneas de deslizamiento y bandas de deslizamiento asociadas con la deformación plástica en y cerca del frente de grieta cuando ésta se propaga a través de la sección, [4].

### **2.2.9. Comportamiento del aluminio frente a la corrosión**

El aluminio es un metal interesante desde el punto de vista de sus propiedades de resistencia a la corrosión. En aire, forma una película de alúmina que lo protege de una oxidación más importante. Esta capa se forma muy rápidamente. Es un ejemplo de la importancia que tiene la cinética de reacción en la evaluación del comportamiento de un metal, puesto que el aluminio tiene gran tendencia termodinámica a corroerse (tiene un potencial muy negativo con respecto al hidrogeno), pero su capa de óxidos entorpece la reacción hasta que parezca detenida. [9]

La existencia de esta capa pasiva está sujeta a limitaciones. En presencia de ciertos atacantes, la capa pasiva se perfora, dando lugar a la corrosión localizada. Este tipo de corrosión es mucho más perjudicial que la corrosión generalizada porque, por su naturaleza no uniforme, impide hacer previsiones en cuanto al tiempo de vida de la pieza. Los medios que contienen iones  $Cl^-$  son particularmente dañinos, pero el aluminio también está sujeto a la corrosión atmosférica, corrosión intergranular, fragilización por hidrógeno, corrosión por



exfoliación, corrosión filiforme, a formas complejas de corrosión de conductos enterrados aunque tenga buen comportamiento en agua pura, lo que no es el caso en ambientes salinos.

El producto inicial de la corrosión del aluminio en un ambiente acuoso es hidróxido de aluminio, el cual dará lugar a la formación de un óxido hidratado o una mezcla de óxidos. El comportamiento frente a la corrosión del aluminio es sensible a pequeñas cantidades de impurezas en el metal, muchas de las cuales, a excepción del magnesio tienden a ser catódicas con relación al aluminio. En general, el metal de alta pureza es mucho más resistente a la corrosión que el metal de pureza comercial que, a su vez, es más resistente que las aleaciones de aluminio. [9]

El aluminio se corroe con mayor rapidez en medios ácidos o en álcalis que en medio neutro. La velocidad de corrosión en medios ácidos depende de la naturaleza del anión. En general, el aluminio resiste bien a la corrosión en los siguientes medios:  $\text{NH}_4\text{OH}$ , ácido acético y muchos ácidos orgánicos, ácidos grasos, ácido nítrico  $> 80\%$ , agua destilada, atmósfera no marina, azufre y atmósferas sulfurosas y gases refrigerantes sulfurados. Por el contrario, la resistencia a la corrosión del aluminio es baja en: ácidos fuertes (tales como  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HBr}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{HF}$ ), álcalis, mercurio y sus sales, agua de mar, aguas con iones de metales pesados, disolventes clorados y alcoholes a temperaturas elevadas.

Los factores ambientales tales como la temperatura o la turbulencia de la disolución pueden provocar un profundo efecto en la resistencia a la corrosión. En general, las aleaciones de aluminio presentan comportamientos similares a los descritos para el aluminio, aunque la resistencia a la corrosión suele ser algo menor. La composición, volumen, localización y potencial de los microconstituyentes, tienen también, una influencia directa en la cantidad, forma y distribución del ataque por corrosión.



La resistencia a la corrosión es una consideración relativa, porque el ambiente afecta, perceptiblemente, la naturaleza del ataque. El aluminio y sus aleaciones tienen generalmente una excelente resistencia a la corrosión en muchos medios ambientes. [9]

En la Figura 2.6 se representa la resistencia a la corrosión de la aleación de aluminio 1100 en ácido nítrico.

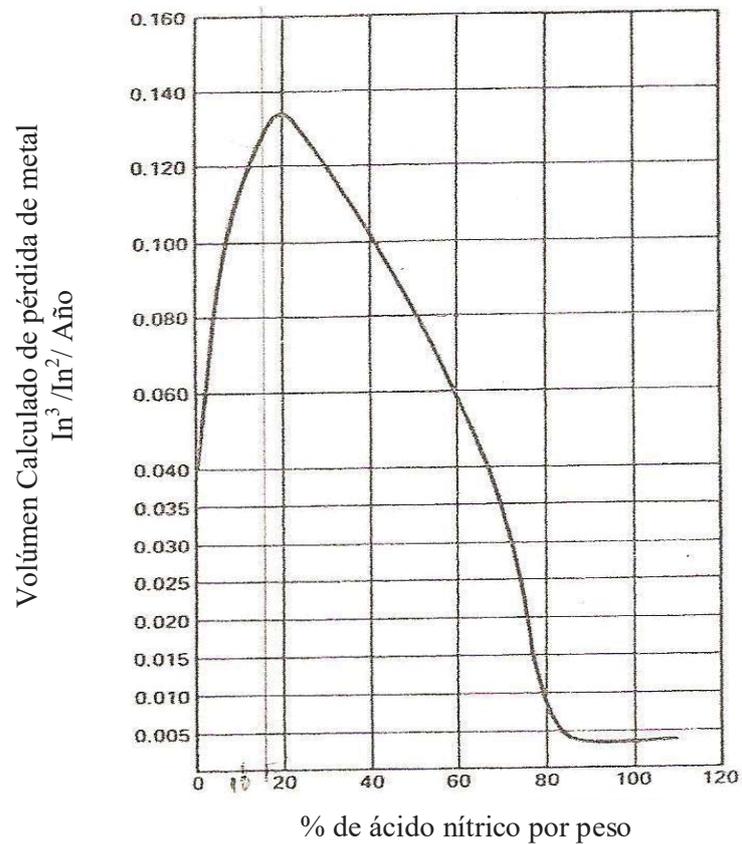
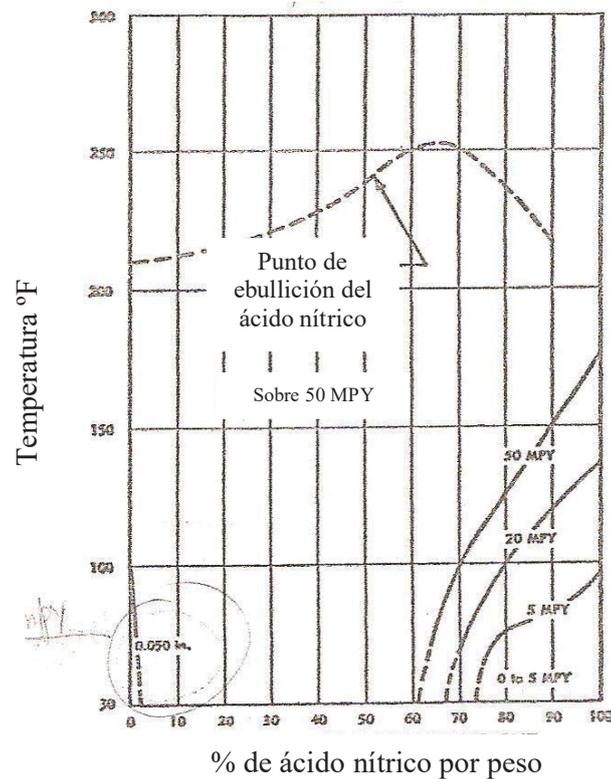


Figura 2.6 Resistencia de la aleación de aluminio 1100 en ácido nítrico. [9]

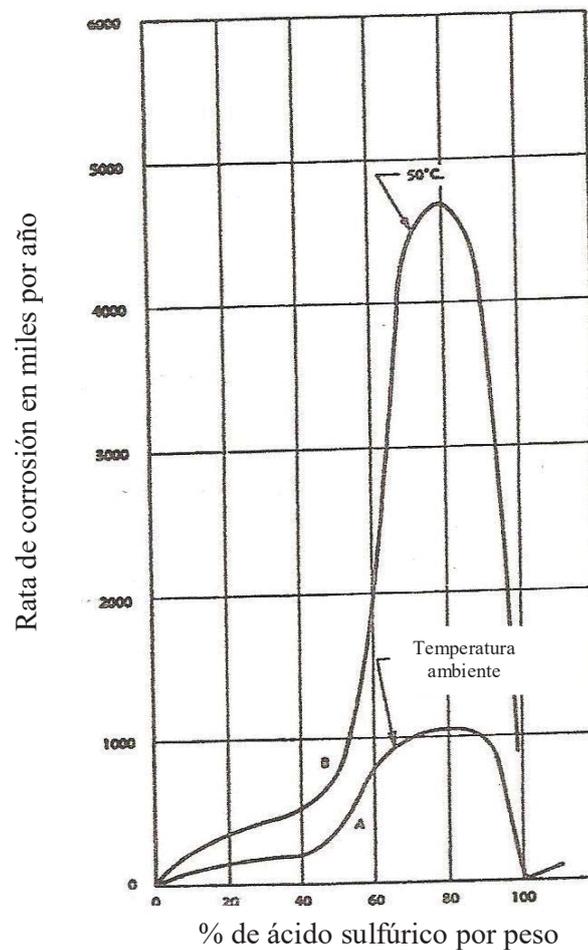


En la Figura 2.7 se representa la curva de la tasa de corrosión de la aleación de aluminio 1100 en ácido nítrico, demostrando la influencia de concentración y temperatura.



**Figura 2.7** Rata de corrosión de la aleación de aluminio 1100 en ácido nítrico, demostrando la influencia de concentración y temperatura. [9]

En la Figura 2.8 se muestra el efecto de la concentración y temperatura en la resistencia de la aleación de aluminio 1100 en ácido sulfúrico.



**Figura 2.8.** Efecto de la concentración y la temperatura en la resistencia de la aleación de aluminio 1100 en ácido sulfúrico. [9]

### 2.2.10. Fatiga con corrosión

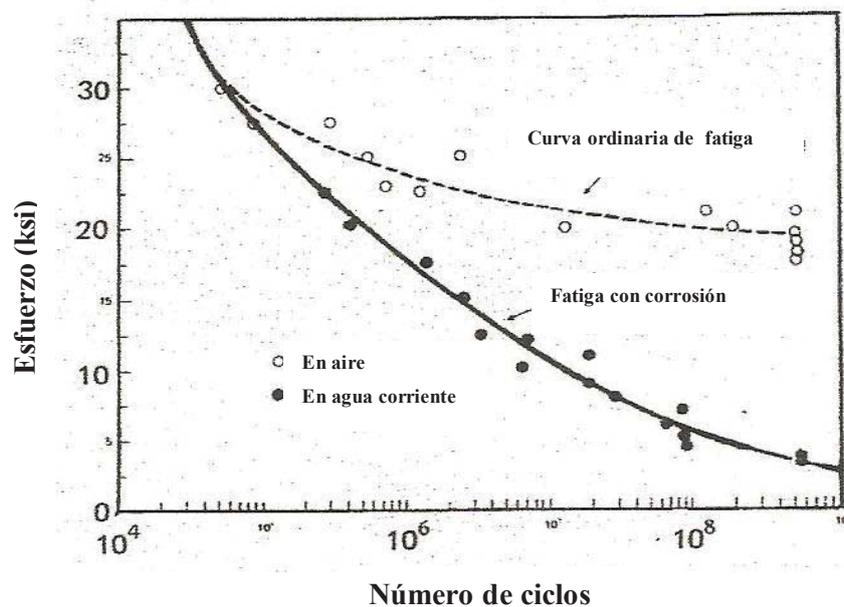
La fatiga es la falla de un metal agrietándose cuando es sometido a tensiones cíclicas. Hay generalmente un nivel de tensión debajo del cual ninguna falla ocurrirá, incluso con un número infinito de ciclos. Este punto es el llamado el límite de resistencia. [7]

Cuando un metal es sometido a tensión cíclica en un ambiente corrosivo, el número de ciclos requeridos para causar falla será reducido considerablemente.



Esta aceleración se debe a lo que se llama “fatiga por corrosión”. En una curva del Esfuerzo vs. Número de ciclos (S-N), de la fatiga por corrosión, se puede también dibujar la curva de fatiga obtenida para el mismo metal en aire. En ambos casos la frecuencia es un factor que influye en el límite de resistencia.

En la Figura 2.9 se muestra la curva S-N para ambos casos, donde el metal es sometido a fatiga en aire y fatiga con corrosión. [7]



**Figura 2.9.** Curva de esfuerzo vs número de ciclos para aleaciones de aluminio con fatiga en aire y fatiga con corrosión. [7]

Una reducción marcada del límite de resistencia puede ocurrir incluso en un ambiente suavemente corrosivo, especialmente en el caso de una aleación que contenga una película protectora. Esto es porque el esfuerzo aplicado causa tensiones repetidas en la superficie protectora.

La fatiga con corrosión ocurre en metales como resultado de la acción combinada de una tensión cíclica y de un ambiente corrosivo. La fatiga con



corrosión es dependiente en las interacciones entre la carga, el ambiente, y los factores metalúrgicos. Para un material dado, la resistencia de fatiga (o la vida de fatiga en un valor máximo dado de la tensión) disminuye generalmente en presencia de un ambiente agresivo. El efecto varía extensamente. Depende sobre todo de la combinación particular del metal-ambiente. El ambiente puede afectar a la probabilidad de la iniciación de la grieta de fatiga, de la tasa de crecimiento de la grieta de fatiga, o de ambas. [5]

La Figura 2.10 demuestra un ejemplo de falla de fatiga con corrosión en una aleación de Ti-6Al-4V.



**Figura 2.10.** Fatiga con corrosión de una aleación de Ti-6Al-4V en aire ambiente. Las estrías intergranulares son evidentes en la superficie de la fractura. [5]

### 2.2.11. Iniciación de la grieta en fatiga con corrosión

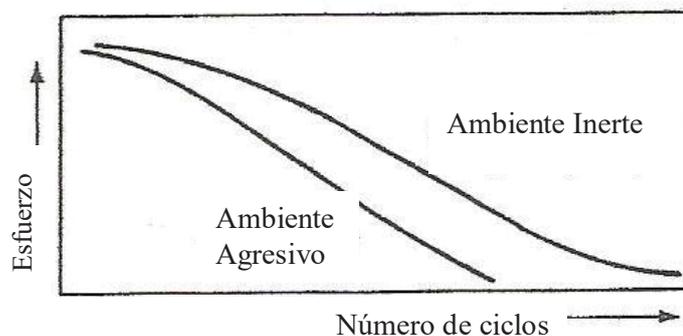
La influencia de un ambiente agresivo en la iniciación de la grieta de fatiga de un material se ilustra en la Figura 2.11 que compara las curvas de esfuerzo-número de ciclos (S-N) obtenidas de ambientes inertes y agresivos. [5]



Las grietas por fatiga con corrosión se inician siempre en la superficie, a menos que haya defectos próximos a la superficie que actúan como sitios de concentración de tensión y facilitan la iniciación de la grieta. Las características superficiales en los orígenes de la grieta de fatiga de corrosión varían con la aleación y con condiciones ambientales específicas. En aceros al carbono, las grietas se originan a menudo en forma de hoyos hemisféricos por causa de la corrosión.

Las grietas son a menudo transgranulares y pueden exhibir una pequeña cantidad de ramificación. Las picaduras superficiales no son un requisito previo para agrietarse en fatiga con corrosión de aceros de carbono, ni es la trayectoria transgranular de la fractura; las grietas de fatiga con corrosión ocurren en la ausencia de hoyos y siguen en su mayoría los límites de grano.

En la Figura 2.11 se muestra la comparación de esfuerzo-número de ciclos de un material en medio inerte y un medio agresivo (corrosivo). [5]



**Figura 2.11.** Comparación de esfuerzo-número de ciclos de un material en medio inerte y un medio agresivo (corrosivo) [5]

En las aleaciones de aluminio expuestas a las soluciones acuosas de cloruro, las grietas de la fatiga con corrosión se originan con frecuencia en los sitios de las picaduras o de la corrosión intergranular. La propagación de grieta inicial es normal al eje de la tensión principal. Esto es contrario al comportamiento de la



grieta de fatiga iniciado en el aire seco, donde el crecimiento inicial sigue los planos cristalográficos. También ocurre en las aleaciones de aluminio expuestas al aire húmedo, donde la grieta inicial de fatiga con corrosión es normal al eje de la tensión principal, pero las picaduras no son un requisito para la iniciación de la grieta.

Las grietas de fatiga con corrosión en las aleaciones de cobre se inician y propagan intergranularmente. Los ambientes corrosivos tienen poco efecto adicional sobre la vida de fatiga del cobre puro, aunque cambien la trayectoria de la grieta de fatiga de transgranular a intergranular. Las aleaciones del Cobre-Cinc y del Cobre-Aluminio, sin embargo, exhiben una reducción marcada en resistencia de la fatiga, particularmente en soluciones acuosas de cloruro.

Los efectos ambientales se pueden identificar generalmente por la presencia de daños debido a la corrosión o de productos de corrosión sobre superficies de la fractura o dentro de la grieta creciente. El producto de corrosión, sin embargo, puede siempre no estar presente. Por ejemplo, la grieta de fatiga con corrosión del acero de alta resistencia expuesto a un gas hidrógeno, tal como vapor de agua, puede ser difícil de distinguir de algunas formas del daño por el hidrógeno. [5]

### **2.2.12. Propagación de la grieta en fatiga con corrosión**

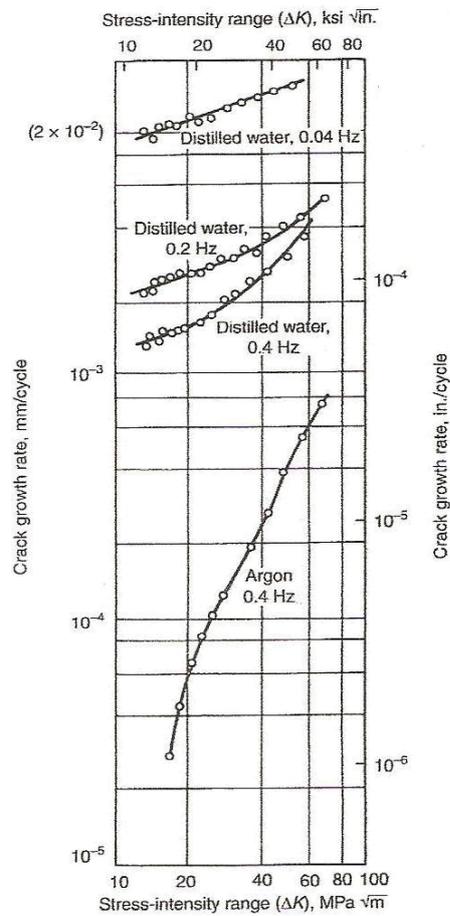
Aunque los fenómenos de fatiga con corrosión son diversos, algunas variables influyen en el crecimiento de la grieta, tales como:

- Rango de esfuerzo-intensidad
- Frecuencia de la carga
- Cociente del esfuerzo
- Ambiente acuoso
- Ambiente



- Variables metalúrgicas

En la Figura 2.12 se muestra el rango del efecto de esfuerzo-intensidad con la velocidad del crecimiento de la grieta en fatiga con corrosión en el acero expuesto al agua destilada a 23 °C (73 °F).



**Figura 2.12.** Efecto del esfuerzo-intensidad vs velocidad de crecimiento de la grieta en fatiga con corrosión en el acero 4340 expuesto en agua destilada a 23 °C. [5]



---

### **2.2.13. Corrosión atmosférica**

En la mayoría de los casos la corrosión atmosférica se manifiesta por picaduras anchas pero poco profundas. Los parámetros más representativos son los cambios en resistencia a tracción y la profundidad de las picaduras.

La velocidad de corrosión decrece con el tiempo. Se ha comprobado así que velocidades del 0,1 mm/año podían pasar al 0,003mm/año, [2].

### **2.2.14. Corrosión filiforme**

Afecta a aleaciones cubiertas de una capa fina de material protector orgánico. Tiene la apariencia de una serpiente, saliendo de un defecto en la capa protectora. Consiste en una reacción de corrosión por aireación diferencial que se desarrolla debajo de la capa protectora.

El aumento volumétrico provocado por la ionización del metal base provoca el levantamiento y agrietamiento de la capa protectora. Los productos de corrosión viajan de la cabeza, donde tiene lugar el proceso de ataque, a la cola, punto de partida de la serpiente, hidratándose progresivamente.

### **2.2.15. Corrosión intergranular**

Es de gran importancia en aleaciones fuertemente aleados donde se asocia a corrosión bajo tensión. Se caracteriza mediante ensayos estandarizados, como el ASTM G67. El aluminio 6063 no es muy sensible a este tipo de corrosión.



### 2.2.16. Fragilización por hidrógeno

La exposición de aluminio a medios que contienen hidrógeno en medio húmedo conduce a fragilización y rotura. La mayoría de los casos estudiados son relativos a aleaciones del grupo 7xxx.

En la Figura 2.13 se representan tipos frecuentes de corrosión.

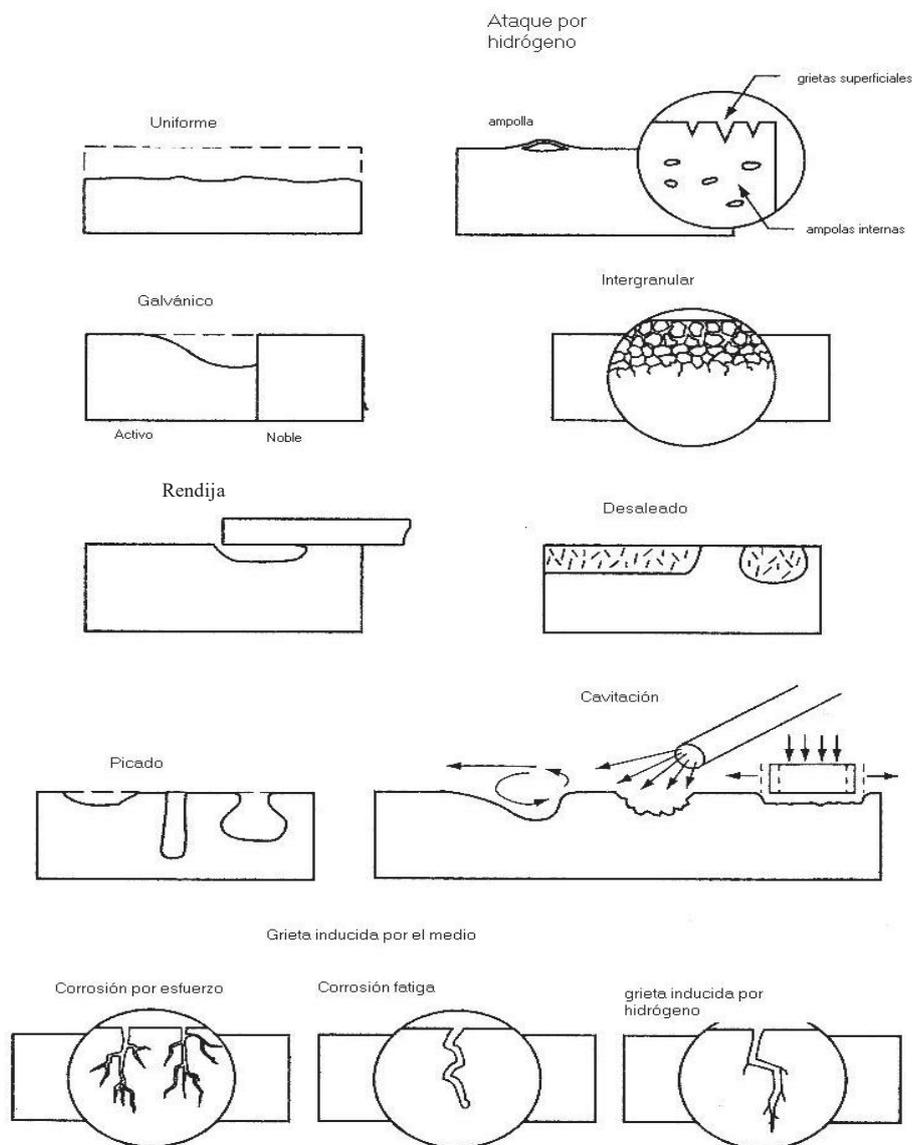


Figura 2.13. Tipos de Corrosión. [11]



### **2.2.17. Corrosión por exfoliación**

Consiste en delaminación de capas sin corroer por corrosión de una capa subyacente. Ocurre principalmente en productos con una destacada anisotropía. El ejemplo clásico consiste en las aleaciones MMC con fibras de grafito. Las aleaciones más susceptibles son las 2xxx, 7xxx y 5xxx, aunque las 6xxx con refuerzos de fibras continuas también presentan este problema. El ensayo ASM G85 describe ensayos de niebla salina ácida que permiten discriminar varias aleaciones frente a este tipo de corrosión.

### **2.2.18. Conductos enterrados**

El aluminio es utilizado como material de fabricación de tubos y conductos. Debido a la gran variabilidad de las propiedades de los suelos en cuanto a pH, conductividad, composición, humedad o microorganismos, las formas de corrosión son también muy variadas. Sin embargo, se ha determinado que la presencia de capas protectoras (pinturas) aislantes y protección catódica mejoran sensiblemente la resistencia del aluminio.

### **2.2.19. Corrosión en aguas salinas**

Como consecuencia de la desestabilización de la capa protectora de alúmina por los iones  $Cl^-$  presentes en agua de mar, este es un medio muy agresivo para las aleaciones de aluminio.

Las que mejor resisten son las 5xxx y 3xxx. Las 6xxx presentan problemas de corrosión un poco más graves. Para las 5xxx, la velocidad de corrosión llega a ser del orden de 3 a 6 (mm por año). En todos los casos se trata de corrosión localizada, tipo picadura o rendijas. La velocidad tiende a aumentar cuando baja



---

la temperatura, el pH o la velocidad del flujo y cuando aumenta la cantidad de oxígeno disuelto.

### **2.2.20. Ensayos de corrosión**

La mayoría de los ensayos son hechos con un objetivo específico, estos pueden variar desde: Ensayos diseñados para enseñar los procedimientos que envuelve dicho ensayo, hasta el recargo de un ala de un avión en la orilla del mar para estudiar la susceptibilidad a la corrosión por esfuerzos. Los ensayos bien planeados y bien ejecutados generalmente resultan en reproducibles o confiables, representando estos los dos factores más importantes en los ensayos de corrosión.

Muchos ensayos son hechos para seleccionar materiales para equipos de construcción en los procesos industriales, y es muy importante para los ensayos, el poder reproducir las condiciones reales de las instalaciones en servicio tan cerca como sea posible. [15]

Para poner en evidencia los diferentes tipos de corrosión que existen, se dispone de diferentes métodos y formas específicas para cada caso. Así tenemos por ejemplo, que para efectuar ensayos en altas temperaturas y elevadas presiones se dispone de autoclaves, en el cual son colocadas aguas cloradas, luego la condensación de la tapa del autoclaves escurre sobre la muestra para dar lo que se llama “condiciones de fase vapor-condensación”. Esto constituye un excelente ensayo para la corrosión por esfuerzos, bien correlacionados con los problemas de servicio real y el cual es usado para la evaluación de los materiales. [15]

Para medir por ejemplo el efecto del “área” en la corrosión de dos metales, se usa un procedimiento simple y poco costoso, como es el de colocar en el medio corrosivo una lámina larga de latón, empernada con una tuerca de acero durante un tiempo programado. Esto se hizo para el estudio de tuberías de latón.



Para los ensayos de corrosión por erosión, se usa un tanque en cuyo interior existe un disco rotatorio sobre el cual se coloca la muestra, el fluido dentro del tanque está recirculando y es bombeado directamente a la superficie de la muestra. La o las muestras también pueden ser suspendidas dentro del tanque para luego hacer comparaciones entre la alta y la baja velocidad; este tanque es abierto y no puede ser usado para fluidos tóxicos o volátiles. También para evaluar la corrosión en partes estancadas, al igual que en los anteriores existen muchos métodos, pero uno de los más sencillos es:

Colocar sobre la muestra en posición horizontal pequeños montones de arena, lodo sedimentado, una pieza de asbesto u algún otro material, luego esta combinación es colocada en el medio corrosivo, también bajo un tiempo programado.

Para la corrosión intergranular, cualquier ensayo puede ser utilizado para determinar a esta, ya que las muestras deberán ser examinadas para detectar ataques localizados, picaduras o ataques intergranulares, sin embargo, existen varios ensayos clásicos para demostrar la susceptibilidad a la corrosión intergranular: El ensayo Huey, el Streicher y el Warren. El ensayo Huey se usa para aceros inoxidable y las muestras se exponen en ácido nítrico al 65% hirviendo, durante 5 períodos de 8 horas cada uno; los materiales mostraron mediante este ensayo altas velocidades de corrosión. El Streicher, consiste en pulir la muestra e introducirla en una solución de agua fuerte y ácido oxálico al 10% por un tiempo de 1.5 min bajo una densidad de corriente aplicada de  $1 \text{ amp/cm}^2$ , y luego examinar su superficie microscópicamente con aumento de 250X o 500X. Si se observa una estructura escalonada es signo de que el material ha sido debidamente tratado y si la estructura es en forma de sucos o zanjas indica susceptibilidad a la corrosión intergranular.

El ensayo Warren, es aplicado a los aceros inoxidable 316L los cuales poseen un problema especial con relación al uso del ensayo Huey. Cuando el tipo 316L es



sensibilizado por una hora a 790°C, puede formar una fase sigma, particularmente si está presente la ferrita en la estructura templada revenida, luego el material que contenga la fase sigma, muestra altas velocidades de corrosión con el ensayo Huey que en este caso falla, incluso aunque no esté presente la precipitación de carburo de cromo.

Este ensayo Warren consta de ácido fluorhídrico al 3% y ácido nítrico al 10%, a temperatura de 70 u 80°C, usándose 2 periodos de 2 horas o 5 periodos de media hora. Este medio ataca severamente a los materiales que precipitan carburos pero no con la fase sigma ya que esta fase no está considerada como perjudicial en lo que respecta a la corrosión en muchos medios.

Para la determinación de las picaduras, debido al carácter localizado, a la probabilidad y los largos tiempos de incubación que muchas veces se requieren, resultan difíciles de evaluar, las determinaciones de las pérdidas de peso son prácticamente inútiles.

Los ensayos de pérdida de resistencia tampoco son de ayuda, el mejor procedimiento entonces, es el de exponer las muestras tan grandes como sean posibles por un tiempo lo más largo posible que se pueda para el problema dado. Para reportar los resultados de las picaduras existen varios métodos que incluyen la máxima profundidad de la picadura número de picaduras por unidad de área, profundidad promedio y también un completo análisis estadístico.

Para los ensayos de corrosión debido a gases a temperaturas superiores a 265°C, se usa generalmente cámaras revestidas de cerámicas y colocadas estas cámaras dentro de los hornos, pero hay que tener en cuenta ciertos factores como son: mantener una zona uniforme de temperatura para el ensayo total de la muestra, lograr una mezcla completa de gases, hacer un precalentamiento previo del gas, evitar los escapes, etc. En este caso la muestra gana peso debido a la



---

costra de óxido formada y los resultados entonces son reportados como ganancia de peso.

En general, para los diferentes materiales como metales y aleaciones, existen variados métodos para su comportamiento frente a las diferentes formas de corrosión.

### 2.2.21. Clasificación de los ensayos de corrosión

Los ensayos de corrosión están clasificados de la forma siguiente:

**1.- Ensayos de laboratorio:** Incluyendo en estos los ensayos preparativos. Se caracterizan por pequeñas muestras y pequeños volúmenes de soluciones, y las condiciones reales son simuladas hasta donde sea convenientemente posible.

**2.- Ensayos de plantas piloto:** Son generalmente los más deseados, los ensayos son hechos en plantas a pequeña escala que esencialmente duplican la intensidad de la operación. En estos ensayos están envueltos en forma real la materia prima, concentraciones, temperaturas, velocidades y volúmenes de líquido por área de metal expuesta.

**3.- Ensayos de planta o de condiciones reales:** Ésta envuelve ensayos en un servicio particular o en una planta dada. Los servicios o ensayos de planta se hacen cuando es aprovechable el funcionamiento de la planta. Aquí lo importante es la mejor evaluación, o la selección de los materiales más económicos o el comportamiento dentro del estudio de corrosión de los materiales existentes, mientras que están cambiando las condiciones del proceso.

**4.- Ensayos de campo:** Esto envuelve una serie de ensayos de larga duración para obtener información más general. Como ejemplo tenemos la exposición



---

atmosférica de un gran número de muestras en soportes, en una o más localidades geográficas y ensayos similares en suelos o en agua de mar.

Tal vez la secuencia ideal y más lógica de ensayos planificados para la instalación de una nueva planta sería: Ensayos de laboratorio para determinar que materiales están definidos como no satisfactorios, ensayos en plantas pilotos de muestras y partes reales tales como, válvulas, bombas, tubos, intercambiadores de calor o secciones de conductos hechos de materiales que mostraron resultados dudosos durante los ensayos de laboratorio. Este procedimiento puede proveer una buena información y buenas bases para llevar a cabo una buena construcción de esta nueva planta, desafortunadamente, esta situación es la excepción y muy particularmente en los procesos industriales.

#### **2.2.22. Muestreo**

Para un ensayo de corrosión de un material, se requiere la composición química, la historia de fabricación, historia metalúrgica y la identificación positiva de las muestras detalladas de cada material. Se selecciona una cantidad sustancial de metal o aleaciones a ensayar, y las muestras necesarias son obtenidas de ésta. La casa fabricante deberá suministrar algunos datos deseables como son: número de colada, composición química y tratamientos térmicos, siendo deseable también un ensayo metalográfico para asegurar una estructura normal. Las muestras deben ser diferenciadas identificándolas con un número de referencia, esta identificación debe ser de tal manera que no sea borrada o destruida durante el ensayo. Las muestras deben ser lo más representativas posibles para asegurarse de exitosos resultados.



---

### 2.2.23. Preparación de la superficie

Idealmente la superficie de la muestra a ensayar debería ser idéntica a la superficie real que va a ser puesta en uso. Sin embargo esto es casi imposible debido a que las superficies de los metales y aleaciones comerciales varían según sean producidas o fabricadas. Se recomienda primero lavar la superficie a ensayar para eliminar óxidos y contaminantes depositados en la misma. Si la superficie de la muestra es muy rugosa o contiene mucha costra, es necesario hacerle esmerilado o pulido con un abrasivo basto, para luego hacerle el pulido final. Todas estas operaciones deben ser hechas evitando un excesivo calentamiento de la muestra. Los bordes deben ser maquinados, limados o esmerilados para así remover la severidad del metal trabajado en frío y luego ser pulidos al igual que el resto de la muestra. En esta parte de preparación superficial hay que tener cuidado con los metales blandos y sus aleaciones ya que su preparación tiene que ser más específica.

### 2.2.24. Mediciones y pesaje

Después de la preparación superficial, las muestras deben ser cuidadosamente medidas para así permitir el cálculo exacto del área superficial expuesta al medio corrosivo, ya que generalmente el área entra en la fórmula para el cálculo de la velocidad de corrosión en el transcurso del ensayo.

Después de medirla, la muestra es desengrasada mediante el lavado de un solvente adecuado que puede ser acetona, luego secada y pesada con una aproximación de 0.1 miligramos.

La muestra puede entonces ser colocada de inmediato al medio corrosivo o colocada en un desecador y particularmente se el material no es resistente a la corrosión atmosférica.



---

### 2.2.25. Técnicas de exposición

Una gran variedad de métodos son usados para sujetar las muestras para la exposición en el laboratorio o en la planta. Las consideraciones más importantes para esto son:

- 1.- Que el corrosivo pueda tener fácil acceso a la muestra.
- 2.- Que las muestras puedan ser aisladas eléctricamente del contacto con otros metales, a menos que hayan sido determinados previamente los efectos galvánicos.
- 3.- Para ensayos de planta, las muestras deben ser fácilmente accesibles.

### 2.2.26. Temperatura

Quizá uno de los factores más importantes en la corrosión, es el efecto de la temperatura. Por lo tanto es importante conocer la temperatura de la superficie de la muestra durante el ensayo. Algunas veces la corrosión decrece con la temperatura, pero en la mayoría de los casos cuando la temperatura sube, la corrosión también. Generalmente éste incremento va desde una baja velocidad hasta varios cientos de milésimas de pulgadas por año (*mpy*). Los ensayos de laboratorio en la mayoría de las veces son hechos en baños de agua o aceites con temperaturas controladas. Un error muy común es el de asumir que la temperatura del medio es la temperatura corrosiva, conociéndose como dicha temperatura corrosiva aquella existente en la interfase metal-medio. Las temperaturas superficiales (metal-medio), pueden ser estimadas tomando en consideración los coeficientes de transferencia de calor.



### 2.2.27. Aireación durante los ensayos

La aireación o la presencia de oxígeno disuelto en un medio líquido puede tener una profunda influencia en la velocidad de corrosión. Algunos metales y aleaciones son más rápidamente atacados en la presencia de oxígeno, mientras que otros pueden mostrar mejor resistencia a la corrosión, es por esto que los ensayos de corrosión deben ser cuidadosamente planificados, desaireando al medio si el material es un poco resistente a la aireación para no desvirtuar los resultados finales. Los materiales que pueden ser afectados por la aireación son: Acero, fundición, cobre, latón, bronce y otras aleaciones. Mientras que el aluminio, aceros inoxidables y otros, no son muy afectados por esta. Por lo general, en la mayoría de los casos es necesario tener alguna información del grado de aireación presente en el ensayo.

### 2.2.28. Duración de los ensayos

La adecuada selección del tiempo y del número de períodos de exposición son muy importantes y se pueden tener resultados errados si no se hace énfasis en estos factores. Nominalmente se usa un mínimo de dos períodos, recabándose en este caso la información necesaria de los cambios en la velocidad de corrosión, pudiéndose revelar errores anteriores como podría ser el de pesada. La velocidad de corrosión puede aumentar, disminuir o permanecer constante con el tiempo. Un procedimiento muy usado en el laboratorio, es exponer la muestra durante 5 períodos de 48 horas cada uno y cambiando la solución en cada caso.

Una regla muy aproximada para chequear los resultados con respecto a un tiempo mínimo de ensayo, es la fórmula:  $Horas = 2000/mils \text{ por año}$ , siendo 1 *mils* = 1 milésima de pulgada.

Estos ensayos envuelven no solo a los efectos acumulados de la corrosión a diferentes tiempos bajo condiciones por separado, sino también la velocidad



inicial del metal original, la mayor o menor velocidad instantánea del metal después de una larga exposición y la velocidad inicial de corrosión del metal original durante el mismo período de tiempo puede ser tomado convenientemente como un día en un ensayo a intervalos planificados extendidos en un periodo total de varios días. Se debe tener duplicidad de muestras para cada intervalo y puede irse extendiendo el ensayo añadiendo muestras y espaciando aún más los intervalos, por ejemplo, llevando el intervalo a dos días o más.

Las causas para que ocurran los cambios en la velocidad de corrosión como una función del tiempo no están dadas por el criterio de ensayos a intervalos planificados, ya que la corrosividad del medio puede decrecer y por ende la velocidad de corrosión, durante el curso de ensayo debido a la reducción en concentración del agente corrosivo, el agotamiento de un contaminante corrosivo, a la formación de productos de inhibición, etc. También la corrosividad del medio puede aumentarse y de hecho la velocidad de corrosión por la formación de productos autocatalíticos o a la destrucción de sustancias inhibidoras de la corrosión.

#### **2.2.29. Limpieza o lavado de muestras después de la exposición**

Este es uno de los pasos más importantes en los ensayos de corrosión. Es indispensable que antes de hacerse el lavado se le haga a la muestra ensayada un examen visual para recabar información acerca de las causas o mecanismos de la corrosión envueltas, como podría ser información con respecto a depósitos o incrustaciones que pudieran ser causas de picaduras en el metal.

Debido a que los productos de corrosión son clasificados como: Suelos o fácilmente eliminables y compactos o adherentes y también se les consideran como protectores o no protectores, es por esto que los métodos de limpieza pueden ser clasificados en:



**1.- Mecánicos:** Metales como raspar, cepillar y restregar la superficie con abrasivos, limpieza con chorro de arena y el método del tapón de goma.

**2.- Químicos:** Reactivos y solventes que puedan ser utilizados como agentes de limpieza.

**3.- Electrolíticos:** Estos aplican el hacer de la muestra un cátodo bajo una corriente impresa en una variedad de reactivos químicos con o sin adición de inhibidores.

Cuando los productos de corrosión son no adherentes o sueltos, se usa con frecuencia por ser satisfactorio el método del tapón de caucho o goma, el cuál consiste en lo siguiente:

Se mantiene la muestra bajo un flujo de agua corriente y se restrega vigorosamente la superficie con un papón de goma hasta eliminar todo el producto de corrosión.

Si los productos de corrosión son adherentes como el caso de aleaciones ferrosas, se pueden utilizar métodos electrolíticos. Estos procedimientos deben ser cuidadosamente aplicados ya que la velocidad de corrosión en la mayoría de los casos es una función del cambio de peso de la muestra y una mala aplicación de estos método acarrearía una mayor o menor eliminación de material no conveniente, provocando en ambos casos errores en la velocidad de corrosión medida.

### **2.2.30. Expresiones estándar para la velocidad de corrosión**

En el año 1945 Fontana y Green, propusieron la expresión de milésima de pulgada de penetración por año, que es una de las mayormente usadas hasta ahora. Así tenemos:



$mpy$  = milésima de pulgada por año

$$mpy = 534 \omega / \rho \cdot A \cdot t \text{ donde: } \omega = \text{pérdida de peso en miligramos}$$

$$\rho = \text{Densidad de la muestra en gramo/cm}^3$$

$$A = \text{Área de la muestra en plg}^2$$

$$t = \text{Tiempo de exposición en horas.}$$

Existe una relación directa entre éstas y otras unidades usadas como es:

$$mpy = \text{Pulgadas}/(1000 \times \text{año}) = \text{pulgadas}/(\text{mes} \times 12000) = (\text{mdd} \times 1.44)/\delta$$

donde:

$\delta$  = Gravedad específica del material

mdd = Miligramos / (decímetro<sup>2</sup> x día)

mdd = Pérdida de peso en miligramos / área en decímetros<sup>2</sup> x tiempo en días

### 2.2.31. Presentación y resumen de datos

Una gran variedad de métodos son usados para resumir los datos de corrosión. Algunos de estos datos son de naturaleza cualitativa y otros cuantitativas. En casos generales, una persona buscando información sobre corrosión se enfrenta con una variedad de esquemas y métodos y muchas veces se confunde. La estandarización aún y cuando es deseable, resulta difícil debido a las diferentes aproximaciones individuales con respecto al mismo problema.

Cuando se disponen de suficientes datos, se pueden preparar las cartas isocorrosivas.



---

Dos métodos muy comunes para presentar los datos de corrosión son las tablas y las curvas. Ejemplo: Los resultados de ensayos sobre un número de materiales diferentes en una planta de un medio particular, son generalmente reportados en una tabla. También los ensayos sobre materiales donde se varía la concentración y temperaturas son reportados bajo curvas.

Cuando se quieran realizar ensayos más específicos, las especificaciones y los métodos de ensayos se pueden encontrar en los manuales de la ASTM “American Society Testin for Metals”

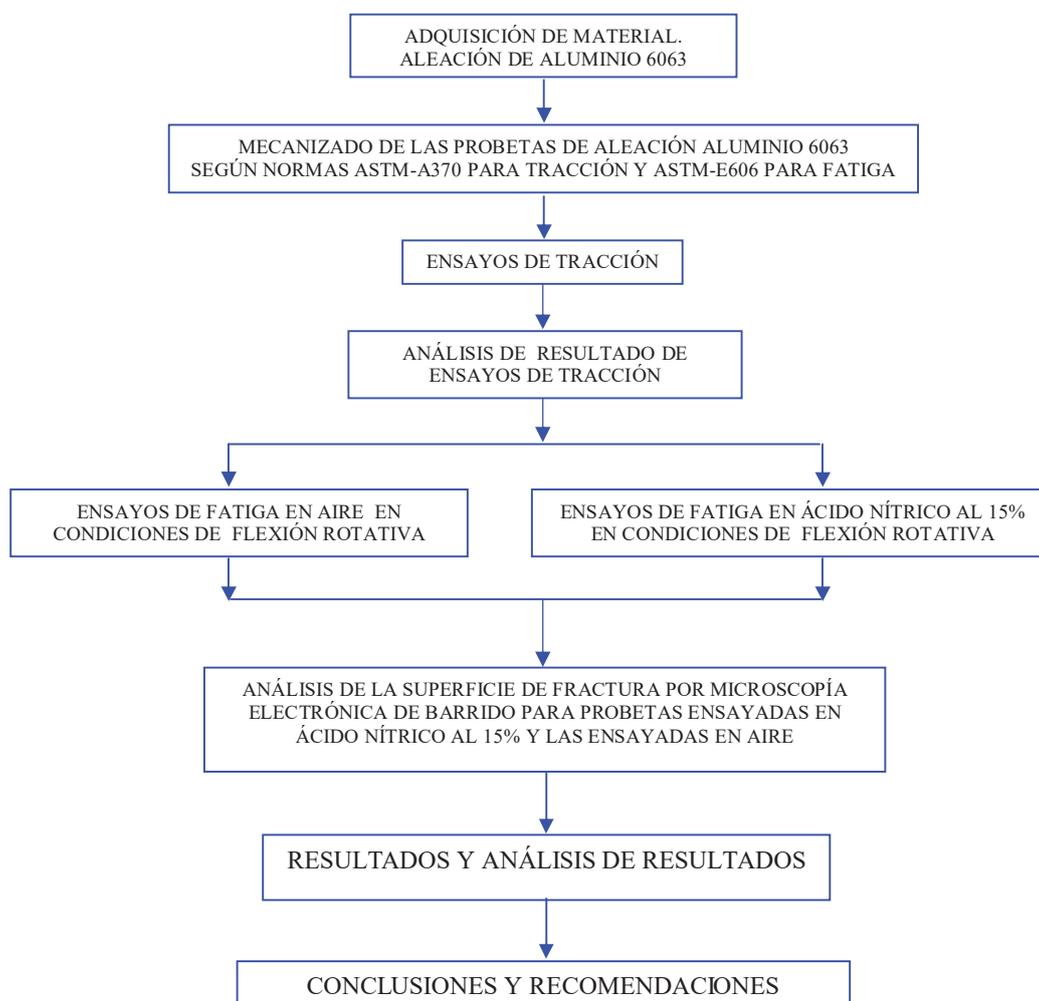


## CAPÍTULO 3

### MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presenta la metodología a usar en el desarrollo de la investigación.

#### 3.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN



**Figura 3.1.** Diseño de la Investigación



---

### 3.2. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

Dado a que ésta investigación consiste en estudiar el comportamiento a fatiga de la aleación de aluminio 6063 la denominamos una investigación experimental. Dicha investigación se basa en estudiar la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en un medio corrosivo y en el medio ambiente y comparar los resultados arrojados por ambos medios. Estos ensayos se realizarán en la máquina de fatiga de flexión rotativa ubicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

### 3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

A continuación se detalla el procedimiento experimental para la realización de los ensayos a fatiga en aire y en ácido nítrico al 15%.

#### 3.3.1. Materiales y equipos

##### 3.3.1.1. Barras de aleación de aluminio 6063

Las barras de aleación de aluminio 6063, fueron adquiridas en la empresa ALUVEN C.A, ubicada en la zona industrial de Valencia estado Carabobo. Las dimensiones de la barra fueron de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y 6 metros de longitud.

Para asegurarse de que cumplen tanto con las propiedades mecánicas como con la composición química para una aleación de este tipo según norma, con un tratamiento T6, se le realizó un estudio de espectrofotometría en la empresa ALUCASA, en el que se pretende corroborar que la composición química del material cumple con los rangos permisibles de cada compuesto que compone la aleación. Esto con el fin de corroborar que la aleación de aluminio adquirida es la 6063.



En la Tabla 3.1 se muestra que el material utilizado para la ejecución de esta investigación es una aleación de aluminio con la siguiente composición química:

AA	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn	Al
6063	<b>0.4</b>	<b>0.781</b>	<b>0.57</b>	<b>0.063</b>	<b>0.034</b>	<b>0.094</b>	<b>0.016</b>	<b>0.048</b>	<b>Resto</b>

**Tabla 3.1** Composición química del material adquirido. Aleación de aluminio 6063. ALUCASA.

### 3.3.1.2. Máquina de tracción

Los ensayos de tracción fueron realizados en una máquina universal de ensayos marca Galdabini, modelo CTM 20, a la cual se puede aplicar una carga máxima de 200.000 Newton. Esta máquina se encuentra ubicada en el Centro de Investigaciones de Mecánica (CIMEC), área de ensayos mecánicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Estos ensayos fueron controlados por medio de un programa de computadora para ensayos mecánicos.



**Figura 3.2.** Máquina de tracción



### 3.3.1.3. Máquina de fatiga

Los ensayos de fatiga y corrosión se realizaron en una máquina de flexión rotativa marca Fatigue Dynamics Inc, modelo RBF-200HT, ubicada en el Centro de Investigaciones de Mecánica (CIMEC), área de ensayos mecánicos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

La máquina está diseñada para aplicar cargas sobre probetas en forma cilíndricas y posee un contador de ciclos y un regulador de velocidad el cual puede variar sus revoluciones.

Adicionalmente, en el caso de fatiga a corrosión, es posible acoplar al equipo un contenedor capaz de mantener continuamente una solución acuosa o medio corrosivo sobre la sección calibrada de la probeta.



Figura 3.3. Máquina de fatiga



### 3.3.1.4. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Para realizar estas observaciones, se hizo uso del Microscopio electrónico de barrido marca Hitachi. La microscopía fue llevada a cabo en los Laboratorios del CIADANA, ubicado en la Universidad de Carabobo núcleo la Morita. Para esto se realizó un corte transversal al cuello de la probeta ya ensayada por cada nivel de esfuerzo y por cada medio ambiente en estudio, cortando  $\pm 5\text{mm}$  desde el cuello donde se produjo la fractura y así poder observar la superficie de fractura.



**Figura 3.4.** Microscopio Electrónico de Barrido marca Jeol, similar al ubicado en el CIADANA

## 3.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

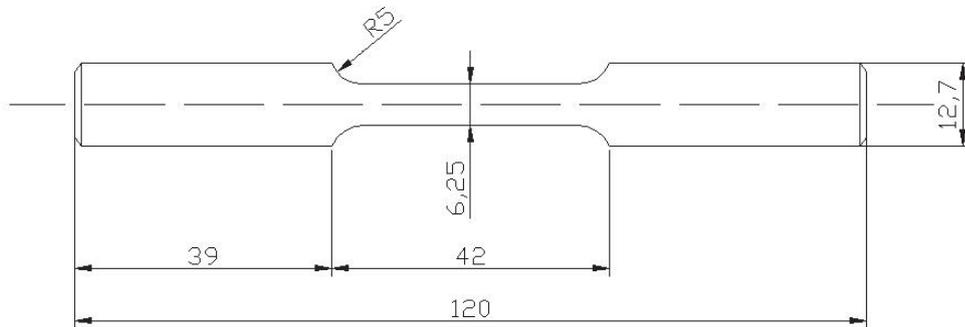
### 3.4.1. Mecanizado y corte de las probetas

El mecanizado y corte de las barras de aleación de aluminio 6063 para la obtención de las probetas para la realización de los ensayos de tracción y fatiga, se realizó en un torno CNC (Torno de Control Numérico). Luego fueron desvastadas

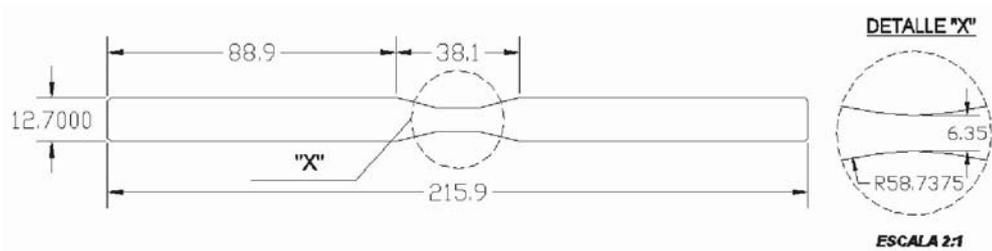


con papeles de lija 320, 400 y 600, en dirección axial al eje de la probeta, produciendo así una superficie libre de entalles.

Dicho mecanizado se realizó bajo la norma ASTM-E606 para las probetas de fatiga y ASTM-A370 para las de tracción, las cuales corresponden para el estudio en cuestión.



**Figura 3.5.** Probetas para ensayos de tracción según norma ASTM-A370 (medidas en milímetros).



**Figura 3.6.** Probetas para ensayos de fatiga según norma ASTM-E60 (medidas en milímetros).



### 3.4.2. Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción fueron hechos con el fin de saber la resistencia máxima del material y la resistencia a la fluencia del mismo. Para ello, se hizo uso de la máquina de tracción dejando como resultado un gráfico de donde se obtuvo la resistencia de interés.

#### 3.4.2.1. Procedimiento de ensayos de tracción

En este ensayo, la máquina nos proporciona una gráfica de la carga aplicada en Newton (N) en función del alargamiento, que viene dado en milímetros (mm); y además nos indica la carga máxima aplicada. A partir de ésta gráfica se construye el gráfico del esfuerzo en unidades de MPa en función del porcentaje de alargamiento en mm/mm, de donde se pueden conseguir diferentes propiedades mecánicas del material como el límite elástico, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, ductilidad, tenacidad, porcentaje de reducción de área y el módulo de Young. Para este caso sólo es necesario conseguir el esfuerzo de fluencia.

Una vez tabulados los valores Fuerza y deformación, se calcularon el esfuerzo correspondiente a cada punto en MPa y la deformación en mm/mm. Esto mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (\text{MPa}) \quad (3-1)$$

En donde  $\sigma$  es el esfuerzo, P es la carga en Newton y  $A_0$  es el área inicial en  $\text{mm}^2$  de la sección transversal de la probeta a ensayar.

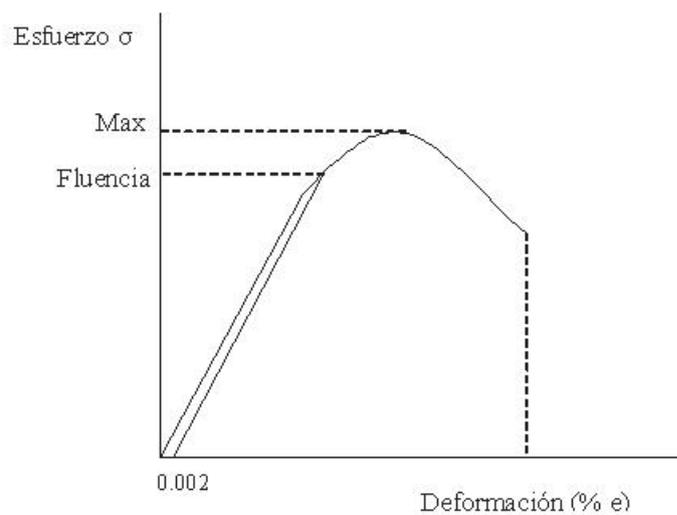
Luego de obtenido este gráfico, se traza una línea paralela a la zona de pendiente positiva correspondiente a la deformación elástica. Esta línea se coloca



de forma que se superponga la mayor longitud posible sobre el gráfico de forma manual (con el mouse).

Con la línea trazada sobre la parte elástica del gráfico se recurre a los datos de origen de la recta y se le suma un valor de 0,002 a los valores correspondientes a la deformación (valores de X). Esto hace que la línea se desplace horizontalmente a la derecha en una magnitud del 0,2% de la deformación

Cuando se culmina este procedimiento, se hace un acercamiento al gráfico y se busca el valor de intersección entre el gráfico esfuerzo-deformación y la recta que se desplazó hacia la derecha. Este valor corresponde al esfuerzo de fluencia del material obtenido mediante el método Off set.



**Figura 3.7** Método Off Set para hallar esfuerzo de fluencia

En este caso el valor del esfuerzo de fluencia  $S_y=181.4$  MPa y el esfuerzo de fluencia teórico  $S_y=175$  MPa Cabe destacar que mediante este método es necesaria la apreciación visual para ubicar el punto de intersección correctamente.



### 3.4.3. Ensayos de fatiga

Para la realización de los ensayos de fatiga al aire y fatiga a corrosión, fue necesaria la obtención del momento flector, dado a que el nivel de esfuerzo necesario para cada ensayo se aplica a través de la barra calibrada que la máquina posee, y ésta barra está en función del momento flector.

Para la obtención de este momento fue necesaria la aplicación de la ecuación que relaciona el momento flector con el esfuerzo aplicado, este último descubierto a través del ensayo de tracción.

El momento flector a aplicar se calcula según la expresión que posee la máquina de ensayos:

$$M = 0,0982 \cdot S \cdot D^3 \quad (3-2)$$

donde:

S es el esfuerzo que se va a aplicar en el ensayo (*psi*)

D es el diámetro del cuello de la probeta (*in*)

M es el momento flector que se aplica en el ensayo. (*lbf · in*)

Para calcular cada uno de los esfuerzos a aplicar en cada ensayo se procedió a utilizar una hoja de cálculo de Microsoft Excel, en la cual se introduce el porcentaje del esfuerzo de fluencia que se quiere aplicar y el diámetro de la probeta. La hoja de cálculo proporciona el valor del momento flector que se debe aplicar en el ensayo para lograr ese porcentaje de esfuerzo.

Una vez conocido el valor del momento flector M, se procede al ensayo de fatiga con el siguiente procedimiento:



- 1.- Se comprueba que la máquina esté apagada para realizar el montaje de las probetas sin correr riesgos.
- 2.- Se comienza con el montaje de la probeta en la máquina, cuidando de que ésta esté sostenida en las mordazas correctamente y así evitar cualquier movimiento incorrecto durante el ensayo que pueda afectar tanto la máquina como los resultados.
- 3.- Se verifica que la barra calibrada esté en el momento flector en estudio.
- 4.- Se verifica que el contador de ciclos esté en cero.
- 5.- Se enciende la máquina.
- 6.- Se procede a llevar la manilla de las revoluciones (fijas para este caso), en 4400rpm.
- 7.- Comienza el ensayo hasta la fractura.

En la Figura 3.8 se muestra la probeta para el ensayo de fatiga según la norma ASTM E-606.



**Figura 3.8.** Probeta para ensayo de fatiga de AA-6063 ASTM E-606

- 8.- Es necesaria la realización de ensayos de 5 probetas como un mínimo para cada nivel de esfuerzo, el cual en este caso partió desde un 95% del esfuerzo de fluencia del material hasta un 75%, variando en un porcentaje del 5% menos en cada nivel, terminando así con una población de 5 probetas para 95%, 90%, 85%,



80% y 75%, con un total de probetas ensayadas de 25 por cada condición de estudio.

#### 3.4.4. Ecuación de Basquin para la construcción de las gráficas S-N

Para determinar las propiedades dinámicas de un material cuando se somete a condiciones de trabajo de fatiga, se construye la ecuación de resistencia a la fatiga mediante el método de regresión lineal con los datos experimentales, los cuales se deben distribuir en niveles de esfuerzo. Este procedimiento permite identificar los coeficientes que representan a la curva de comportamiento a la fatiga, mediante la linealización de los datos obtenidos en ensayos. [9]

La ecuación de resistencia a la fatiga o ecuación de Basquin viene dada por la siguiente expresión:

$$S_f = A \times N^{-B} \quad (3-3)$$

donde:

A es el coeficiente de resistencia a fatiga

B es el exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin.

A fin de identificar el nivel o grado de ajuste de los resultados experimentales obtenidos, se debe calcular el índice de correlación lineal para las curvas de comportamiento a la fatiga. Dicho valor permite inferir la relación que tienen las variables de esfuerzo y número de ciclos. [14]



La ecuación de Basquin es del tipo potencial, por tanto los valores de los coeficientes se modifican para que sean expresados en forma de regresión lineal como se muestra a continuación:

$$\text{Log}(S_f) = \text{Log}(A) - B \cdot \text{Log}(N) \quad (3-4)$$

donde se aplica el siguiente cambio de variable:

$$\text{Log}(S_f) = Y$$

$$\text{Log}(A) = b$$

$$\text{Log}(N) = X$$

$$B = m$$

y obtenemos:

$$Y = b + m \times X$$

Con técnicas estadísticas se obtienen los valores de A y B de la ecuación de Basquin, y también se puede determinar la correlación de las variables involucradas en los fenómenos de fatiga. [14]

De los datos obtenidos mediante los ensayos de fatiga para ambas condiciones, se calculan los coeficientes necesarios para la ecuación de Basquin a partir de las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} N \sum X \\ \sum X \sum X^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X \cdot Y \end{bmatrix} \quad (3-5)$$



---

$$b = \frac{\sum X_i^2 \cdot \sum Y_i - \sum X_i \cdot \sum X_i Y_i}{N \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3-6)$$

$$B = m = \frac{N \cdot \sum X_i Y_i - \sum X_i \cdot \sum Y_i}{N \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3-7)$$



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados arrojados en los ensayos de tracción y fatiga en aire y en ácido nítrico al 15%.

#### 4.1. RESULTADOS

##### 4.1.1. Ensayos de tracción

Con la gráfica arrojada por el sistema computarizado que tiene la máquina de tracción, se obtuvo un esfuerzo de fluencia teórico de  $S_y=175$  MPa y un esfuerzo de fluencia experimental de  $S_y=181,4$  MPa = 26309.845 (psi).

Las probetas ensayadas fracturaron en la zona calibrada, lo que confirma la validez del ensayo. Se tomaron esos valores para hallar el promedio del esfuerzo de fluencia, el cuál se tomó como válido ya que se acerca al esfuerzo de fluencia teórico.

En la Tabla 4.1 se muestran los valores arrojados y el promedio usado en los ensayos de fatiga.

**Tabla 4.1. Esfuerzo de fluencia experimental arrojado por la máquina de tracción**

MUESTRA	ESFUERZO DE FLUENCIA EXPERIMENTAL $S_y$ (MPa)
1	189,50
2	174,90
3	193,30
4	179,70
5	183,10
<b>PROMEDIO</b>	<b>181,40</b>



#### 4.1.2. ENSAYOS DE FATIGA

Los ensayos de fatiga permitieron obtener el número de ciclos de fatiga para cada esfuerzo de trabajo aplicado a las probetas de la aleación en cada una de sus condiciones. Para la condición de fatiga al aire, se aplicaron esfuerzos del orden de 95%, 90%, 85%, 80% y 75% del esfuerzo de fluencia del material. Estudios anteriores han determinado que para un porcentaje bajo del esfuerzo de fluencia, el número de ciclos excede los 2000000 de ciclos, hecho por lo cual se procedió a la comprobación de dicho estudio y se verificó que luego de 2000000 a 65% del esfuerzo de fluencia del material, la probeta no partió.

De la ecuación (3-2) con el esfuerzo de fluencia experimental y  $D = 0.25$  plg, se obtuvo el momento flector máximo:

$$M = 40.36 \text{ lb.plg}$$

Ahora bien, aplicando el porcentaje de trabajo sobre el esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ), y resolviendo la ecuación del momento flector, se obtiene dicho momento flector aplicado para cada esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ).

En la Tabla 4.2 se muestra el porcentaje aplicado sobre el esfuerzo de fluencia experimental y el momento flector aplicado en cada probeta.

**Tabla 4.2. Momento flector aplicado en cada probeta según el porcentaje considerado**

PORCENTAJE	ESFUERZO DE FLUENCIA $S_y$ (MPa)	ESFUERZO DE FLUENCIA $S_y$ (psi)	MOMENTO FLECTOR (lb.plg)
95%	172,37	24994,35	38,50
90%	163,30	23678,90	36,33
85%	154,23	22363,37	34,50
80%	145,16	21047,87	32,30
75%	136,08	19732,40	30,30



#### 4.1.2.1. Velocidad de giro

Para determinar la velocidad de giro, se efectuaron cuatro mediciones y se consideró un promedio entre ellas en revoluciones por minuto a la cual se realizó el ensayo de fatiga. El promedio fue 4400 rpm.

#### 4.1.2.2. Resultado de ensayos de fatiga en aire

En la Tabla 4.3 se muestra la recolección de datos arrojados en los ensayos de fatiga en aire.

Tabla 4.3. Resultados de ensayos de fatiga de la aleación de aluminio 6063 en aire

MUESTRA	RPM	Sy EXP. (MPa)	(%)	Sy EXP. (psi)* %	MOMENTO (lb.plg)	CICLOS (N)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
1	4.400	181,45	95	24.994,35	38,50	87.700	11.539,62
2	4.400	181,45	95	24.994,35	38,50	71.700	
3	4.400	181,45	95	24.994,35	38,50	80.600	
4	4.400	181,45	95	24.994,35	38,50	70.600	
5	4.400	181,45	95	24.994,35	38,50	98.200	
6	4.400	181,45	90	23.678,90	36,30	267.600	68.920,06
7	4.400	181,45	90	23.678,90	36,30	133.300	
8	4.400	181,45	90	23.678,90	36,30	307.900	
9	4.400	181,45	90	23.678,90	36,30	210.000	
10	4.400	181,45	90	23.678,90	36,30	276.700	
11	4.400	181,45	85	22.363,37	34,50	367.500	25.967,92
12	4.400	181,45	85	22.363,37	34,50	355.600	
13	4.400	181,45	85	22.363,37	34,50	375.100	
14	4.400	181,45	85	22.363,37	34,50	399.400	
15	4.400	181,45	85	22.363,37	34,50	328.700	
16	4.400	181,45	80	21.047,87	32,30	154.400	136.177,3
17	4.400	181,45	80	21.047,87	32,30	482.700	
18	4.400	181,45	80	21.047,87	32,30	461.100	
19	4.400	181,45	80	21.047,87	32,30	403.200	
20	4.400	181,45	80	21.047,87	32,30	459.800	
21	4.400	181,45	75	19.732,40	30,30	661.800	195.746,04
22	4.400	181,45	75	19.732,40	30,30	734.400	
23	4.400	181,45	75	19.732,40	30,30	1.131.500	
24	4.400	181,45	75	19.732,40	30,30	852.500	
25	4.400	181,45	75	19.732,40	30,30	1.023.000	



---

En la tabla 4.3 se puede observar la tendencia al aumento de la desviación estándar a medida que se disminuye el esfuerzo. Esto indica que a menor esfuerzo aplicado existe una mayor dispersión.

#### **4.1.2.3. Resultado de ensayos de fatiga en ácido nítrico al 15%**

Para la condición de fatiga de probetas en ácido nítrico, se aplicaron esfuerzos teóricos del orden de 95%, 90%, 85%, 80% y 75% del esfuerzo de fluencia del material.

En la Tabla 4.4 se muestra la recolección de datos arrojados en los ensayos de fatiga de probetas expuestas al ácido nítrico.

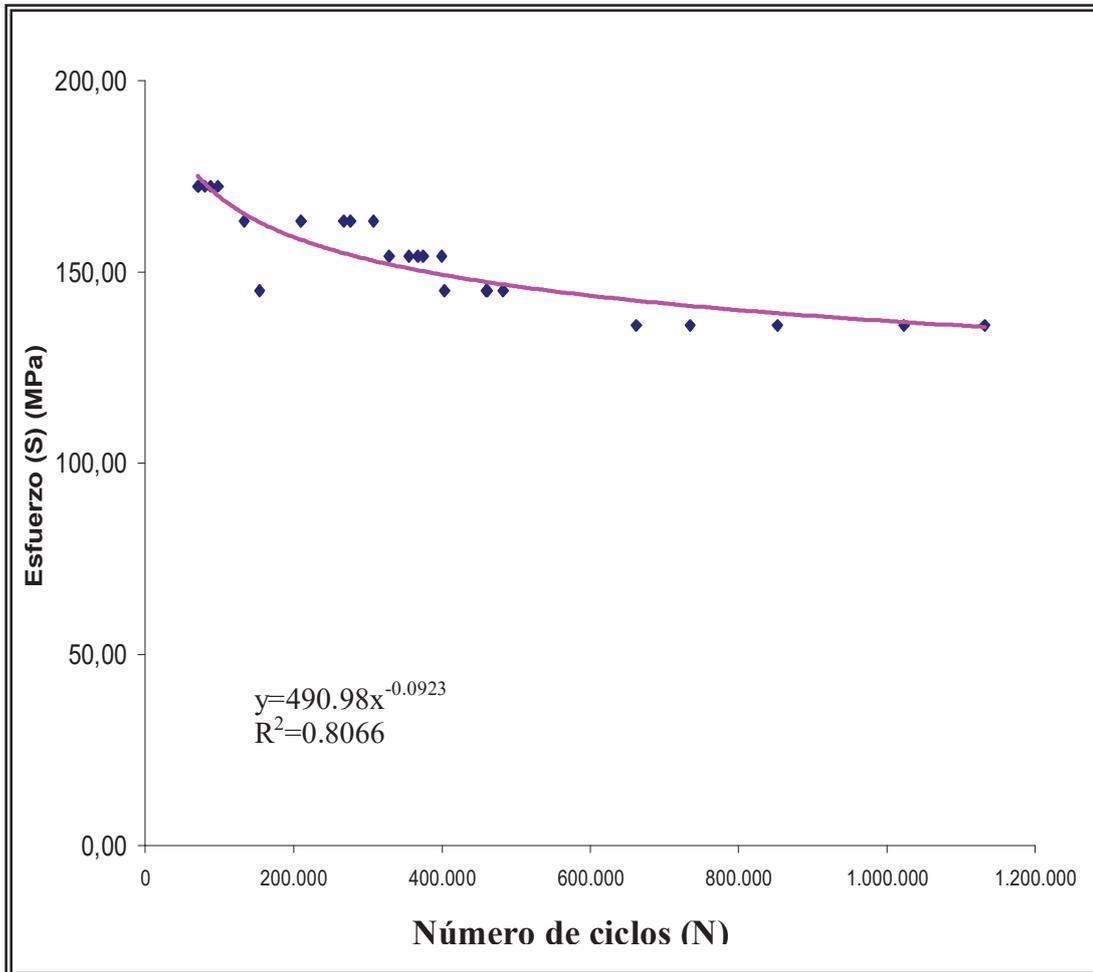
En la tabla 4.4 se observa la tendencia al aumento de la desviación estándar a medida que se disminuye el esfuerzo. Esto indica al igual que los ensayos realizados en aire, que a menor esfuerzo aplicado existe una mayor dispersión.



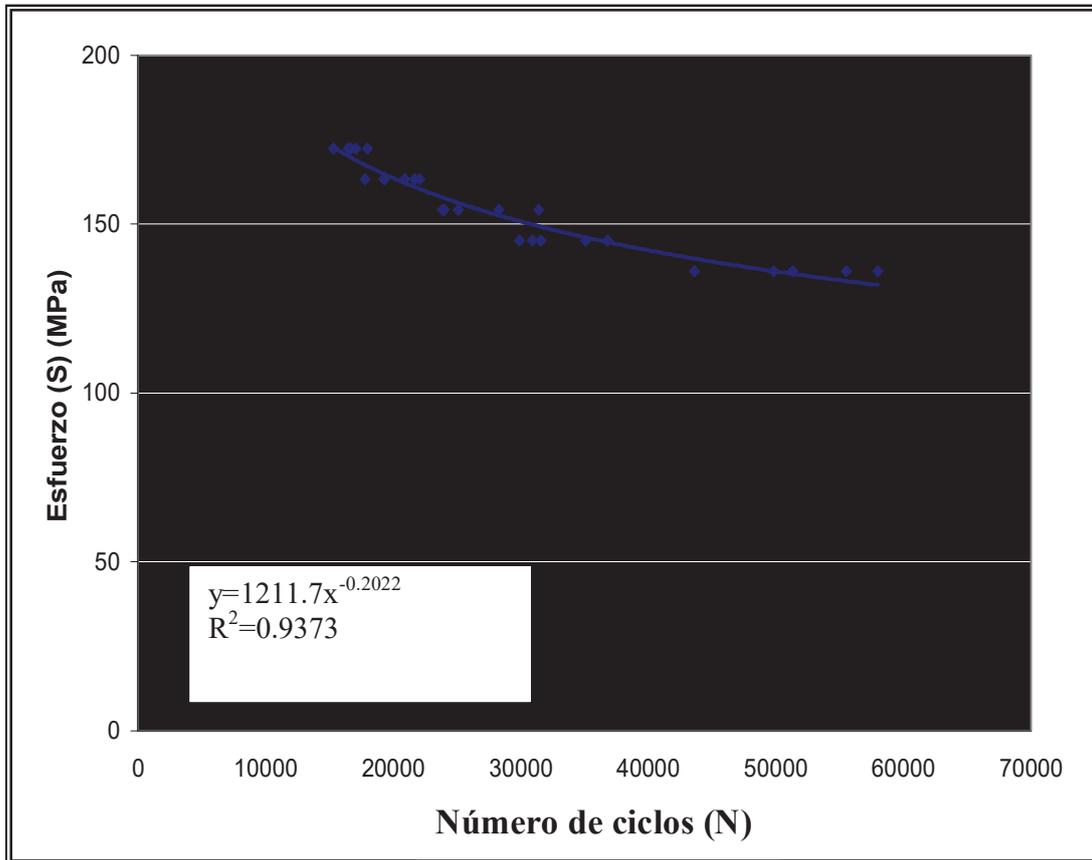
Tabla 4.4. Resultados de ensayos de fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%

MUESTRA	RPM	Sy EXP. (MPa)	(%)	Sy EXP. (MPa)* %	Sy EXP. (psi)* %	MOMENTO (lb. plg)	CICLOS (N)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR $\sigma$
1	4.400	181,45	95	172,37	24.994,35	38,50	16.700	980,81
2	4.400	181,45	95	172,37	24.994,35	38,50	18.000	
3	4.400	181,45	95	172,37	24.994,35	38,50	15.300	
4	4.400	181,45	95	172,37	24.994,35	38,50	17.100	
5	4.400	181,45	95	172,37	24.994,35	38,50	16.500	
6	4.400	181,45	90	163,30	23.678,90	36,30	19.300	1.788,29
7	4.400	181,45	90	163,30	23.678,90	36,30	22.100	
8	4.400	181,45	90	163,30	23.678,90	36,30	17.800	
9	4.400	181,45	90	163,30	23.678,90	36,30	20.900	
10	4.400	181,45	90	163,30	23.678,90	36,30	21.700	
11	4.400	181,45	85	154,23	22.363,37	34,50	24.000	3.248,53
12	4.400	181,45	85	154,23	22.363,37	34,50	28.300	
13	4.400	181,45	85	154,23	22.363,37	34,50	31.400	
14	4.400	181,45	85	154,23	22.363,37	34,50	23.900	
15	4.400	181,45	85	154,23	22.363,37	34,50	25.100	
16	4.400	181,45	80	145,16	21.047,87	32,30	30.900	2.946,69
17	4.400	181,45	80	145,16	21.047,87	32,30	35.100	
18	4.400	181,45	80	145,16	21.047,87	32,30	31.600	
19	4.400	181,45	80	145,16	21.047,87	32,30	29.900	
20	4.400	181,45	80	145,16	21.047,87	32,30	36.800	
21	4.400	181,45	75	136,08	19.732,40	30,30	58000	5.556,34
22	4.400	181,45	75	136,08	19.732,40	30,30	43600	
23	4.400	181,45	75	136,08	19.732,40	30,30	51300	
24	4.400	181,45	75	136,08	19.732,40	30,30	55500	
25	4.400	181,45	75	136,08	19.732,40	30,30	49800	

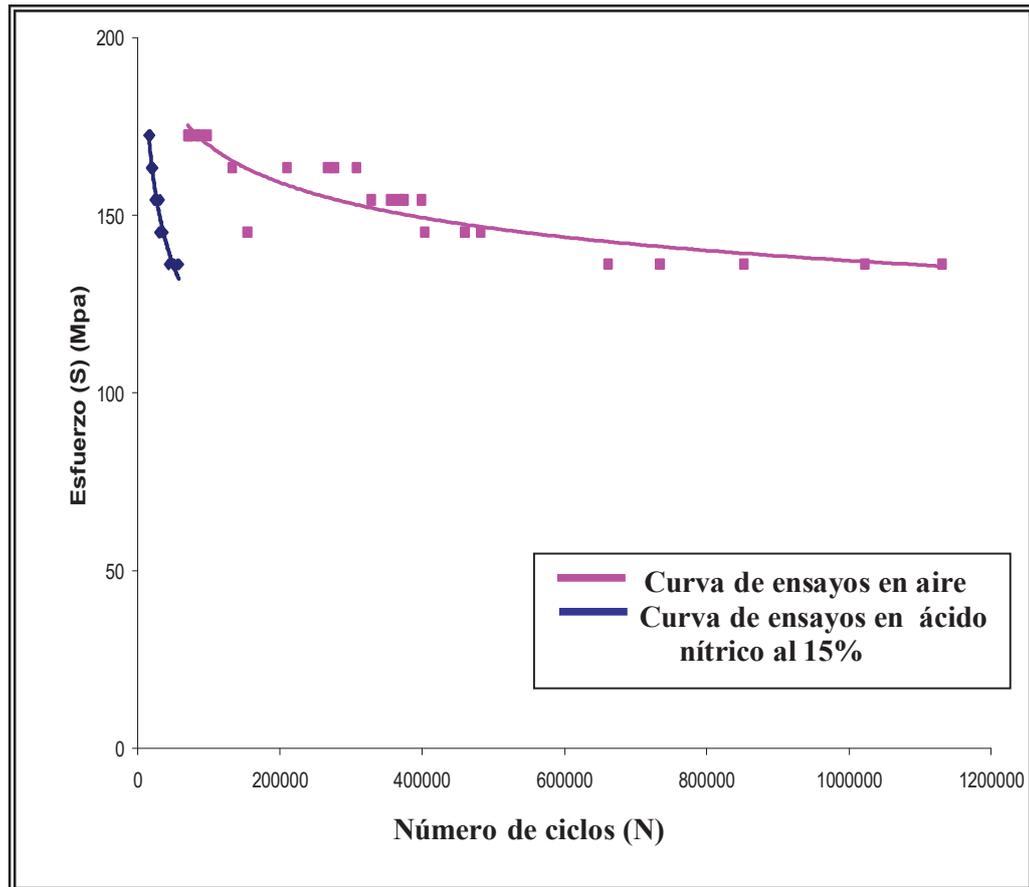
En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestra la gráfica de los resultados obtenidos de los ensayos de fatiga en aire y en ácido nítrico al 15%. En la Figura 4.3 se muestra una gráfica que permite comparar el efecto de cada medio.



**Figura 4.1** Gráfica de esfuerzo vs número de ciclos de la aleación de aluminio 6063 en aire.



**Figura 4.2** Gráfica de esfuerzo vs número de ciclos de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.



**Figura 4.3.** Gráfica comparativa del esfuerzo vs número de ciclos de la aleación de aluminio 6063 para las dos condiciones ensayadas

En la Figura 4.3 se observa claramente la reducción de vida a fatiga cuando ésta se somete al medio corrosivo.



#### 4.1.2.4. Análisis estadístico y gráfico de los ensayos de fatiga.

En esta sección, se tabulan los valores necesarios para calcular los coeficientes de la ecuación de Basquin para cada condición y las curvas bilogarámicas para cada condición y la comparación del efecto de cada medio.

##### 4.1.2.4.1. Análisis estadístico y gráfico de los ensayos de fatiga con probetas expuestas en aire.

En la Tabla 4.5 se tabulan los valores necesarios para calcular los coeficientes de la ecuación de Basquin.

Tabla 4.5. Valores necesarios para el cálculo de la ecuación de Basquin de los ensayos en aire

MUESTRA	N	Sy	X=log(N)	Y=log(Sy)	X <sup>2</sup>	XY
1	87.700	172,37	4,94	2,23	24,40	11,01
2	71.700	172,37	4,85	2,23	23,52	10,81
3	80.600	172,37	4,90	2,23	24,01	10,92
4	70.600	172,37	4,84	2,23	23,42	10,79
5	98.200	172,37	4,99	2,23	24,90	11,12
6	267.600	163,30	5,42	2,21	29,37	11,97
7	133.300	163,30	5,12	2,21	26,21	11,31
8	307.900	163,30	5,48	2,21	30,03	12,11
9	210.000	163,30	5,32	2,21	28,30	11,75
10	276.700	163,30	5,44	2,21	29,59	12,02
11	367.500	154,23	5,56	2,18	30,91	12,12
12	355.600	154,23	5,55	2,18	30,80	12,09
13	375.100	154,23	5,57	2,18	31,02	12,14
14	399.400	154,23	5,60	2,18	31,36	12,20
15	328.700	154,23	5,51	2,18	30,36	12,01
16	154.400	145,16	5,18	2,16	26,83	11,18
17	482.700	145,16	5,68	2,16	32,26	12,26
18	461.100	145,16	5,66	2,16	32,03	12,22
19	403.200	145,16	5,60	2,16	31,36	12,09
20	459.800	145,16	5,66	2,16	32,03	12,22
21	661.800	136,08	5,82	2,13	33,87	12,39
22	734.400	136,08	5,86	2,13	34,33	12,48
23	1.131.500	136,08	6,05	2,13	36,60	12,88
24	852.500	136,08	5,93	2,13	35,16	12,63
25	1.023.000	136,08	6,00	2,13	36,00	12,78
	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\sum X$	$\sum Y$	$\sum X^2$	$\sum XY$
	5,46	2,18	136,53	54,55	748,67	297,50



#### 4.1.2.4.2. Análisis estadístico y gráfico de los ensayos de fatiga con probetas expuestas en ácido nítrico al 15%.

En la Tabla 4.6 se tabulan los valores necesarios para calcular los coeficientes de la ecuación de Basquin en ácido nítrico al 15%.

Tabla 4.6. Valores necesarios para el cálculo de la ecuación de Basquin de los ensayos en ácido nítrico al 15%

MUESTRA	N	Sy	X=log(N)	Y=log(Sy)	X <sup>2</sup>	XY
1	16.700	172,37	4,22	2,23	17,80	9,41
2	18.000	172,37	4,25	2,23	18,06	9,47
3	15.300	172,37	4,18	2,23	17,47	9,32
4	17.100	172,37	4,23	2,23	17,89	9,43
5	16.500	172,37	4,21	2,23	17,72	9,38
6	19.300	163,30	4,28	2,21	18,31	9,45
7	22.100	163,30	4,34	2,21	18,83	9,59
8	17.800	163,30	4,25	2,21	18,06	9,39
9	20.900	163,30	4,32	2,21	18,66	9,54
10	21.700	163,30	4,33	2,21	18,74	9,56
11	24.000	154,23	4,38	2,18	19,18	9,54
12	28.300	154,23	4,45	2,18	19,80	9,70
13	31.400	154,23	4,49	2,18	20,16	9,78
14	23.900	154,23	4,37	2,18	19,09	9,52
15	25.100	154,23	4,39	2,18	19,27	9,57
16	30.900	145,16	4,48	2,16	20,07	9,67
17	35.100	145,16	4,54	2,16	20,61	9,80
18	31.600	145,16	4,49	2,16	20,16	9,69
19	29.900	145,16	4,47	2,16	19,98	9,65
20	36.800	145,16	4,56	2,16	20,79	9,84
21	58.000	136,08	4,76	2,13	22,65	10,13
22	43.600	136,08	4,63	2,13	21,43	9,86
23	51.300	136,08	4,71	2,13	22,18	10,03
24	55.500	136,08	4,74	2,13	22,46	10,09
25	49.800	136,08	4,69	2,13	21,99	9,98
	$\bar{X}$	$\bar{Y}$	$\sum X$	$\sum Y$	$\sum X^2$	$\sum XY$
	4,43	2,18	110,76	54,55	491,36	241,39



Sustituyendo los valores en las ecuaciones (3-6) y (3-7), y devolviendo los cambios de variable, se obtiene la siguiente expresión correspondiente a la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 expuesta al aire.

$$S_f = 490.98 * N^{-0,0923}$$

El valor del índice de correlación para ésta condición es

$$R^2 = 0,8066$$

También, sustituyendo los valores en las ecuaciones (3-6) y (3-7), y devolviendo los cambios de variable, se obtiene la siguiente expresión correspondiente a la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 expuesta al ácido nítrico.

$$S_f = 1211.7 * N^{-0,2022}$$

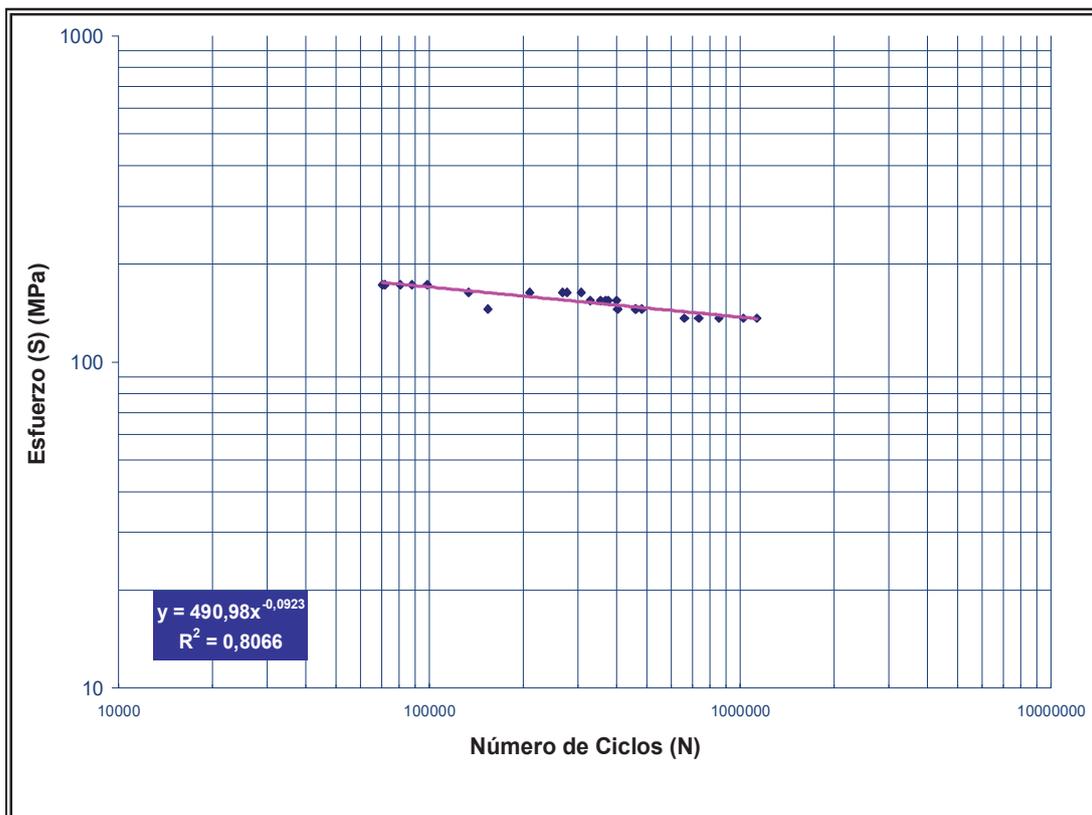
El valor del índice de correlación para ésta condición es

$$R^2 = 0,9373$$

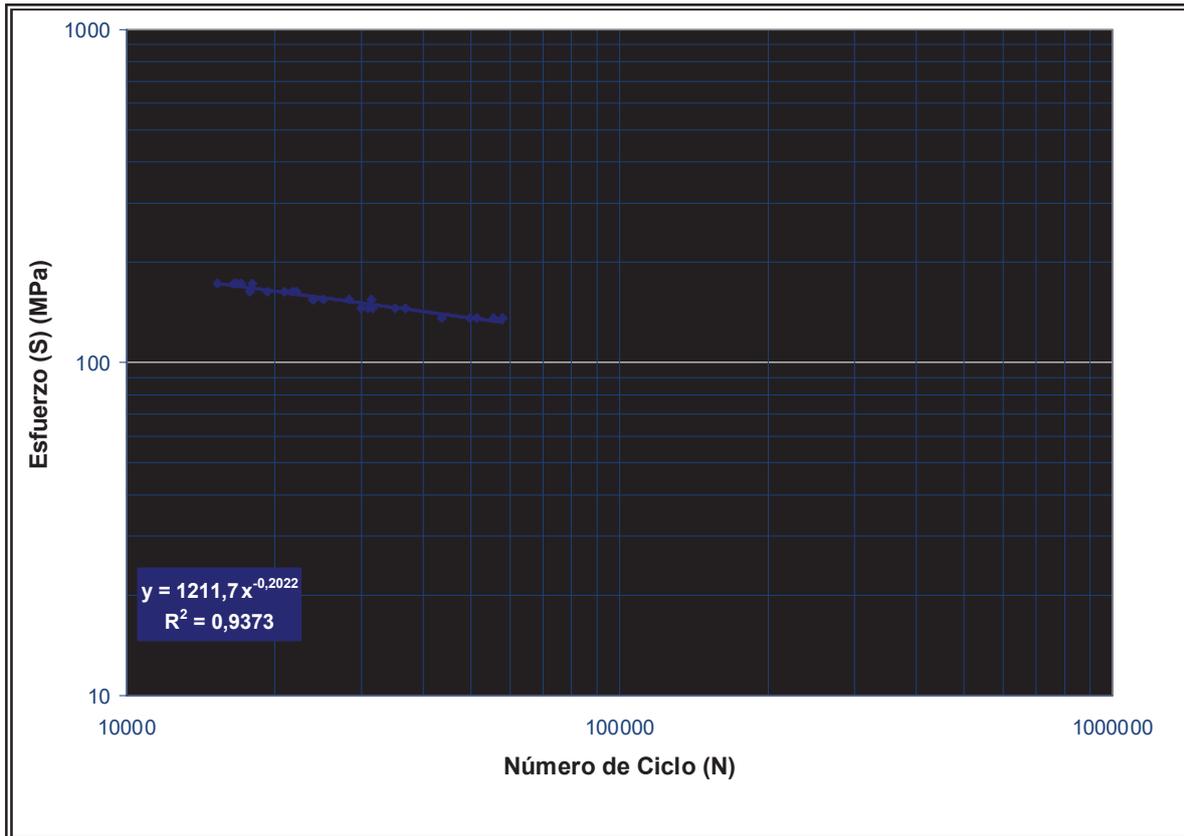
Los resultados obtenidos ofrecen información acerca de la tendencia o comportamiento de la aleación de aluminio 6063 sometida a fatiga con corrosión. Se tomó una zona de esfuerzo que va desde 136MPa hasta 172MPa, zona en la cual puede ser válida la ecuación de Basquin. La confiabilidad de la correlación lineal aplicada a los resultados experimentales, representa una tendencia de tipo directa dado a los valores obtenidos en los índices de correlación, los cuales son cercanos a la unidad y verifica que existe una dependencia entre las variables de resistencia a la fatiga ( $S_f$ ) y el número de ciclos (N).



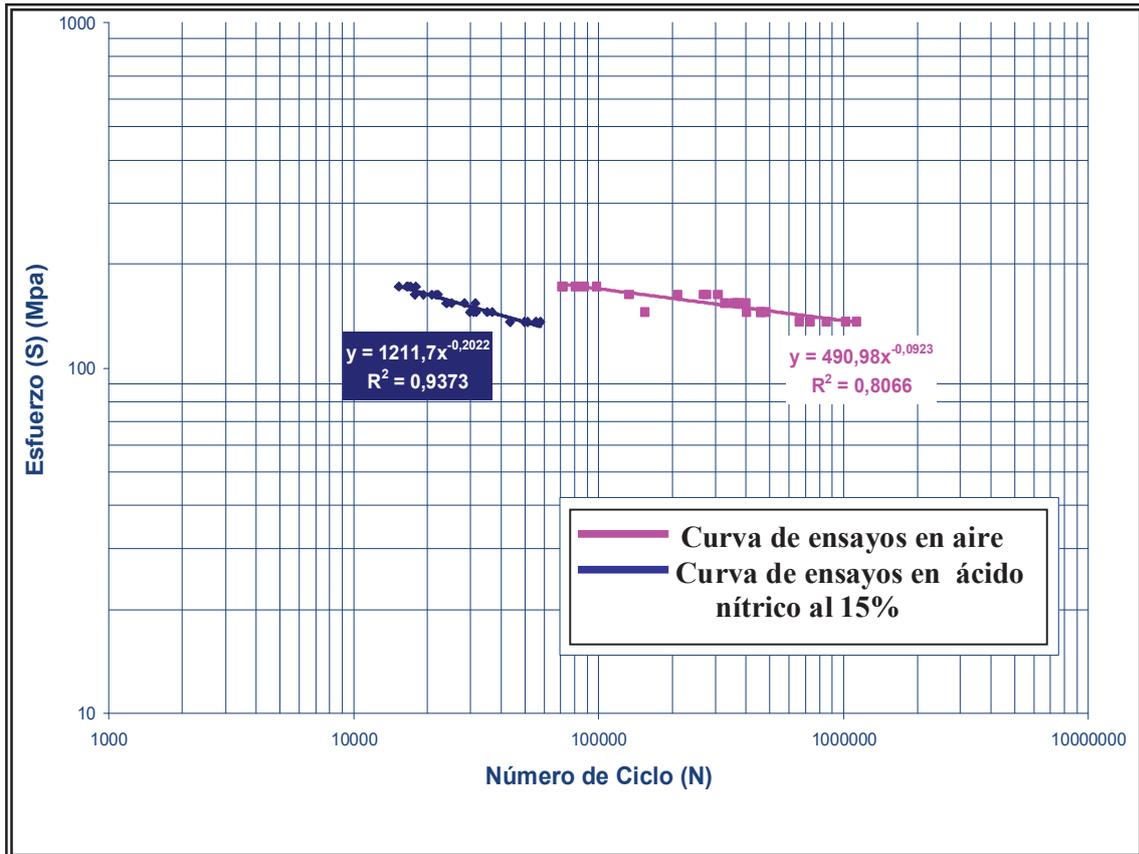
En las Figuras 4.4 y 4.5 se presentan las curvas de esfuerzo vs número de ciclos para cada condición ensayada en escala bilogarítmica y en la figura 4.6 se compara el efecto de cada medio ambiente.



**Figura 4.4** Gráfica de esfuerzo vs. número de ciclos de la aleación de aluminio 6063 en aire, en escala bilogarítmica.



**Figura 4.5** Gráfica de esfuerzo vs número de ciclos de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%, en escala bilogarítmica.



**Figura 4.6** Gráfica comparativa del esfuerzo vs número de ciclos de la aleación de aluminio 6063 en los dos ambientes ensayados en escala bilogarítmica.

De la Figura 4.6 se puede observar el comportamiento de la aleación para cada condición. De aquí se puede hallar la cantidad de ciclos alcanzados por cada una y el porcentaje de variación entre ellas para el mismo nivel de esfuerzo. Sus valores de correlación  $R^2$  los cuales son cercanos a la unidad, confirman que existe dependencia entre las variables de resistencia a la fatiga ( $S_f$ ) y el número de ciclos (N).



En la Tabla 4.7 se muestra el porcentaje de variación del número de ciclos entre las dos condiciones para un mismo valor de esfuerzo, según la Figura 4.7.

**Tabla 4.7.** % de variación del número de ciclos para el mismo esfuerzo.

ESFUERZO (MPa)	NÚMERO DE CICLOS		% DE VARIACIÓN
	AIRE	ÁCIDO NÍTRICO AL 15%	
<b>172.37</b>	70.600	15.300	78.32
<b>136.08</b>	1.131.500	58.000	94.87

### 4.1.3. Fractografía

A continuación se muestran las imágenes obtenidas mediante el microscopio electrónico de barrido de las diferentes muestras ensayadas.

#### 4.1.3.1. Fractografía de muestras ensayadas en aire

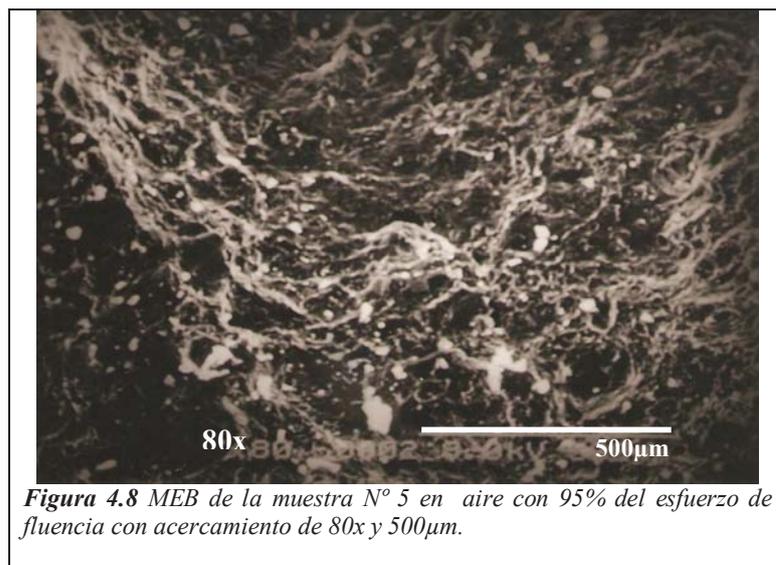
A continuación se muestra una serie de fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido a 95, 90, 85 y 75% del esfuerzo de fluencia en probetas expuestas al aire.

En la Figura 4.7, se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía fue tomada con una cámara digital a través de un estereoscopio y corresponde a la muestra N° 5 del ensayo de fatiga en aire a un 95% del esfuerzo de fluencia.



**Figura 4.7** Fotografía de la superficie de fractura de la muestra número 5 en aire con 95% del esfuerzo de fluencia, tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio.

En la Figura 4.8 se presenta la fotografía usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra N° 5 del ensayo de fatiga al aire a un 95% del esfuerzo de fluencia. Se detallan Presencia de dimples en la parte superior de la imagen, lo cual indica que el tipo de fractura en esa zona es de tipo dúctil y presencia de fractura frágil en la parte inferior de la imagen, lo cual indica que se está en una zona de transición de fractura dúctil a frágil.



**Figura 4.8** MEB de la muestra N° 5 en aire con 95% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 80x y 500 $\mu$ m.

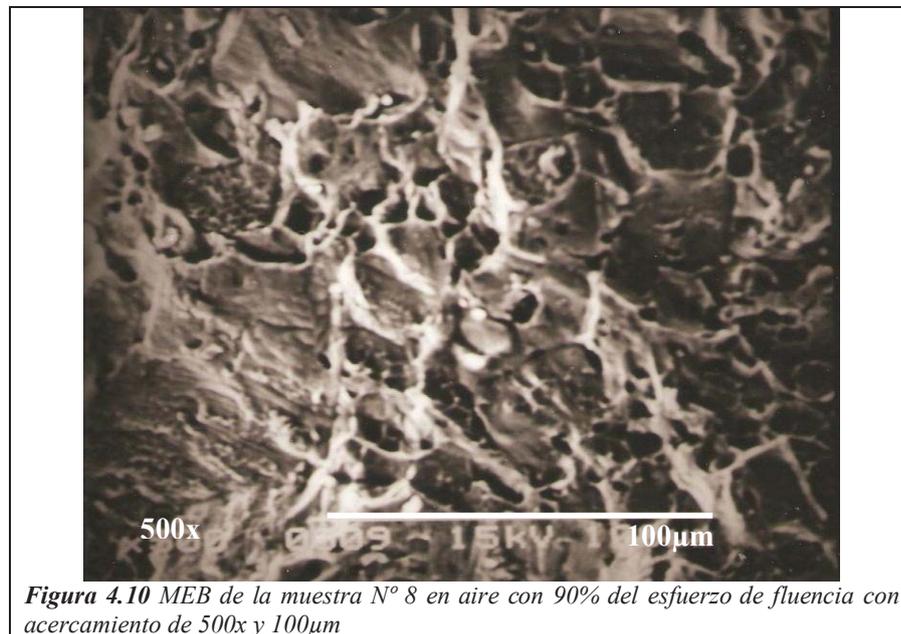


En la Figura 4.9 se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía corresponde a la muestra N° 8 del ensayo de fatiga al aire a un 90% del esfuerzo de fluencia.



*Figura 4.9* Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 8 en aire con 90% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio.

En la Figura 4.10 se presenta la fotografía usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra número 8 del ensayo de fatiga al aire a un 90% del esfuerzo de fluencia. Se observa presencia de dimples en la parte superior de la imagen, lo cual caracteriza a la zona dúctil. Se observa la zona de transición de fractura de dúctil a frágil en la parte inferior izquierda.



**Figura 4.10** MEB de la muestra N° 8 en aire con 90% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 500x y 100 $\mu$ m

En la Figura 4.11 se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía corresponde a la muestra N° 14 del ensayo de fatiga al aire a un 85% del esfuerzo de fluencia.

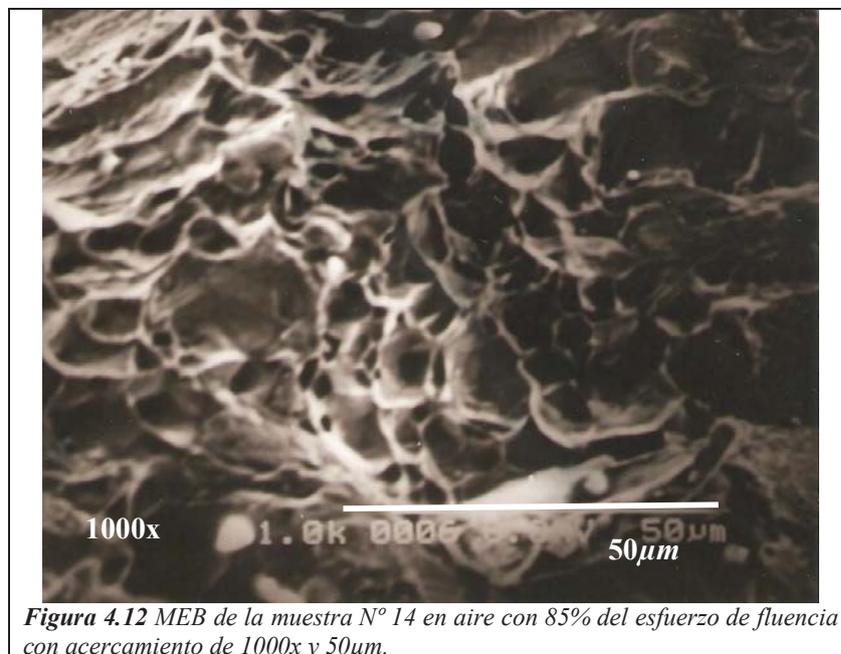


**Figura 4.11** Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 14 en aire con 85% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un esteroscopio



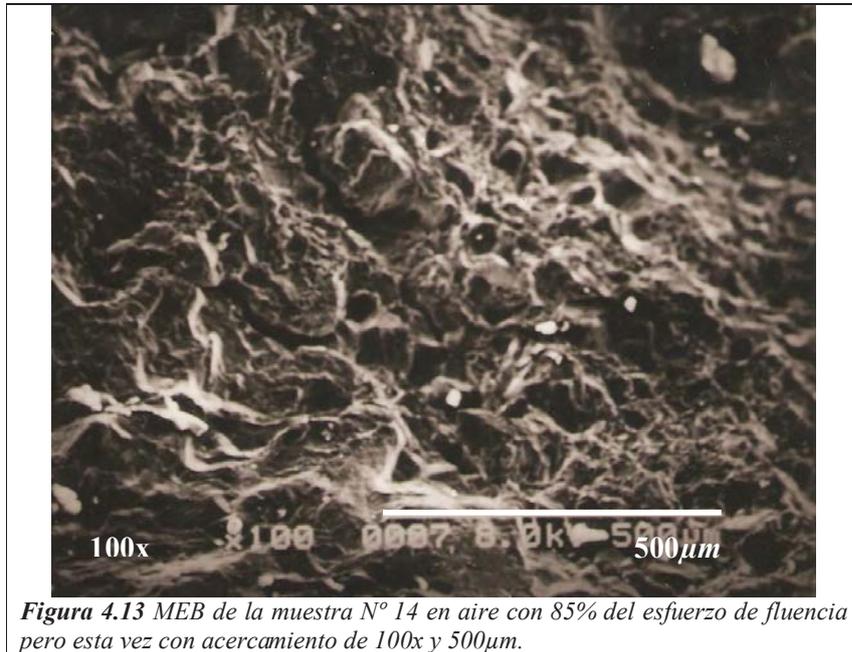
En las Figuras 4.12 y 4.13 se presentan dos fotografías con diferentes aumentos, usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra N° 14 del ensayo de fatiga al aire a un 85% del esfuerzo de fluencia.

En la Figura 4.12 se observa Presencia de dimples grandes y pequeños. Presencia de porosidades dispersas.



**Figura 4.12** MEB de la muestra N° 14 en aire con 85% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 1000x y 50µm.

En la Figura 4.13 se observa Clivajes hacia el borde inferior izquierdo, presencia de dimples en la parte inferior derecha.



*Figura 4.13 MEB de la muestra N° 14 en aire con 85% del esfuerzo de fluencia pero esta vez con acercamiento de 100x y 500µm.*

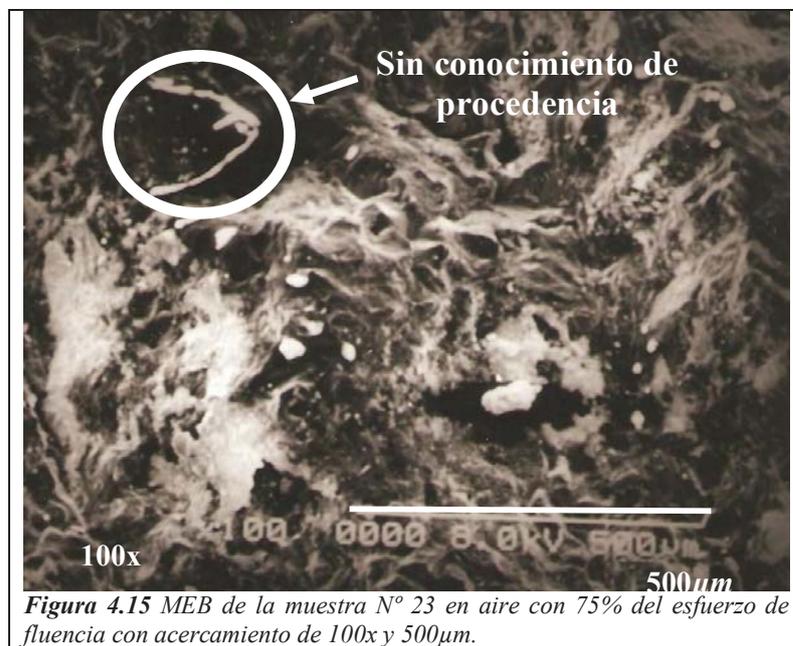
En la Figura 4.14 se muestra de la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía corresponde a la muestra N° 23 del ensayo de fatiga en aire a un 75% del esfuerzo de fluencia.



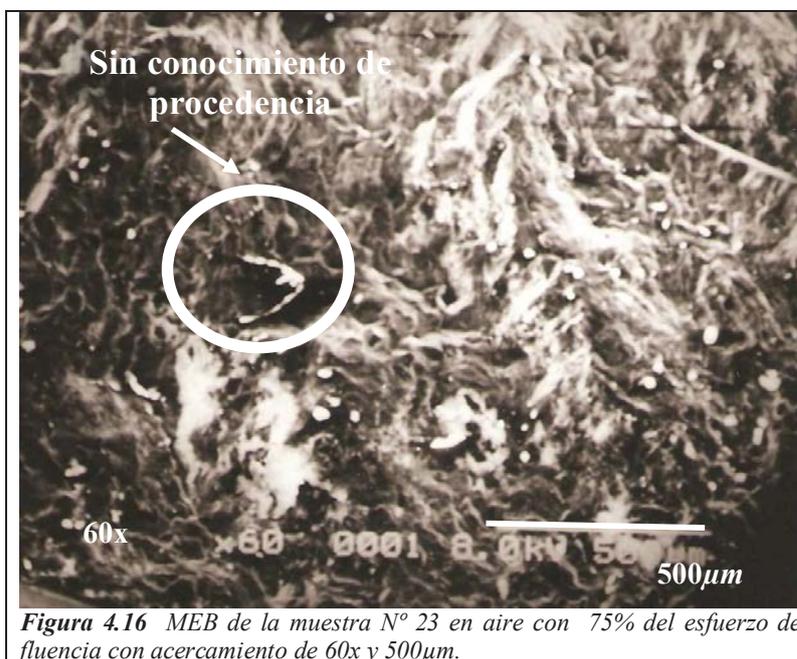
*Figura 4.14 Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 23 en aire con 75% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio*



En las Figuras 4.15 y 4.16 se presentan dos fotografías usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra N° 23 del ensayo de fatiga al aire a un 75% del esfuerzo de fluencia. En la Figura 4.15 se observa clivajes en la parte superior derecha. Presencia de objeto sin conocimiento de procedencia (se presume una viruta).



En la Figura 4.16 se observa zona dúctil hacia la parte inferior izquierda y frágil hacia la parte superior derecha.



*Figura 4.16* MEB de la muestra N° 23 en aire con 75% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 60x y 500μm.

#### 4.1.3.2. Fractografía de las muestras ensayadas en ácido nítrico al 15%

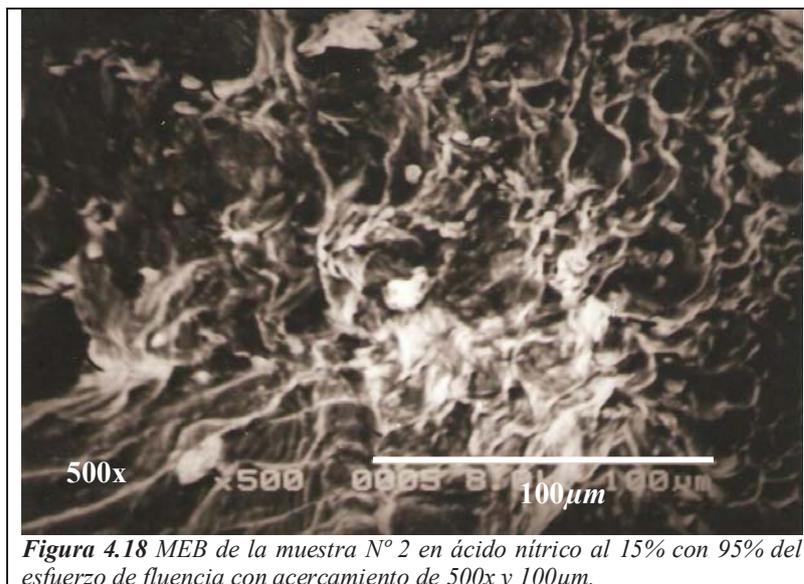
A continuación se muestra una serie de fotografías obtenidas con el microscopio electrónico de barrido a 95, 90, 85 y 75% del esfuerzo de fluencia, en probetas expuestas al ácido nítrico al 15%.

En la Figura 4.17 se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía corresponde a la muestra N° 2 en ácido nítrico al 15% con el 95% del esfuerzo de fluencia.



**Figura 4.17** Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 2 en ácido nítrico al 15% con 95% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio

En la Figura 4.18 se presenta la fotografía usando el microscópio electrónico de barrido a la muestra N° 2 del ensayo de fatiga en ácido nítrico al 15% con un 95% del esfuerzo de fluencia. Se observa zona mixta (dúctil-frágil), clivaje en la zona inferior izquierda. Presencia de hoyuelos en el borde derecho formados por el ataque corrosivo.



**Figura 4.18** MEB de la muestra N° 2 en ácido nítrico al 15% con 95% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 500x y 100µm.



En la Figura 4.19 se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía corresponde a la muestra N° 7 en ácido nítrico al 15% con el 90% del esfuerzo de fluencia.



**Figura 4.19** Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 7 en ácido nítrico al 15% con 90% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio

En la Figura 4.20 se presenta la fotografía usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra N°7 del ensayo de fatiga en ácido nítrico al 15% con un 90% del esfuerzo de fluencia en ella se observan grietas intergranulares debido al ataque del ácido en conjunto con el esfuerzo aplicado y zona dúctil hacia el borde de la muestra.



**Figura 4.20** MEB de la muestra N° 7 en ácido nítrico al 15% con 90% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 500x y 100 $\mu$ m.

En la Figura 4.21 se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía corresponde a la muestra N° 12 en ácido nítrico al 15% con el 85% del esfuerzo de fluencia.

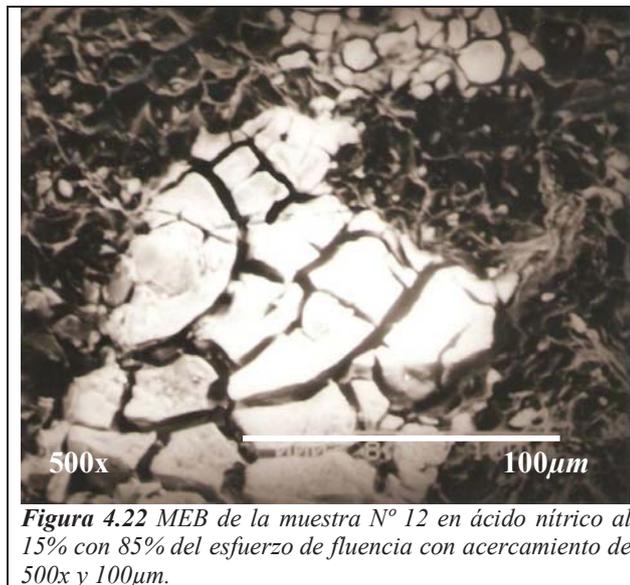


**Figura 4.21** Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 12 en ácido nítrico al 15% con 85% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio

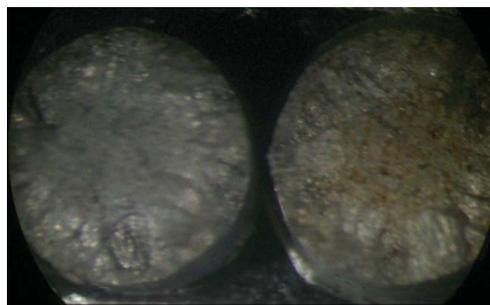
En la Figura 4.22 se presenta la fotografía usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra N° 12 del ensayo de fatiga en ácido nítrico al 15% con un



85% del esfuerzo de fluencia. Se observan hoyuelos hacia el borde (zona dúctil) y grietas intergranulares hacia el centro.



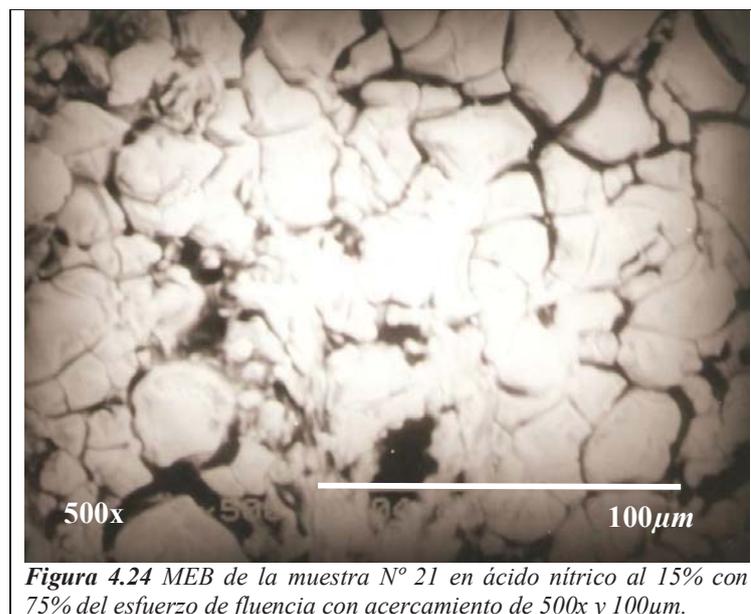
En la Figura 4.23, se muestra la superficie de fractura montada sobre el portamuestras para realizar la microscopía electrónica de barrido. Esta fotografía fue tomada con una cámara digital a través de un estereoscopio y corresponde a la muestra N° 21 en ácido nítrico al 15% con el 75% del esfuerzo de fluencia.



**Figura 4.23** Fotografía de la superficie de fractura de la muestra N° 21 en ácido nítrico al 15% con 75% del esfuerzo de fluencia tomada sobre el portamuestras con una cámara digital a través de un estereoscopio



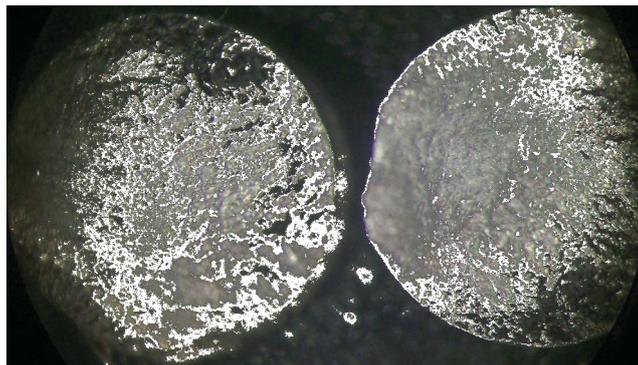
En la Figura 4.24 se presenta la fotografía usando el microscopio electrónico de barrido a la muestra N°21 del ensayo de fatiga en ácido nítrico al 15% con un 75% del esfuerzo de fluencia. Se observa una ausencia casi total de fractura dúctil. Esto dado a que el ácido atacó la aleación de aluminio de forma intergranular.



*Figura 4.24 MEB de la muestra N° 21 en ácido nítrico al 15% con 75% del esfuerzo de fluencia con acercamiento de 500x y 100µm.*

#### **4.1.3.3. Comparación de superficies de fractura para un mismo esfuerzo de fluencia aplicado**

En la Figura 4.11 la cual corresponde a ensayo en aire al 85% del esfuerzo de fluencia, se puede observar la zona mixta (dúctil-frágil), mientras que en la Figura 4.21 se puede observar que la superficie de fractura se hizo frágil debido al ataque corrosivo del ácido nítrico. De aquí se puede confirmar el porcentaje de reducción de vida útil arrojado.



**Figura 4.11**



**Figura 4.21**

Comparación de superficies de fractura donde la Figura 4.11 corresponde a un ensayo realizado en aire al 85% del esfuerzo de fluencia con presencia de zona mixta y la Figura 4.21 corresponde a un ensayo realizado en ácido nítrico al 15% con presencia de zona frágil en la mayoría de la superficie.



---

## 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Del estudio del comportamiento a la fatiga con corrosión en ácido nítrico al 15% de la aleación de aluminio 6063, se presenta a continuación el análisis de los resultados obtenidos.

- El número de ciclos en los ensayos de probetas de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15% disminuye entre 78.32 y 94.87% para un esfuerzo de 172.37 MPa y 136.08 MPa respecto a los ensayos realizados al aire. En la Figura 4.6 se muestra una curva comparativa entre las dos condiciones. Se observa claramente la manera como se reduce la vida de la aleación cuando es sometida al medio corrosivo.
- El estudio fractográfico realizado a través del Microscopio Electrónico de Barrido a las muestras ensayadas en ambas condiciones, detalla que las superficies de fractura de las muestras ensayadas a fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%, es de tipo frágil con agrietamiento intergranular como consecuencia de la inmersión en el medio corrosivo, ya que éste debilita sus granos y hace que la aleación falle terminando en la fractura. Esto no sucedió así en los ensayos en aire, los cuales resultaron superficies mixtas con puntos de clivajes, comunes en este tipo de aleación.
- Según datos arrojados en los ensayos de fatiga para ambos medios y el estudio fractográfico realizado a través del Microscopio Electrónico de Barrido, la aleación de aluminio 6063 no es apta para soportar cargas en este medio corrosivo (ácido nítrico al 15%). Su vida útil disminuye en un alto porcentaje cuando es sometido a fatiga de flexión rotativa. De someter ésta aleación a un porcentaje de ácido nítrico superior al



---

15%, podría ocurrir la fractura en un número de ciclos mucho menor al arrojado en ésta investigación, lo cual no favorece la aleación al momento de tener en cuenta la sustitución de cualquier metal.



---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan una serie de conclusiones y recomendaciones generadas luego del estudio de comportamiento a fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido nítrico al 15%.

### Conclusiones

1. El ácido nítrico como medio corrosivo, afecta la vida de fatiga de la aleación de aluminio 6063 reduciendo la misma entre un 78.32 y 94.87% para un esfuerzo de 172.37 MPa y 136.08 MPa con respecto a los ensayos realizados en aire. Este estudio se muestra que dicha aleación no es apta para ser sometido ante estos medios, ya que su resistencia a la fatiga disminuye considerablemente.
2. Mediante la Microscopía Electrónica de Barrido en superficies de fractura en aire, se hicieron observaciones esperadas donde se encuentran zonas mixtas (dúctiles-frágiles). Es casi imposible encontrar zonas en la superficie de fractura 100% dúctil o 100% frágil. Mientras que, en ensayos en ácido nítrico al 15%, hay presencia de ataque intergranular generado por el ataque corrosivo.
3. Mediante la Microscopía Electrónica de Barrido, la presencia de grietas pronunciadas fue un factor común entre las probetas ensayadas en ácido nítrico, lo cual es un indicativo de que esta solución al 15%, ataca de intensamente dicha aleación. Los granos se ven claramente separados y afectados por el ataque del medio corrosivo.



---

## Recomendaciones

1. Realizar un estudio de fatiga a la aleación de aluminio 6063 usando otros medios corrosivos como cloruro de sodio, entre otros, para hacer un análisis comparativo del ácido nítrico al 15% y su aumento o reducción de vida útil con otros medios.
2. Realizar un estudio de fatiga a la aleación de aluminio 6063 envejecida con diversos tratamientos térmicos, con el fin de ampliar el análisis de comportamiento a fatiga de dicha aleación.
3. Realizar un estudio de fatiga a la aleación de aluminio 6063 expuesto al ácido nítrico, con porcentajes por encima y por debajo del 15% y comparar los resultados.
4. Realizar una remodelación que acondicione el sitio de trabajo donde se encuentra la máquina de fatiga, activando el lavamanos, el aire acondicionado, entre otras cosas, para que así los tesistas en trabajos posteriores tengan mejores condiciones donde elaborar sus ensayos.
5. Realizar un estudio de fatiga a la aleación de aluminio 6063 expuesto al ácido nítrico al 15% con esfuerzos que alcancen gráficamente una tendencia estable. Esto para saber por medio de los números de ciclos cuánto esfuerzo fue necesario para la fractura en cada condición.
6. Se recomienda no dividir el número de ensayos de fatiga en números exactos, sino a medida que baja el esfuerzo aumentar el número de probetas a ensayar, ya que a menos esfuerzo es



---

necesaria mayor precisión dado a que la dispersión en este punto es mayor.

7. En el estudio fractográfico realizado a los ensayos en ácido nítrico, se observan grietas típicas de una fractura intergranular. Estas grietas debieran ser analizados a través de rayos x para observar que pasó realmente. Determinar si se debe a fractura intragranular, si hay precipitado de aluminio o si es una fractura intergranular.
8. Se debe atacar con otro medio para ver los granos y lo que ocurre a su alrededor, para así tener un análisis claro de lo sucedido en la superficie de fractura.



---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Libros:

1. Anglada, Sttaf, Llanes, Mateo, *Fractura de Materiales*. 1998.
2. ASM Aluminum Speciality Handbook, Ed<sup>a</sup> DAVIS and Co. 1993.
3. ASM Handbook, *Failure Análisis and Prevention*, Volumen 11. 9na edición, 1985.
4. ASM Handbook, *Mechanical Testing*, Volumen 8. 9na edición, 1985.
5. ASM Handbook, *Corrosion Fundamentals, testing and Protection*, volumen 13A. Ohio, 2003.
6. Collins J.A, *Failure of Materials in Mechanical Desing*, Jhon Wiley & Sons, 1981.
7. Corrosion Basics an Introduction, NACE, *L.S. Van Delinder Editor, Houston, 1984*.
8. Daroqui F., *Aleación 6063. Proyecto Especial de Procesos Metalúrgicos OEA-Cordiplan UCV-IUPEG*, 1986.
9. Handboook of Corrosion. 2da edición, *ASM Internationals, Materials Park, Ohio*, 1995.
10. Hatch John, *Aluminum Properties and Physical Metallurgy*, ASTM International, 1984.



- 
11. Jones Denny A., *Principles and Prevention of Corrosion*, Mc Millan Pub, 1992.
  12. Merizalde Carlos, *Estudio de la tenacidad de fractura de AA-6063*. Universidad Central de Venezuela. Agosto 2001.
  13. Patton, Rinaldy, Bréchet, Lormand, Fougères, *Study of Fatigue Damage in 7010 Aluminion Alloy*, Materials Science and Engineering, 1998.
  14. Sáenz, Laura, *Fundamentos y Aplicaciones en Ingeniería de Fluencia Lenta Fatiga*. Trabajo de ascenso, Universidad de Carabobo, Valencia. 1996.

**Páginas Web:**

15. <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>
16. <http://html.rincondelvago.com/aluminio.html>
17. <http://www.alu-stock.es/> (03/09/2007)
18. <http://www.barnabaycia.com/page/tecalu.php>
19. <http://www.extrudal.com/cat1.pdf>



## GLOSARIO

### Ácido nítrico

Es un líquido cuyo color varía desde incoloro a amarillo pálido, de olor sofocante. Se utiliza en la síntesis de otros productos químicos como colorantes, fertilizantes, fibras, plásticos y explosivos, entre otros. Es soluble en agua generándose calor. No es combustible pero puede acelerar el quemado de materiales combustibles y causar ignición. Es corrosivo de metales y tejidos. Si además contiene NO<sub>2</sub> disuelto, entonces se conoce como ácido nítrico fumante.

### Aluminio

Es un metal ligero, blando pero resistente, de color blanco brillante. Su densidad es aproximadamente un tercio de la del acero o el cobre. Es muy maleable y dúctil y es apto para el mecanizado y la fundición. Debido a su elevado estado de oxidación se forma rápidamente al aire una fina capa superficial de óxido de aluminio (Alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) impermeable y adherente que detiene el proceso de oxidación proporcionándole resistencia a la corrosión y durabilidad. Esta capa protectora, de color gris mate, puede ser ampliada por electrólisis en presencia de oxalatos. Cristaliza en red cúbica centrada en las caras (FCC).

Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio mediante electrólisis. [13]



---

## **Corrosión**

Es definida como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno.

## **Fallas**

Es cuando un cuerpo o elemento deja de cumplir el objetivo para el cual fue diseñado (considerando como cuerpos elementos de máquinas, vigas, piezas).

## **Fatiga**

Son las fallas ocasionadas por la aplicación de cargas variables o repetidas.

## **Fractografía**

Es el compendio de técnicas y métodos de interpretación para el análisis de superficies de fracturas y los instrumentos usados son: Microscopía óptica esteromicroscopio, microscopía óptica de transmisión y microscopía electrónica de barrido , siendo ésta última la más usada para análisis fractográficos.

De la fractografía, se puede obtener una información valiosa en el análisis de las roturas, tal como el modo de fracturas, el estado tensional, localizar el origen de una fractura o el lugar de iniciación de una grieta de fatiga, determinar la dirección de la propagación de fisuras, así como conocer con más detalle los mecanismos de fractura. [15]



---

## **Fractura**

Es la separación o fragmentación de un cuerpo sólido en dos o más partes bajo la acción de un esfuerzo. El proceso de fractura se puede considerar como el resultado de: Iniciación de la grieta y la propagación de la grieta.

## **Grieta**

Son todas las discontinuidades externas e internas de un material que puedan llevar a fractura (defectos externos, huecos, microhuecos, cavidades de fisuras, entallas, muescas, etc.)