



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE MECÁNICA



**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA  
ALEACIÓN DE ALUMINIO 6063 EN ACIDO SULFÚRICO AL  
5% Y AL 15%**

**AUTORES:**

Alzuru Pedro  
Marquez Engelberth

**TUTOR:**

Julio Silva

NAGUANAGUA, Diciembre 2008



UNIVERSIDAD DE CARABOBO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE MECÁNICA



**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA  
ALEACIÓN DE ALUMINIO 6063 EN ACIDO SULFÚRICO AL  
5% Y AL 15%**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA  
ILUSTRE UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL  
TITULO DE INGENIERO MECÁNICO

ALZURU PEDRO  
MÁRQUEZ ENGELBERTH



## ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	14
<b>CAPITULO 1</b> .....	16
<b>EL PROBLEMA</b> .....	16
<b>1.1 TITULO</b> .....	16
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	16
<b>1.2.1 FORMULACION DEL PROBLEMA</b> .....	18
<b>1.3 OBJETIVOS</b> .....	19
<b>1.3.1 OBJETIVO GENERAL</b> .....	19
<b>1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	19
<b>1.4 LIMITACIONES</b> .....	20
<b>1.5 DELIMITACIONES</b> .....	20
<b>1.6 JUSTIFICACIÓN</b> .....	21
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	22
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	22
<b>2.1 ANTECEDENTES</b> .....	22
<b>2.2 BASES TEÓRICAS</b> .....	24
<b>2.2.1 EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES</b> .....	24
<b>2.2.2 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DEL SISTEMA Al-Mg-Si</b> .....	28
<b>2.2.3 PROPIEDADES GENERALES DE LA ALEACIÓN 6063</b> .....	30
<b>2.2.4 EFECTO DEL SILICIO Y EL MAGNESIO EN LA ALEACIÓN</b> ...	32
<b>2.2.5 LA CORROSIÓN DE METALES NO FERROSOS</b> .....	32
<b>2.2.6 TIPOS DE CORROSIÓN</b> .....	33
<b>2.2.7 ACIDO SULFÚRICO</b> .....	37
<b>2.2.8 FATIGA DE METALES</b> .....	42
<b>2.2.9 ECUACIÓN DE BASQUIN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS</b> <b>GRÁFICAS S-N</b> .....	57
<b>2.2.10 EFECTOS DE LA SUPERFICIE</b> .....	58
<b>2.2.11 METALOGRAFÍA EN ALEACIONES DE ALUMINIO</b> .....	62
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	1
<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	1
<b>3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	1
<b>3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	1



---

3.2.1 ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	3
3.3.1 POBLACIÓN .....	3
3.3.2 MUESTRA.....	3
3.4 TIPO DE MUESTREO.....	3
3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	4
3.6 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	4
3.7 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	4
3.8 MATERIAL UTILIZADO.....	9
3.9 NORMAS USADAS PARA EL MECANIZADO DE LAS PROBETAS ..	10
3.10 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	11
3.11 ENSAYO DE FATIGA.....	15
3.11.1 MÉTODO DE LA ESCALERA.....	17
3.12 ENSAYO DE FATIGA EN UN MEDIO AMBIENTE CORROSIVO. ...	19
3.13 ACABADO SUPERFICIAL .....	19
3.14 METALOGRAFÍA. ....	19
3.15 FRACTOGRAFÍA.....	21
CAPITULO 4.....	23
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	23
4.1 ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL.....	23
4.2 RUGOSIDAD SUPERFICIAL .....	24
4.3 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	24
4.5 ENSAYO A FATIGA.....	27
4.6 ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO. ....	44
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES.....	59
REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS .....	61



---

## INTRODUCCIÓN

El efecto de la corrosión y la fatiga de equipos en la industria, genera numerosos problemas en las aplicaciones, afectando la continuidad funcional de las instalaciones y obligando a frecuentes intervenciones de mantenimiento y a la sustitución prematura de los componentes.

Las causas de la corrosión son numerosas, algunas de las cuales son más evidentes que otras. Soluciones adecuadas se logran con la utilización de nuevas técnicas de recubrimiento o el uso de metales como acero inoxidable y las aleaciones de aluminio que se caracterizan por su gran resistencia en medios ambientes corrosivos y su bajo costo.

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material extremadamente útil en ingeniería. El aluminio tiene una densidad baja que le confiere una utilidad particularmente importante para el transporte de productos manufacturados. El aluminio también tiene una buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos naturales debido a la película de óxido que se forma en su superficie; a pesar de que el aluminio puro tiene poca resistencia, puede ser aleado hasta una resistencia de aproximadamente 690 MPa.

En la siguiente investigación se realizara un estudio a la Aleación de Aluminio 6063, para observar que efecto tiene simultáneamente la acción mecánica por medio de cargas flexo – rotativas y la acción química por medio de acido sulfúrico de baja concentración en la resistencia a la fatiga de la aleación.



---

## AGRADECIMIENTOS

A DIOS como fuerza y estímulo que nos acompañó en todo momento en el desarrollo de nuestro trabajo.

A nuestras familias, amigos, compañeros de labores y demás personas cercanas que siempre tuvieron un oportuno aporte en el buen desempeño de nuestras actividades.

A los técnicos, profesores y demás trabajadores de la Universidad de Carabobo que suministraron su experiencia en la realización de todas y cada una de las etapas de nuestra investigación.



---

## **CAPITULO 1**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 TITULO**

Evaluación de la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en ácido sulfúrico al 5% y al 15%.

#### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La corrosión no es un hecho trivial, sino que a nivel mundial, viene a ser uno de los fenómenos más trascendentales en la economía de toda sociedad humana. En términos generales, de acuerdo con la Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos (Programa Regional Desarrollo Científico y Tecnológico) los perjuicios causados por la corrosión equivalen del 1.5 al 3.5% del Producto Nacional Bruto en numerosos países. [15]

Los ingenieros de diversas especialidades a nivel mundial están llamados a proyectar aparatos destinados a recibir productos cada vez más corrosivos y se encuentran ante el difícil problema de la elección de materiales apropiados. Es evidente que para la construcción de aparatos destinados a trabajar en ambientes corrosivos, la resistencia del metal a la acción del producto desempeña un papel predominante, interviniendo a menudo consideraciones de orden mecánico.

En los últimos años se ha visto una tendencia importante hacia el reemplazo del acero por aleaciones de aluminio, particularmente en aplicaciones donde el bajo peso



y la resistencia a la corrosión es importante, tal como en la industria del transporte aéreo, terrestre y marítimo, en la industria de sistemas automáticos, entre otros.

En general, las aleaciones de aluminio presentan débil dureza superficial, por otra parte, la acción mecánica y la acción química simultáneamente pueden conducir a fenómenos particulares de corrosión bajo esfuerzos, corrosión de fatiga, corrosión de frotamiento o de erosión.

Factores tales como la relación superficie/volumen, acabado superficial, cantidad y propiedades de los aleantes y defectos superficiales modifican la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio. La composición, volumen, localización y potencial de los microconstituyentes tienen también, una influencia directa en la cantidad, forma y distribución del ataque por corrosión.

Los ácidos clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico concentrado pueden atacar fácilmente al aluminio y a sus aleaciones, mientras que en soluciones de ácido nítrico, amoníaco y en la mayoría de ácidos orgánicos el aluminio reacciona ligeramente. La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución así como de la pureza del metal.

El ácido sulfúrico a temperatura ambiente, es un líquido casi transparente, de olor picante, levemente amarillo y muy corrosivo. Está formado por moléculas que tienen 2 átomos de hidrógeno (H), un átomo de azufre (S) y 4 átomos de oxígeno (O), es decir, que se puede representar químicamente como  $H_2SO_4$ .

El sulfúrico es el ácido mineral de uso más frecuente en la industria, y su consumo se utiliza como indicador del grado de industrialización de un país. Este ácido es un producto que directa o indirectamente está presente en toda industria.

Los principales usos del ácido sulfúrico son:



- 
- Producción de superfosfato de calcio (fertilizantes).
  - Potabilización de agua.
  - Detergentes: En la sulfonación de dodecilbenceno, que es la materia prima básica para la mayoría de los detergentes utilizados en el hogar y la industria. También para esto se utiliza óleum 22%.
  - Fábricas de Papel: En el proceso de producción de la pulpa de papel, e indirectamente en el uso de sulfato de aluminio. Este también se utiliza en la depuración de aguas residuales y en la potabilización.
  - Agro-Fito Sanitario: En la producción de sulfato de cobre.
  - Refinación de Petróleo: Para las calderas y procesos químicos.
  - Generación térmica de energía: Para el tratamiento de las calderas.
  - Metalurgia: Para el decapado de metales.
  - Producción de ácido para baterías eléctricas.
  - Producción de sulfato de aluminio: Se lo utiliza en reacción con hidróxido de aluminio. El sulfato de aluminio producido se utiliza principalmente en potabilización de aguas, curtidos al alumbre (*curtiembres*), producción de papel y sales de aluminio.
  - Producción de sulfato de cromo: se lo utiliza en reacción con bicromato de potasio y un agente reductor. El sulfato de cromo se utiliza principalmente para el curtido de cueros (curtido al cromo).

### 1.2.1 FORMULACION DEL PROBLEMA

¿ Que efecto tiene simultáneamente la acción mecánica por medio de cargas flexo-rotativas y la acción química por medio de ácido sulfúrico de baja concentración en la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063?



---

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063 en un medio de ácido sulfúrico al 5% y al 15%.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar el ensayo de fatiga en condiciones de flexión rotativa a la probeta de aleación de aluminio 6063 entallada bajo norma ASTM-E606 en un medio de ácido sulfúrico al 5% .
2. Realizar el ensayo de fatiga en condiciones de flexión rotativa a la probeta de aleación de aluminio 6063 entallada bajo norma ASTM-E606 en un medio de ácido sulfúrico al 15% .
3. Realizar el ensayo de fatiga en condiciones de flexión rotativa a la probeta de aleación de aluminio 6063 entallada bajo la norma ASTM-E606 en un medio ambiente.
4. Realizar un estudio fractográfico de la superficie de fractura de la probeta de aleación de aluminio 6063.
5. Determinar la influencia del ácido sulfúrico al 5% y al 15% en la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio 6063.



---

## 1.4 LIMITACIONES

Para la realización de esta tesis se tomarán en cuenta las siguientes limitaciones:

1. Maquinado de las probetas.
2. Disponibilidad de los equipos para la realización de los ensayos.
3. Disponibilidad horaria y humana de los laboratorios.

## 1.5 DELIMITACIONES

1. Se realizará estudio de fatiga en condiciones de flexión rotativa a la aleación de aluminio 6063.

2. Las probetas de aleación de aluminio 6063 entalladas se regirán por la norma ASTM-E606.

3. Se realizará un análisis fractográfico de la superficie de fractura por medio de una microscopía electrónica de barrido.

4. El medio a usar es ácido sulfúrico al 5%, ácido sulfúrico al 15% y el medio ambiente.

5. Se realizarán una cantidad de 25 probetas para el ensayo con ácido sulfúrico al 5%, 25 probetas para el ensayo con ácido sulfúrico al 15% y 25 probetas para el ensayo en el medio ambiente.



---

## 1.6 JUSTIFICACIÓN

En este trabajo de investigación se estudiarán los valores de fatiga en un medio corrosivo de la aleación de aluminio 6063, con la finalidad de conocer su comportamiento ante estos fenómenos y poder así suministrar una amplia base de datos para trabajos posteriores en el área, de manera que se pueda ampliar el uso de esta aleación en la industria en general.

Un uso que se le podría dar a esta aleación es la fabricación de actuadores neumáticos que trabajan en ambientes corrosivos, ya que ellos son usados en aplicaciones donde el bajo peso y la resistencia a la corrosión son importantes, así como también para la fabricación de pistones para las bombas de desplazamiento positivo que manejan sustancias corrosivas.



---

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan tanto los antecedentes de la investigación, como las bases teóricas de los términos y definiciones que se considera importante conocer para el correcto desempeño y comprensión de este proyecto.

#### 2.1 ANTECEDENTES

J.G La Barbera Sosa y otros, Universidad Central de Venezuela (2002), *Comportamiento a la fatiga de la Aleación de Aluminio 6063 envejecidas*. En este trabajo se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento a la fatiga y corrosión-fatiga, en condiciones de flexión rotativa, de la aleación de aluminio 6063 con tratamiento de envejecimiento. Se realizaron ensayos de fatiga tanto al aire como en condiciones corrosivas, empleando para este último propósito una solución de NaCl al 3% en peso.

C. Merizal de Rodríguez y otros, Universidad Central de Venezuela (2002), *Estudio sobre propagación de grietas de fatiga en una aleación comercial de Aluminio AA-6063-T6*. Se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento a la fatiga de una aleación comercial de aluminio del tipo AA-6063-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 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 ( $a_c$ ) 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,  $K_f$ , encontrándose que la aleación de aluminio investigada presenta una baja sensibilidad tanto a la presencia de entallas, como al tamaño de las mismas.

Merizal de Rodríguez, Carlos F, Universidad Central de Venezuela, (2001), *Estudio de la tenacidad de fractura de la aleación de aluminio 6063*, En el trabajo se realizó el estudio de la propagación de las grietas por fatiga en una aleación de aluminio, para lo cual se determinaron una serie de valores y datos experimentales, así como, la medición del tamaño de grieta crítica en la superficie de fractura.

De Frenza M José, Leañes N Mariolis (2005) *Evaluación de la tenacidad de impacto de las aleaciones de aluminio 6063 y 8011 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento*. Universidad De Carabobo, Valencia, Venezuela. En el trabajo se llevó a cabo un estudio sobre el comportamiento de la tenacidad de impacto según la relación propuesta por Rolfe-Novak-Barson de las aleaciones de aluminio AA-6011 y AA-6063 sometidas a un tratamiento térmico de envejecimiento. A dichas aleaciones se les realizó un tratamiento térmico de homogeneización, para luego someter las muestras a un envejecimiento en tres (3) tiempos diferentes para una misma temperatura de permanencia en el horno; para la aleación AA-8011 se homogeneizó a una temperatura de 620°C por 24 horas, el envejecimiento se realizó a temperatura constante de 425°C en tiempos de dos (2), tres (3), y cinco(5) horas; para la aleación AA-6063 se homogeneizó a una temperatura de 550°C en tiempos de una (1), tres (3), y cinco(5) horas, para obtener un total de cinco (5) condiciones de trabajo para cada aleación, las cuales fueron estudiadas mediante ensayos de tracción, charpy y dureza. Una vez obtenidos los resultados de estos ensayos, se determinó las propiedades mecánicas de resistencia (esfuerzo de fluencia máximo y ruptura), deformación en ingeniería, dureza y tenacidad de impacto, obteniéndose como principales conclusiones: que el tratamiento térmico de homogeneización es necesario para poder lograr una microestructura organizada de la matriz, eliminando la



deformación previa del material en su proceso de fabricación. En la aleación AA-8011 se lograron obtener excelentes resultados en la energía absorbida por impacto para el mayor tiempo de envejecimiento estudiado, siendo éste en un 3% mayor que en la condición homogeneizada y un 92% que la condición original. Para la aleación AA-6063 se presenta menor susceptibilidad al tratamiento térmico de envejecimiento, ya que la mayor energía absorbida por impacto alcanzada fue un 53% mayor a la condición original y un 2% mayor que en la condición homogeneizada.

## **2.2 BASES TEÓRICAS**

El aparte que se desarrolla a continuación establece las características principales de la aleación de aluminio 6063, también se hace referencia a la corrosión y fatiga de los metales no ferrosos, en específico de las aleaciones de aluminio.

### **2.2.1 EL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES**

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferroso. 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]

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad ( $2.700 \text{ kg/m}^3$ ) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad, se



---

mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es el metal que más se utiliza después del acero. [13]

Desde el punto de vista físico, el aluminio puro posee una resistencia muy baja a la tracción y una dureza escasa. En cambio, unido en aleación con otros elementos, el aluminio adquiere características mecánicas muy superiores. [13]

Son también importantes los diversos tipos de aleaciones llamadas anticorodal, a base de aluminio (Al) y pequeños aportes de Magnesio (Mg) y Silicio (Si). Pero que pueden contener a veces Manganeso (Mn), Titanio (Ti) y Cromo (Cr). A estas aleaciones se las conoce con el nombre de *avional*, *duralinox*, *silumin*, *hidronalio*, *peraluman*, etc. [13]

Como hay distintas composiciones de aluminio en el mercado, es importante considerar las propiedades que éstas presentan, pues, en la industria de la manufactura, unas son más favorables que otras. [13]

Los principales elementos aleantes del aluminio son los siguientes y se enumeran las ventajas que proporcionan.

- **Cromo (Cr)** Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.
- **Cobre (Cu)** Incrementa las propiedades mecánicas pero reduce la resistencia a la corrosión.
- **Hierro (Fe)**. Incrementa la resistencia mecánica.
- **Magnesio (Mg)** Tiene alta resistencia tras el conformado en frío.
- **Manganeso (Mn)** Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.
- **Silicio (Si)** Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.
- **Titanio (Ti)** Aumenta la resistencia mecánica.



- **Zinc (Zn)** Reduce la resistencia a la corrosión. [13]

### **Aleaciones de aluminio forjado sin tratamiento térmico**

Las aleaciones que no reciben tratamiento térmico solamente pueden ser trabajadas en frío para aumentar su resistencia. Hay tres grupos principales de estas aleaciones según la norma AISI-SAE que son los siguientes:

- **Aleaciones 1xxx.** Son aleaciones de aluminio técnicamente puro, al 99,9% siendo sus principales impurezas el hierro y el silicio como elemento aleante. Se les aporta un 0.12% de cobre para aumentar su resistencia. Tienen una resistencia aproximada de 90 MPa. Se utilizan principalmente par trabajos de laminados en frío.
- **Aleaciones 3 xxx.** El elemento aleante principal de este grupo de aleaciones es el manganeso (Mn) que está presente en un 1,2% y tiene como objetivo reforzar al aluminio. Tienen una resistencia aproximada de 16 ksi (110MPa) en condiciones de recocido. Se utilizan en componentes que exijan buena mecanibilidad.
- **Aleaciones 5xxx.** En este grupo de aleaciones es el magnesio es el principal componente aleante su aporte varía del 2 al 5%. Esta aleación se utiliza cuando para conseguir reforzamiento en solución sólida. Tiene una resistencia aproximada de 28 ksi (193MPa) en condiciones de recocido. [13]

### **Aleaciones de aluminio forjado con tratamiento térmico**

Algunas aleaciones pueden reforzarse mediante tratamiento térmico en un proceso de precipitación. El nivel de tratamiento térmico de una aleación se



---

representa mediante la letra T seguida de un número por ejemplo T5. Hay tres grupos principales de este tipo de aleaciones.

- **Aleaciones 2xxx:** El principal aleante de este grupo de aleaciones es el cobre (Cu), aunque también contienen magnesio Mg. Estas aleaciones con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 64ksi (442 MPa) y se utiliza en la fabricación de estructuras de aviones.
- **Aleaciones 6xxx.** Los principales elementos aleantes de este grupo son magnesio y silicio. Con unas condiciones de tratamiento térmico T6 alcanza una resistencia a la tracción de 42 ksi (290MPa) y es utilizada para perfiles y estructuras en general.
- **Aleaciones 7xxx.** Los principales aleantes de este grupo de aleaciones con cinc, magnesio y cobre. Con un tratamiento T6 tiene una resistencia a la tracción aproximada de 73 ksi(504MPa) y se utiliza para fabricar estructuras de aviones. [13]

Las aleaciones Al Mg Si, serie 6xxx según designación de Aluminum Association, constituye el grupo mas importante destinado a la extrusión de tubos, barras, cables y perfiles abiertos de variadas formas. En este rubro, los porcentajes de utilización varían de acuerdo a las características de cada país, pero en general, a extrusión se destina entre un 10 y 25 % del consumo total. [13]

Dentro de es grupo, dos aleaciones destacan la 6061 y la 6063, la primera por sus propiedades mecánicas y la segunda por su volumen de producción. Los límites de composición química se detallan en la tabla 2.1. [13]



Tabla 2.1, Composición química según Aluminum Association.

	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Mn	Cr	Zr
6061	0.4	0.8	0.7	0.15	0.15	0.15	0.04	0.25
	0.8	1.2		0.4			0.35	
6063	0.2	0.45	0.35	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	0.6	0.9						

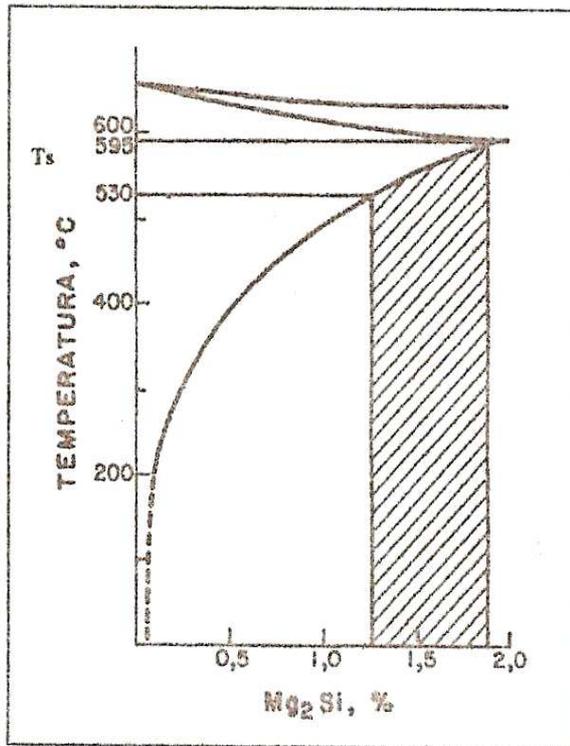
Entre las características más importantes de la aleación 6063, puede citarse su gran formabilidad, ya que permite velocidades de extrusión de 40-60 m / min., una excelente resistencia a la corrosión bajo tensiones tanto en ambientes industriales como en agua de mar. [13]

### 2.2.2 DIAGRAMA DE EQUILIBRIO DEL SISTEMA Al-Mg-Si

La composición química de la aleación 6063, debe ser analizada a partir del diagrama de equilibrio del sistema ternario AlMgSi, éste en la región rica en aluminio, presenta un campo bastante extenso de solubilidad sólida, que proviene de la solubilidad del Mg y Si en forma separada. [9]

Debido a la gran afinidad química de Mg y Si para formar el compuesto  $Mg_2Si$  (63,4 Mg – 36,6 Si) se forma estructura cúbica, grupo espacial  $Fm\ 3\ m$ , 12 átomos por celda unidad y parámetro de red  $a = 6,35 - 6,40 \times 10^{-10}$  m. [9]

Para la relación  $Mg/Si = 1,73$  el sistema se comporta como un cuasi – binario Al –  $Mg_2Si$  con un eutéctico en 12.9 %  $Mg_2Si$  (8,15 % Mg – 4,75 % Si) con una temperatura de solidificación de 595 °C. (Ver Fig. 2.1)



Temp. °C Sol.	Mg <sub>2</sub> Si % en peso.
595	1.85
500	1.05
400	0.53
300	0.30
200	0.27

**Fig. 2.1,** Cuasi - Binario Al + Mg<sub>2</sub>Si ; corte del sistema ternario para la relación Mg/Si = 1,73, la región rallada corresponde al intervalo de composición de la 6063 según especificaciones de Aluminium Association. [9]



### 2.2.3 PROPIEDADES GENERALES DE LA ALEACIÓN 6063

Tabla 2.2, Propiedades más sobresalientes de la aleación 6063. [6]

Tratamiento térmico	Propiedades mecánicas				Eléctricas		Térmicas		
	Rm		R-0,2	(e)	HB	Conduc.	Resist.	Conduc.	$\alpha$
	min.	máx.	min.	min.	Kg./mm <sup>2</sup>	A 20 °C		A 25 °C	20 - 100 °C
	Kg. / mm <sup>2</sup>			%		%IACS	$\mu\Omega\text{cm}$	CGS	X10 <sup>-6</sup>
<b>0</b>		<b>13,5</b>		<b>18</b>	<b>25</b>	<b>58</b>	<b>3,0</b>	<b>0,52</b>	<b>23,4</b>
<b>T4</b>	<b>13,5</b>		<b>6,9</b>	<b>14</b>	<b>42</b>	<b>50</b>	<b>3,5</b>	<b>0,46</b>	<b>23,4</b>
<b>T5</b>	<b>15,2</b>		<b>11,0</b>	<b>8</b>	<b>60</b>	<b>55</b>	<b>3,2</b>	<b>0,50</b>	<b>23,4</b>
<b>T6</b>	<b>20,7</b>		<b>17,2</b>	<b>8</b>	<b>73</b>	<b>53</b>	<b>3,3</b>	<b>0,48</b>	<b>23,4</b>

Cuando el dígito es “0”, el material se encuentra en condiciones originales. Como lo muestra la tabla 2.2, en donde se visualiza algunas propiedades de los principales tratamientos térmicos realizados a esta aleación.

6063-T4.

Solubilizado y envejecido naturalmente a una condición estable. Se aplica a productos que no van a ser trabajados en frío luego del solubilizado o cuando el efecto del trabajo en frío por estirado no tiene influencia en los límites de sus propiedades mecánicas. Resumiendo: solubilizado y envejecido naturalmente. [9]

6063-T5.

Enfriado luego de un proceso de deformación realizado a alta temperatura y envejecido artificialmente. Se aplica a productos que no van a ser trabajados en frío luego del enfriado o a los que el efecto del trabajado en frío por estirado no tiene



---

influencia en los límites de sus propiedades mecánicas. En resumen: parcialmente solubilizado y envejecido artificialmente. .[9]

6063-T6.

Solubilizado y envejecido artificialmente. Se aplica a productos que no van a ser trabajados en frío luego del solubilizado o cuando el efecto del trabajo en frío por estirado no tiene influencia en los límites de sus propiedades mecánicas. Resumen: solubilizado, luego envejecido naturalmente.[9]

En la actualidad las aleaciones de la serie 6000 constituye el grupo mas importante destinado a la industria extrusora de aluminio, a nivel mundial el 80 % de las aleaciones empleadas en el sector de la extracción pertenecen al serie 6000, siendo la aleación de aluminio 6063 la mas destacada por su gran volumen de producción en nuestro país, esta 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.
- Y en la industria en general.

Las aleaciones a base de cobre como el bronce o el latón, el aluminio y el titanio son los materiales no ferrosos de empleo más frecuente, después de las aleaciones a base de níquel para las bombas. .[9]



---

#### 2.2.4 EFECTO DEL SILICIO Y EL MAGNESIO EN LA ALEACIÓN

El silicio es el aleante principal de uso mas generalizado en la elaboración de piezas fundidas, los efectos mas notables que produce en el aluminio son: marcada mejora en la colabilidad, disminución del coeficiente de dilatación a medida que crece su concentración, aumento de la resistencia al desgaste, una razonable resistencia a la corrosión, en compañía del Cu y Mg otorga buenas propiedades mecánicas, en composición de 5 – 8 % las aleaciones Al-Si son fácilmente soldables y presentan buenas condiciones de estanqueidad en piezas que deben encerrar fluidos.

El Mg es incorporado habitualmente como aleante secundario en porcentajes del orden del 1% en las aleaciones Al-Si para mejorar las propiedades mecánicas de éstas al formar el compuesto endurecedor  $Mg_2Si$ . [6]

#### 2.2.5 LA CORROSIÓN DE METALES NO FERROSOS

La corrosión de un metal o aleación es definida como el deterioro de dicho material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal y las propiedades de los metales en cuestión. Otros materiales no metálicos también sufren corrosión mediante otros mecanismos. [15]

La corrosión de los metales es un fenómeno natural que ocurre debido a la inestabilidad termodinámica de la mayoría de los metales. En efecto, salvo raras excepciones (el oro, el hierro de origen meteorítico) los metales están presentes en la Tierra en forma de óxido, en los minerales (como la bauxita si es aluminio, la hematita si es hierro...). Desde la prehistoria, toda la metalurgia ha consistido en



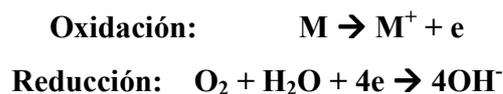
reducir los óxidos en bajos hornos, luego en altos hornos, para fabricar el metal. La corrosión, de hecho, es el regreso del metal a su estado natural, el óxido. [15]

### 2.2.6 TIPOS DE CORROSIÓN

**La corrosión generalizada** es el proceso más común entre la mayoría de los metales y aleaciones. Se puede presentar cuando se utilizan ácidos minerales para la eliminación de incrustaciones salinas en industria láctea o cervecera. El ácido sulfúrico y clorhídrico pueden generar deterioro superficial y generalizado a muy bajas concentraciones produciendo un deterioro de la superficie de los metales. [16]

**La corrosión por grietas o fisura** Esta forma de corrosión se caracteriza por un intenso ataque localizado en grietas expuestas a agentes corrosivos como los compuestos clorados. Este proceso es normalmente asociado al estancamiento de pequeños volúmenes de solución causadas por perforaciones en empaquetaduras, juntas labiales, defectos superficiales o grietas bajo pernos u otros elementos de sujeción. [16]

El fenómeno de corrosión es un proceso electrolítico donde se produce la migración de material metálico en presencia de una solución (electrolito). El mecanismo básico de corrosión por grietas (crevice corrosión), considera un metal M en contacto con una solución salina, en presencia de oxígeno. En este proceso se produce la disolución del metal M y la reducción de iones de oxígeno e hidrógeno. [16]





---

**La corrosión por picaduras (Pitting)** La corrosión por pitting es la disolución localizada y acelerada de un metal, esto como resultado de la ruptura de la película de óxido. Muchas aleaciones como el acero inoxidable y aleaciones de aluminio, son útiles porque producen en forma espontánea una película pasivada de óxido, la cual reduce en forma importante la tasa de corrosión. Sin embargo estas películas son a menudo susceptibles a la ruptura localizada, lo que da como resultado una acelerada disolución de metal. Si el ataque se inicia en una superficie abierta, se llama corrosión por picaduras, esta forma de corrosión puede producir fallas estructurales en componentes por perforación y por debilitamiento. [16]

**La corrosión bajo tensión (Stress Corrosión Cracking, SCC)** Es otro tipo de corrosión localizada, se reconoce por la presencia de fracturas de la estructura metálica. La morfología de este tipo de corrosión es muy característica, en la superficie del metal se producen fisuras muy pequeñas de forma ramificada. La cantidad de ramificaciones tiene directa relación con la concentración del medio corrosivo y el nivel de tensiones del metal. [16]

Muchas aleaciones experimentan agrietamiento en ciertos medios corrosivos cuando están sometidas a fuerzas externas o tensiones residuales. La tensión puede ser bastante inferior al esfuerzo mínimo de deformación permanente. Aunque la corrosión, antes de que el metal sea sometido a condiciones de fatiga, reduce la tensión que el metal pueda resistir, la acción simultánea de la corrosión y fatiga tienen frecuentemente un efecto marcadamente mayor.

**La fatiga por corrosión** implica un deterioro mayor en las propiedades mecánicas del metal a través de la acción simultánea de la tensión alternativa y la exposición al medio ambiente corrosivo, que la que tendría lugar por medio de la acción separada, pero aditiva, de esos agentes. Las condiciones más sencillas de fatiga se obtienen cuando la tensión media es cero, cuando existe un esfuerzo de tracción o compresión



muy marcado, dicho esfuerzo puede influir también en la rotura, y con algunos metales ésta puede deberse a la combinación de la corrosión por tensión y la fatiga por corrosión, especialmente si la tensión media es de tracción.

En las condiciones de fatiga por corrosión son muy importantes los factores siguientes:

1. La magnitud de la tensión alternativa.
2. La magnitud de la tensión media.
3. La naturaleza y severidad de las condiciones de la corrosión.
4. La frecuencia de los cambios de sentido de la tensión.
5. Las características del metal. [16]

**La corrosión intergranular** La corrosión intergranular se produce en los límites de grano de una aleación. Un caso típico es el del acero inoxidable AISI 304 (18 % Cr; 8% de Ni) que contiene 0.06 a 0.08 % de carbono, estos aceros son calentados o enfriados lentamente dentro del rango de temperaturas de 500 a 800 °C (rango de sensibilizado). En ese intervalo de temperaturas los carburos de cromo pueden precipitar en los límites de grano con lo que se llega a la condición de acero sensibilizado. Las regiones adyacentes a los límites de grano se empobrecen de cromo. El nivel de cromo puede descender por debajo de 12 % (mínimo necesario para el comportamiento pasivo). Estas áreas de bajo contenido en cromo se convierten en ánodos respecto al resto de las partículas de grano que son los cátodos. [16]

A continuación se muestra de la Fig. 2.2, una representación esquemática de varios tipos de corrosión.

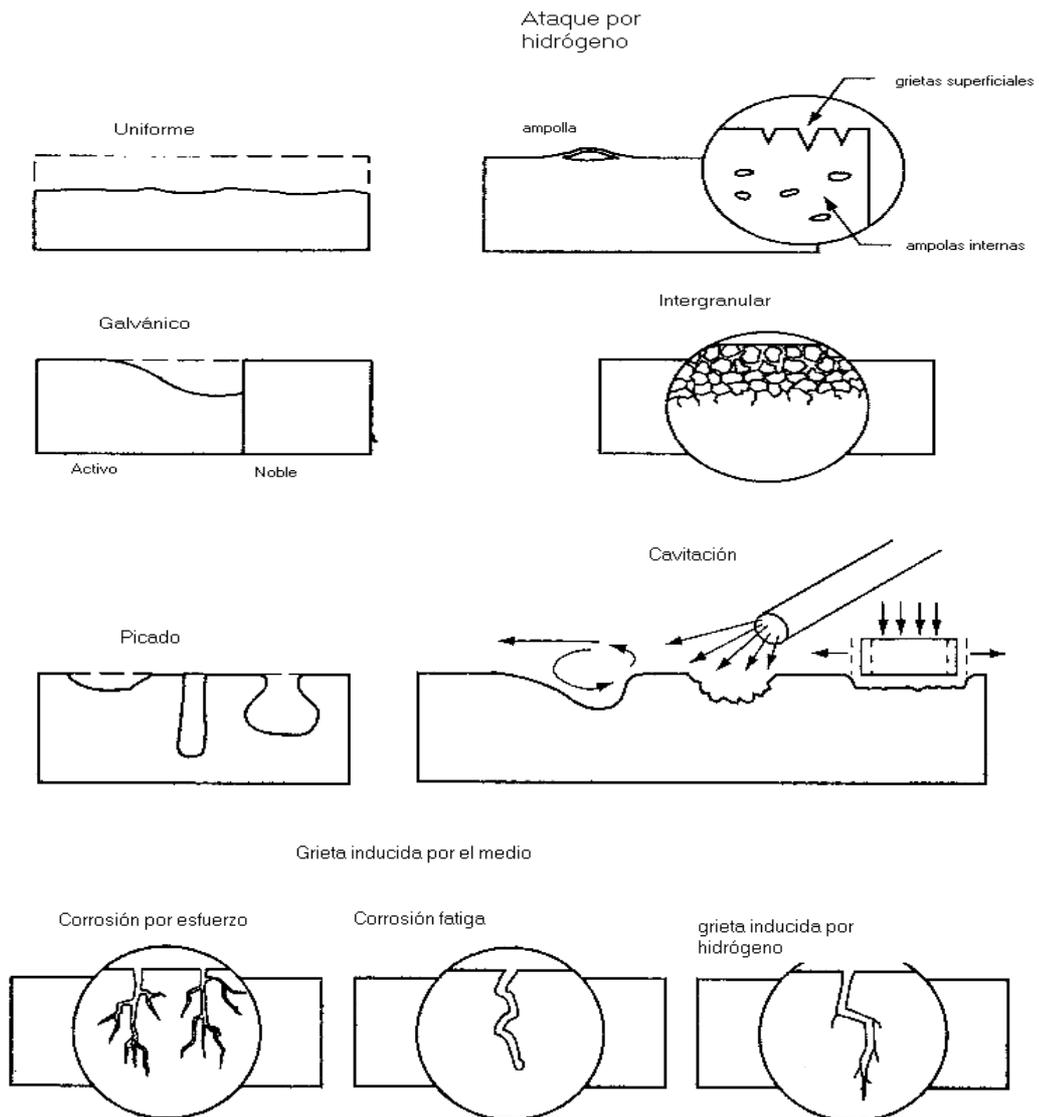


Fig. 2.2, Tipos de corrosión. [14]



---

### 2.2.7 ACIDO SULFÚRICO

El ácido sulfúrico es uno de los químicos industriales más importantes. Es de gran significado, la observación que frecuentemente se hace, que es un índice del desarrollo técnico de una nación. El ácido sulfúrico es importante en casi todas las industrias, y es usada ampliamente en la manufactura de fertilizantes superfosfatos, sales sulfatadas, celofán, rayón, detergentes, ácido clorhídrico, ácido nítrico, tintes, pigmentos, explosivos, refinación de petróleo, en el almacenaje de baterías, en el tratamiento de agua industrial, y en el blanqueado de minerales. [17]

El ácido sulfúrico fue producido por primera vez aproximadamente en el año 1000 de la era cristiana. Por 18 siglos, el ácido sulfúrico fue preparado por el quemado de salitre con azufre. En el siglo XVIII y XIX, este fue esencialmente producido por una cámara procesadora en la cual el óxido de nitrógeno era usado como un catalizador homogéneo para la oxidación del óxido de azufre. El producto hecho por este proceso era de baja concentración, no era lo suficientemente alto para los muchos usos comerciales. [17]

Durante la primera mitad del siglo XIX, la cámara procesadora fue gradualmente reemplazada por el proceso de contacto, y ahora el método anterior es considerado obsoleto. En 1915, un efectivo catalizador de vanadio fue desarrollado para el proceso de contacto. Este tipo de catalizador fue empleado en los Estados Unidos. El catalizador de vanadio tiene la ventaja de una resistencia superior a la intoxicación y de ser relativamente abundante y barata comparado con el platino. Después de la segunda guerra mundial, el tamaño típico de las plantas que realizaban el proceso de contacto se incrementó drásticamente alrededor del mundo suministrando un rápido incremento de la demanda de la industria de fertilizantes de fosfatos. [17]



En el año de 1963, se desarrolla el primer proceso de doble absorción en gran escala. En este proceso, el gas  $\text{SO}_2$  que ha sido parcialmente convertido en  $\text{SO}_3$  por medio del catalizador es refrigerado, pasa a través del ácido sulfúrico para remover  $\text{SO}_3$  recalentado, y luego es pasado a través de una o dos cámaras catalizadores. Por este método, la conversión total puede ser incrementada desde el 98% al 99.5-99.8%, por consiguiente reduciendo la emisión del  $\text{SO}_2$  convertido a la atmósfera. [17]

El proceso de contacto ha sido mejorado en todo detalle y es ahora una de las industrias de bajo costo, con un proceso automático continuo. Todas las nuevas plantas de ácido sulfúrico usan el proceso de contacto. Las pocas plantas de pequeña capacidad emplean la cámara de procesamiento que representa el 5% de las plantas de ácido sulfúrico. [17]

**Proceso de elaboración de ácido sulfúrico.** Resulta difícil creer que un producto químico tan reactivo como el ácido sulfúrico es, al mismo tiempo, uno de los productos técnicos que mas se utilizan y uno de los más importantes. Es el agente para la formación de sulfatos y para la sulfonación, pero se emplea con más frecuencia por que es un ácido inorgánico bastante fuerte y barato. Se utiliza en muchas industrias, aunque no es frecuente que aparezca en los productos terminados. Se emplea en la producción de fertilizantes, cueros y hojalata, en la refinación del petróleo y en el teñido de telas. [17]

Existen dos métodos de obtención, el de las cámaras de plomo y el de contacto. El primero ya prácticamente solo se utiliza en plantas residuales y usa como catalizadores los óxidos de nitrógeno. La concentración del ácido obtenido no llega a concentraciones mayores al 76%. [17]

El método de contacto produce ácido fumante con el 25% de anhídrido sulfúrico, obteniéndose como ácido final el de 98,5% diluyéndose posteriormente para conseguir la concentración deseada. [17]



Dada la alta concentración del ácido, se puede utilizar en su fabricación materiales como el acero normal, aceros especiales y fundiciones grises, así como plásticos. Este método tiene la gran ventaja de ser un proceso continuo altamente mecanizado con el que se puede conseguir un elevado ritmo de fabricación. [17]

**Método de contacto.** Es el mejor método para producir el ácido entre el 75 % y el 80%. El dióxido de azufre se oxida directamente con oxígeno de aire en un catalizador (vanadato de potasio sobre óxido de silicio como soporte) y con desprendimiento de calor:



La reacción es reversible por que el trióxido se descompone por encima de los 600°C que es la temperatura mínima de trabajo del catalizador y por lo tanto la que hay que emplear es de por lo menos 400°C. En la práctica se opera a temperaturas de entre 400 y 550 °C. [17]

**Obtención del dióxido de azufre.** Se puede obtener de la combustión de azufre en hornos rotatorios con abundante entrada de aire (sí se tiene en abundancia, como es el caso de USA). Si no se tiene disposición de azufre puro, entonces se hace uso de la tostación de minerales sulfurados, en la que se obtiene gran cantidad de SO<sub>2</sub>, principalmente se emplea pirita (FeS<sub>2</sub>) como materia prima. [17]

El proceso de tostación se lleva a cabo en diferentes tipos de horno. El proceso es altamente exotérmico; por cada tonelada de azufre que se quema se pueden producir 2 toneladas de vapor. La alimentación del horno es continua. También pueden usarse hornos de pisos. [17]



También se puede obtener dióxido de azufre por tostación en lecho fluido, que se hace en una vasija cilíndrica de acero, revestida de material refractario, se pone el material a tostar sobre una parrilla de malla muy fina y en cuanto se enciende la pirita se sopla desde abajo una fuerte corriente de aire que, de una parte, mantiene la combustión y de otra levanta los finos granos de pirita y los mantiene flotando. De esta manera, la pirita queda rodeada de aire por todas partes y se quema rápida y completamente. [17]

**Purificación del gas.** Es preciso purificar el dióxido de azufre bruto. Una purificación simple se puede hacer en las cámaras de polvo (eliminando el 50%), en la que la corriente de gas se frena súbitamente y las partículas de polvo se depositan en la superficie de la cámara. Un mejor tratamiento lo da el ciclón, posibilitando la eliminación del 80%. Y todavía mejor eliminación de impurezas con el método electrostático (filtro electrostático), así también más complejo y costoso, asegura que no haya venenos que puedan afectar el catalizador que se va a utilizar enseguida. En el método de cámaras solo se necesita una purificación simple, pero en el de contacto es necesario un filtro electrostático. [17]

**Oxidación.** Tiene lugar en el horno de contacto, estos se construyen de diversos modos. Existen hornos de contactos tubulares, en los que el catalizador se carga en tubos que se disponen concéntricamente en el espacio disponible. El gas de tostación sube lamiendo primero la pared exterior de los tubos y una vez calentado penetra en el interior de ellos y hace contacto con el vanadato de potasio o con el pentóxido de vanadio. Otros hornos tienen parrillas dispuestas en pisos en las que se coloca el catalizador. [17]

El control térmico aquí es fundamental, con presencia de cambiadores de calor adecuados, no debe ser inferior a 400 °C ni superior a 600 °C. en general una



---

instalación dispone de tres hornos de contacto con intercambiadores de calor, este proceso transcurre a 430-500 °C, así se alcanza un rendimiento de casi el 100%. En el primer horno se mantiene una temperatura de 450 °C, en el segundo de 500 °C y en el tercero de 450 °C. [17]

**Absorción (la captación de un gas por un líquido).** El gas de reacción que contiene ahora trióxido de azufre se lleva a las columnas de absorción. Aunque el trióxido no se puede hacer reaccionar con el agua, pues esta no lo moja, entonces el agua es absorbida muy bien por el ácido sulfúrico concentrado, en el que se disuelve fácilmente con formación de óleum, con mayor o menor contenido de trióxido de azufre. [17]

**Mezclado y destilación.** Para producirlo más diluido, el ácido concentrado se deja fluir sobre la cantidad de agua necesaria, con refrigeración y agitación simultáneas. No se puede verter agua sobre el ácido concentrado por ser una reacción altamente exotérmica y violenta. [17]

El óleum no se debe diluir con agua en ningún caso, pues esto traería una violenta explosión, se diluye entonces mezclándolo con la cantidad de ácido sulfúrico de 80-90% hasta llegar al sulfúrico puro, exento de óleum y después se diluyen con agua en la forma anterior a la concentración deseada. [17]

Por destilación de óleum al 25% se obtiene trióxido de azufre puro. Regulando la temperatura del agua de refrigeración de modo que el trióxido de azufre condense en estado líquido y sea recogido. [17]



---

### 2.2.8 FATIGA DE METALES

La fatiga es una forma de fractura que se produce en estructuras sujetas a tensiones dinámicas y fluctuantes (ejemplo: Puentes, Aviones y componentes de máquinas). Bajo estas circunstancias es posible que la fractura se produzca a niveles de tensiones considerablemente bajas. [19]

El término fatiga es usado debido a que este tipo de fractura normalmente se produce después de un periodo de tensiones repetitivas o cíclicas. Se estima que la fatiga comprende aproximadamente un 90 % de todas las fracturas metálicas, siendo de tipo catastrófica y ocurriendo rápidamente sin aviso. [19]

La fractura por fatiga es semejante en naturaleza a la fractura frágil aun en metales normalmente dúctiles en los que hay muy poco, o ninguna deformación plástica asociada con la fractura. Las etapas del proceso son la iniciación y propagación de fisuras. Generalmente la superficie de fractura es perpendicular a la dirección de las tensiones de tracción aplicadas. [19]

A. Whoeler llevo a cabo experimentos sistemáticos sobre la así llamada fatiga durante 1852 y 1870, él introdujo la curva S-N (Tensión vs. Número de ciclos) llamadas curvas de Whoeler, lo cual representa una de las características básicas de fatiga (Fig. 2.3). Estas curvas dan la relación entre la amplitud de las tensiones cíclicas y un número de ciclos para su rotura. [19]

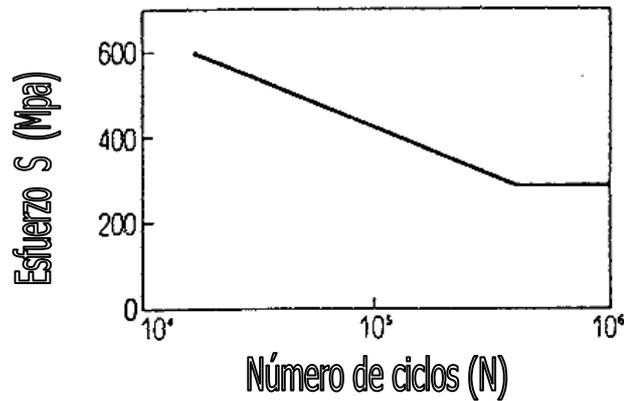


Figura 2.3, Ejemplo de curvas de S-N para un acero. [19]

**Manifestación y Proceso de 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. Ver *Figura 2.4*. [19]

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 medida 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. [19]

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.

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.

3) Rotura: es la propagación de la grieta hasta que es lo suficientemente grande como para producir la rotura. [19]

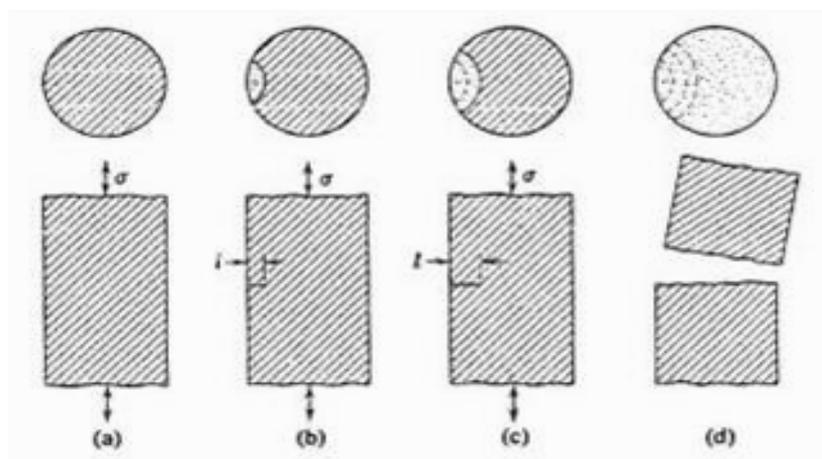


Figura 2.4. Evolución de la falla. [19]

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.

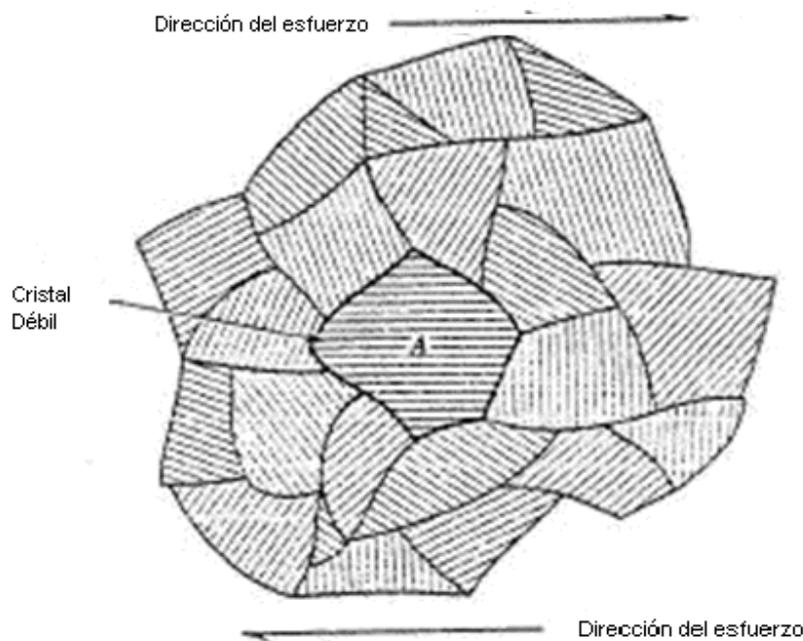
-Líneas radiales: a veces las fisuras que se generan en la superficie (que es el lugar más frecuente) progresan según niveles levemente escalonados; en un momento dado de su desarrollo, sin embargo, quedan estas líneas radiales como huellas de las diferencias de nivel iniciales. [19]

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. [19]

**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, chiveteros y discontinuidades microscópicas tales como inclusiones, rechupes, defectos de fabricación, etc. [19]

### 1) Nucleación: cómo se origina la fisura.

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 2.5). La nucleación se produce a partir de esta fluencia altamente localizada. [19]



**Figura 2.5.** Deslizamiento de los cristales en metales policristalinos. [19]

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. [19]

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. [19]

## 2) Propagación: crecimiento de la fisura

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. [19]

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 no homogeneidad 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. [19]

**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. [19]

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. [19]

**Naturaleza Estadística de la Fatiga.** Como resultado de investigaciones empíricas se observó que piezas de igual dimensión, material, tratamiento y trabajando bajo las mismas condiciones de carga fallan por fatiga a distintos valores de tensión. [19]

Esto indica una dispersión en los valores de Límite de Fatiga de una pieza que hace imposible el uso de un valor para diseño, más allá del coeficiente de seguridad usado. La solución es aplicar métodos estadísticos a los resultados de los ensayos para obtener valores coherentes y reales, y así obtener la probabilidad de falla por fatiga (P). Ningún material tiene un único valor de vida en fatiga para una tensión determinada, aún bajo las más cuidadosamente controladas condiciones. En fatiga (como en la fractura frágil), la variabilidad o distribución de valores observados es muy grande. Por lo tanto la vida en fatiga de un material puede solo ser tratada como una distribución de valores para especímenes individuales. [19]

Si contamos con información confiable sobre las distribuciones de propiedades podemos desechar este factor de ignorancia y en su lugar podemos diseñar para un porcentaje bajo de fallas, o dicho de otra manera, un porcentaje alto de supervivencia. Por ejemplo, si sabemos que el 99 % de todos los especímenes de una aleación de aluminio se espera que resistan una tensión de 60,000 psi sin falla, podríamos usar esta tensión como punto de partida. El factor de seguridad necesitaría entonces compensar solo posibles variaciones en las condiciones de uso, tal como métodos de fabricación y magnitud de cargas aplicadas. Cuando hablamos de la distribución de vidas en fatiga para un material nos referimos a las vidas en fatiga de todos los especímenes posibles que pueden hacerse de este material (población). Una estimación de la distribución y sus características pueden hacerse con muestreos de la población. Un muestreo consiste de un número de especímenes hechos de un material



determinado según algún plano específico. Cuanto más grande sea el muestreo, más estrechamente su distribución se aproxima a la de la población. Mediante el uso de métodos estadísticos podemos estudiar las características de distribuciones en muestreos e inferir de ellos las características de la distribución en la población. Las propiedades de un muestreo son medidas por estadísticas; las propiedades de la población se llaman parámetros. Los parámetros no son ordinariamente medibles, pero son estimados por estadísticas. [12]

**Fatiga en aleaciones de aluminio:** En aplicaciones estructurales, las aleaciones de aluminio son sin duda los materiales no férricos de los que más datos de fatiga y resistencias en general se disponen debido a su amplio campo de aplicación: industria aeronáutica, aeroespacial y automovilística sobre todo, su relativa facilidad de mecanizado y otros procesos de fabricación (fusión por debajo de los 700°C frente a los 1300°C a 1400°C de los aceros) y con un precio no excesivamente alto, siendo un material que no sufre prácticamente oxidación en las condiciones de trabajo más frecuentes. Una característica que las diferencia de la mayoría de los materiales férricos es que no presentan un límite de fatiga apreciable, al igual que sucede en la mayoría de los restantes materiales. Así pues, en principio, no son posibles los diseños para duración ilimitada, y en consecuencia los ensayos de fatiga (por ejemplo del tipo de probeta rotatoria) deben ser llevados a números de ciclos mucho más altos que en el caso de los materiales con límite de fatiga a  $10^6$  o  $10^7$ , concretamente se requieren hasta  $5 \cdot 10^8$ , valor al cual todavía no se registra límite de fatiga. Obsérvese que estos ensayos requieren hasta 500 veces el tiempo de ensayo de un acero típico, lo que complica y encarece extraordinariamente la caracterización de estas aleaciones mediante probetas: más aún si se tiene en cuenta que los métodos de cálculo no podrán ser muy precisos y será necesario realizar un meticuloso ensayo de prototipos en muchos casos. Por otra parte la dispersión de los resultados en los ensayos de



probetas es mucho más alta que en el caso de los aceros; por ejemplo Sinclair y Dolan han obtenido duraciones para una misma tensión entre  $4 \cdot 10^5$  y  $10^8$  ciclos. [1]

Por lo que se refiere a las propiedades de resistencia a la fatiga y teniendo en cuenta que no posee límite de fatiga, se suele definir de forma convencional un pseudo-límite de fatiga a  $10^8$  o a  $5 \cdot 10^8$  ciclos, valores a partir de los que el descenso de resistencia es pequeño, a falta de datos específicos:

$$\textit{Laminado: } \sigma_n = 0,4 \cdot \sigma_u \textit{ para } 5 \cdot 10^8 \textit{ ciclos}$$

$$\textit{Forjado: } \sigma_n = (0,35 - 0,5) \cdot \sigma_u \textit{ para } 10^8 \textit{ ciclos}$$

$$\textit{Fundición: } \sigma_n = 0,35 \cdot \sigma_u \textit{ para } 10^8 \textit{ ciclos}$$

donde,

$\sigma_n$  Es el esfuerzo de fatiga.

$\sigma_u$  Es el esfuerzo máximo o último.

Así pues la resistencia a la fatiga de las aleaciones de aluminio depende del proceso de fabricación, aún considerando la misma calidad de acabado superficial. Se ha observado que el tamaño del lingote de colada influye también en la resistencia a la fatiga, que decrece a medida que aumenta el tamaño de éste. Se sabe que el tamaño final de las piezas tiene una notable influencia, pero no está cuantificada de forma general. Por lo que respecta a la sensibilidad a la entalla, las opiniones no son unánimes y por ello se recomienda utilizar el coeficiente de concentración de tensiones teórico  $k$ . Para los restantes coeficientes modificativos: acabado superficial, fiabilidad, forma de trabajo, etc., se dispone de pocos datos y por ello es muy problemática la extrapolación de los valores de las probetas a las piezas reales en condiciones de servicio. Se hace pues imprescindible la elección de un factor de seguridad más elevado que en las piezas de acero y una campaña de ensayos de prototipos, cuyos resultados tendrán más influencia en el diseño final. Estos ensayos,



como los de probetas, se pueden realizar a velocidades elevadas pues la conductividad térmica es muy alta, unas  $160 \text{ KCal/hm}^\circ\text{C}$  frente a las 30 del acero, por lo que los efectos de la velocidad de aplicación de las cargas son poco importantes debido a que se disipa rápidamente el calor generado por las tensiones variables. [1]

La Figura 2.6 muestra una gráfica esfuerzo-número de ciclos característica de una aleación de aluminio.

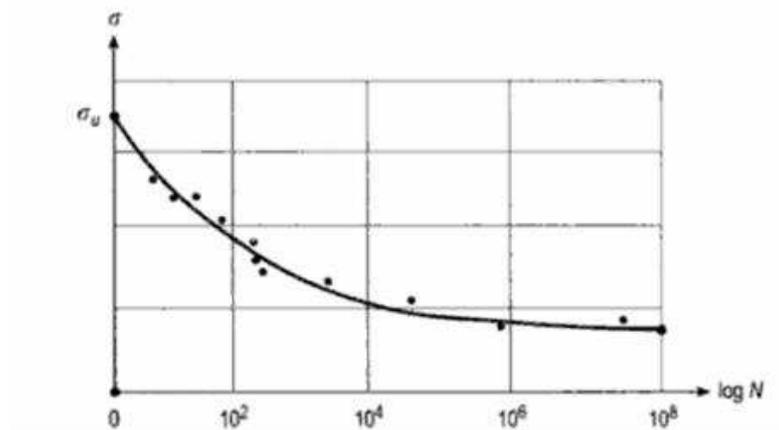
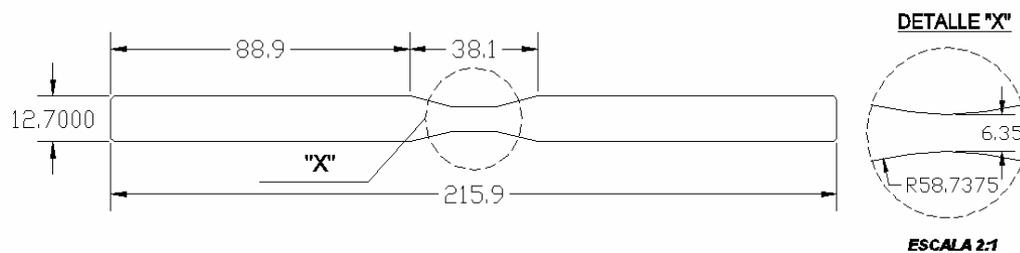


Figura 2.6, grafica  $\sigma$  vs.  $N$  de una aleación de aluminio. [1]

**Relaciones esfuerzo-vida:** Para determinar la resistencia de materiales bajo la acción de cargas de fatiga, las probetas se someten a fuerzas repetidas o variables de magnitudes especificadas, mientras se cuentan los ciclos o inversiones del esfuerzo hasta su destrucción. El dispositivo de ensayo a la fatiga que se emplea con más frecuencia es la máquina de viga rotativa de alta velocidad de R.R. Moore. En esta máquina la muestra se somete a flexión pura (sin cortante transversal) mediante pesos. La probeta como la de la *Figura 2.7*, se maquina y se pule con mucha meticulosidad, con un pulido final en una dirección axial para evitar ralladuras

circunferenciales. Se dispone de otras máquinas de ensayo a la fatiga para aplicar esfuerzos fluctuantes o inversos, esfuerzos de torsión o esfuerzos combinados a las muestras de ensayo. [2]



**Figura 2.7** Probeta estandarizada del ensayo de fatiga..

Para establecer la resistencia a la fatiga de un material, se necesita un número muy grande de ensayos debido a la naturaleza estadística de la fatiga. Para el ensayo con viga rotativa, se aplica una carga constante de flexión y se registra el número de revoluciones (inversiones del esfuerzo) de la viga para que se presente la falla. El primer ensayo se hace con un esfuerzo que es un poco menor que la resistencia última del material. El segundo ensayo se realiza a un esfuerzo que es menor que el usado en el primero. Éste proceso se continúa y los resultados se grafican como un diagrama S-N (ver *Figura 2.8*). La gráfica se hace en papel semi - logarítmico o en papel log-log. En el caso de materiales ferrosos y aleaciones, la gráfica se hace horizontal después de que el material se sometió a esfuerzo durante un cierto número de ciclos. Al graficar en papel logarítmico, se acentúa la curvatura en la línea, la cual quizá no sea visible si los resultados se graficaran en coordenadas cartesianas. [2]

La ordenada del diagrama S-N se llama resistencia a la fatiga  $S_f$ ; un enunciado de esta resistencia siempre se debe acompañar por su correspondiente número de ciclos N.



Los diagramas S-N se determinan a través del ensayo de probetas o de elementos mecánicos reales. Aun cuando el material de la muestra de prueba y el del elemento mecánico sean idénticos, habrá diferencias significativas entre los diagramas de los dos. [2]

En el caso de los aceros, se presenta un cambio brusco de dirección en la gráfica, y más allá de este cambio no ocurrirá la falla, sin importar qué tan grande sea el número de ciclos. La resistencia correspondiente al cambio en la gráfica se llama límite de resistencia a la fatiga  $S_e$ , o límite de fatiga (ver *Figura 2.8*). [2]

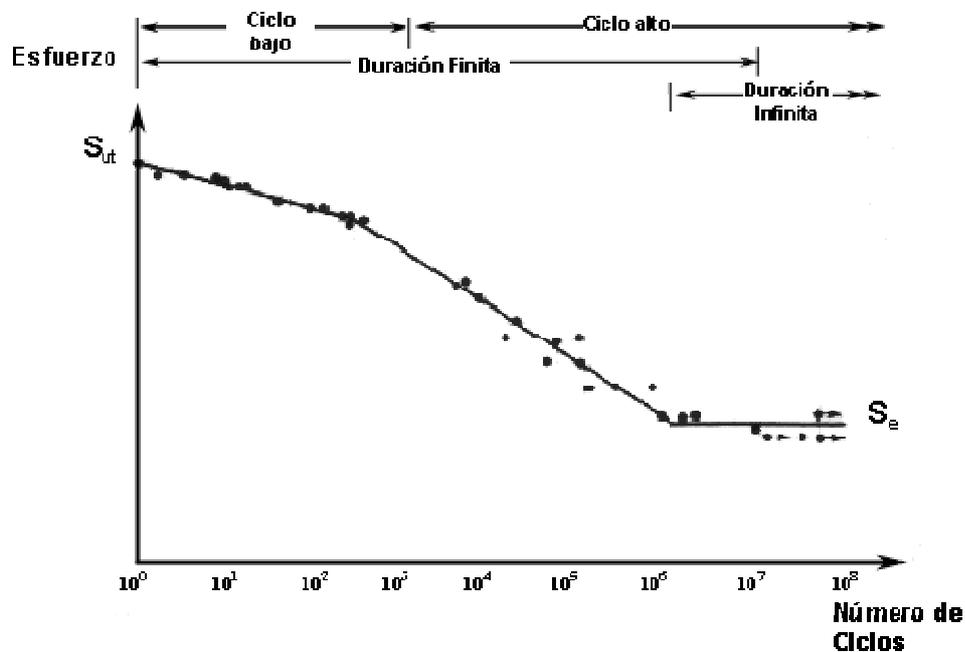
Se observa que un ciclo de esfuerzos ( $N=1$ ) constituye una sola aplicación y una remoción de una carga y luego otra aplicación y remoción de la carga en la dirección opuesta. De esta manera  $N=1/2$  significa que la carga se aplica una vez y luego se quita, que es el caso de la prueba de tensión simple. [2]

El conjunto de conocimientos disponible sobre la falla a la fatiga, desde  $N=1$  hasta  $N=1000$  ciclos, por lo general se clasifica como fatiga de bajo ciclaje, como se indica en la *Figura 2.8*. Entonces la fatiga de alto ciclaje tiene que ver con la falla correspondiente a ciclos de esfuerzos mayores a  $10^3$  ciclos. [2]

En la *Figura 2.8* también se hace una distinción entre región de vida finita y región de vida infinita. La frontera entre las regiones no se puede definir con claridad excepto para un material específico; pero se ubica en algún punto entre  $10^6$  y  $10^7$  ciclos para aceros. [2]

Los métodos de análisis de la falla por fatiga representan una combinación de ingeniería y ciencia. A menudo la ciencia no puede proporcionar las respuestas que

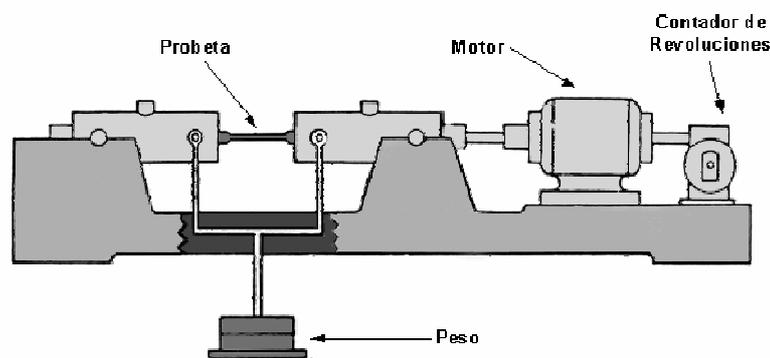
son necesarias. Pero el aeroplano aún se debe hacer para que vuele con seguridad. Y el automóvil hay que fabricarlo con una confiabilidad que garantice una vida larga y sin problemas, y al mismo tiempo para que produzca utilidades para los accionistas de la industria. Sin embargo, aunque la ciencia no ha explicado por completo el mecanismo real de la fatiga, el ingeniero debe diseñar sin embargo, cosas que no fallen. [2]



**Figura 2.8** Diagrama S-N graficado a partir de los resultados de ensayos a la fatiga axial completamente invertidos de un acero UNS G41300, normalizado. [2]

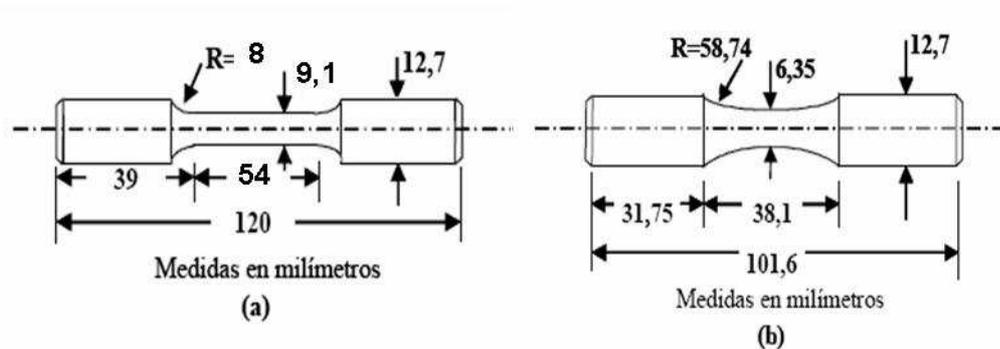
En los ensayos de fatiga de probeta rotatoria, una probeta se hace girar por medio de un motor, mientras se le aplica una carga conocida. La probeta queda sometida a una flexión alternada, que se traduce en que un punto cualquiera de la probeta queda sometido a un ciclo de cargas que va de tracción a compresión. Esto

produce fisuras que se van propagando lentamente, reduciendo el área hasta un punto tal en que la probeta no pueda resistir la carga aplicada y se rompe. Cuando un material en condiciones de ensayos a fatiga soporta gran cantidad de número de ciclos (N) sin ocurrir falla o ruptura, es porque el material superó el límite de fatiga ( $10^6$  a  $10^7$  ciclos). En la *Figura 2.9* se muestra un esquema de una máquina para ensayos de fatiga.



**Figura 2.9** Máquina de ensayos de fatiga de viga rotativa.

Las probetas para los ensayos de fatiga que se utilizan con aluminios deben cumplir con la norma ASTM E-606 y para los ensayos de tracción, con la norma ASTM-B-557M (ver *Figura 2.10*)



**Figura 2.10** Dimensiones de las probetas para los ensayos de tracción para aluminio (a) dimensiones para los ensayos de fatiga para aluminio (b).



## 2.2.9 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. [20]

La ecuación de resistencia a la fatiga o ecuación de Basquin (1910) viene dada por la siguiente expresión:

$$S_f = A \times N^{-B} \quad (2-1)$$

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. [20]

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:

$$\text{Log}(S_f) = \text{Log}(A) - B \cdot \text{Log}(N) \quad (2-2)$$



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:

$$Y = b + m \times X \quad (2-3)$$

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. [20]

### 2.2.10 EFECTOS DE LA SUPERFICIE

La mayor incidencia de las concentraciones de esfuerzos, tiende a presentarse en la superficie del material. Este efecto depende de factores y características presentes en la superficie de la pieza o elemento mecánico. [20]

**Acabado superficial.** Las marcas del mecanizado son pequeños defectos que producen la acción cortante de una herramienta en la superficie de un componente. Dependiendo de la rugosidad del acabado superficial, se aumenta la probabilidad de disminuir la vida de fatiga representada por el total de ciclos hasta la falla. [20]

**Propiedades de la superficie.** Las propiedades de muchos materiales se modifican en el proceso de fabricación y acabado. Esta alteración ocurre en la superficie del material y puede producir la disminución o aumento de la vida a fatiga. Cualquiera



---

proceso que permita el agrietamiento de la superficie de un material, contribuye en la disminución de la vida de fatiga. [20]

Contrariamente ocurre en algunos procesos, donde las propiedades de la superficie pueden tener un efecto benéfico al retardar el inicio de las grietas en las capas superficiales. Estos procesos incluyen aleaciones en las cuales es precisa la modificación de la superficie con técnicas de aplicaciones de recubrimientos por ataque de partículas a altas velocidades. [20]

**Esfuerzos residuales:** Internamente en la micro estructura de los materiales permanecen esfuerzos residuales producidos por el endurecimiento por deformación plástica durante el proceso de producción de los materiales. Estos esfuerzos son variados, pueden aumentar el agrietamiento de fatiga y reducir su vida, dependiendo de la magnitud y dirección. [20]

**Tensiones cíclicas:** Las tensiones aplicadas pueden ser de naturaleza: axial (tensión-compresión), flexionales (flexión) o torsionales. En general son posibles tres modos diferentes de fluctuaciones tensión-tiempo, representados esquemáticamente en la *Figura 2.11*. La *Figura 2.11 (a)* muestra que la amplitud es simétrica a un nivel de tensiones promedio igual a cero, por ejemplo, alternando desde una tensión máximo de tracción ( $\sigma_{max}$ ) a una tensión de compresión ( $\sigma_{min}$ ) de igual magnitud. Esto se llama ciclo de reversión completo. Otro tipo llamado ciclo de tensiones repetitivas se ilustra en la *Figura 2.11 (b)*. El máximo y el mínimo asimétricos relativo al nivel de tensión cero. Finalmente, el nivel de tensiones puede variar al azar en amplitud y frecuencia como se ejemplifica en la *Figura 2.11 (c)*. En la *Figura 2.11 (b)* también se indica que son varios los parámetros usados para caracterizar los ciclos de tensiones fluctuantes. La tensión de amplitud media ( $\sigma_m$ ) está definida por el promedio de las tensiones máximas y mínimas en el ciclo y dadas por la siguiente ecuación:



$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \quad (2-4)$$

Además el rango de tensiones,  $\sigma_r$ , es sólo la diferencia entre  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$ , dado por la ecuación:

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2-5)$$

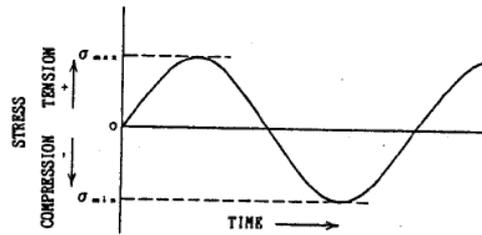
La tensión amplitud  $\sigma_a$ , es solamente la mitad de este rango de tensiones y dado por la ecuación:

$$\sigma_a = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \quad (2-6)$$

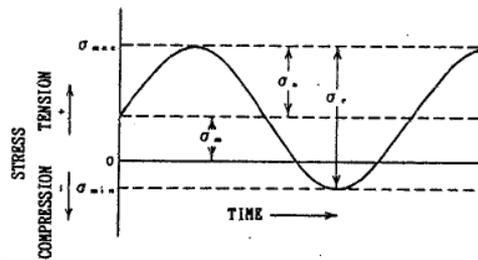
Finalmente, la relación de tensiones R, es la relación entre la amplitud de las tensiones mínima y máxima, dada por:

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (2-7)$$

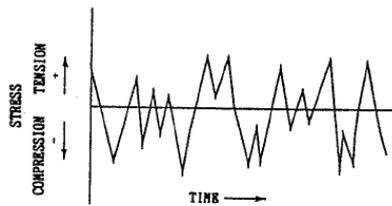
Por convención, las tensiones de tracción son positivas y las de compresión son negativas. Por ejemplo para un ciclo de inversión completa, el valor R es -1. [19]



a) Ciclos de tensiones de inversión total.



b) Ciclos de tensiones repetitivas.



c) Ciclos de tensiones al azar.

**Figura 2.11.** Tipos de ciclos de tensiones por fatiga. [19]



---

### 2.2.11 METALOGRAFÍA EN ALEACIONES DE ALUMINIO

El estudio de la microestructura tiene como propósito principal la evaluación de las aleaciones, determinación de los efectos y consecuencias tanto de los procesos de fabricación como de los tratamientos térmicos y causas de fallo. Para una buena interpretación de la microestructura es necesario contar con la historia completa de la muestra a estudiar. En general, la metalografía del aluminio y sus aleaciones, es difícil, ya que las aleaciones de aluminio representan una gran variedad de composiciones químicas y por ende, un amplio rango de durezas y diferentes propiedades mecánicas. Por lo tanto las técnicas requeridas para el estudio metalográfico pueden variar considerablemente entre las aleaciones suaves y duras. De hecho, una aleación específica puede presentar varias características microestructurales, como matriz, segundas fases, partículas finamente divididas de una sustancia dispersas en otra, granos, subgranos y por lo tanto fronteras o subfronteras de grano de acuerdo a su tipo de aleación y su historia térmica o termomecánica. Sin embargo, algunos métodos de preparación de muestra y observación son bastante genéricos y aplicables a todas las aleaciones de aluminio. En otros casos, es necesario referirse a métodos específicos de desarrollo.



---

## **CAPÍTULO 3**

### **MARCO METODOLÓGICO**

En este capítulo se presenta de forma detallada y ordenada todas las etapas y pasos realizados para el correcto desempeño de esta investigación. Además se presentan las técnicas, instrumentos y equipos utilizados en la misma.

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Dado que ésta investigación consiste en estudiar el comportamiento a fatiga de la aleación de aluminio 6063 la denominamos una investigación descriptiva. 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.

#### **3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

Para llevar acabo nuestra investigación experimental, se diseño una estructura a seguir que nos permitirá encontrar resultados confiables enfocados de manera cuantitativa y cualitativamente, las cuales nos encaminarán a generar una respuesta al problema planteado.



### 3.2.1 ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

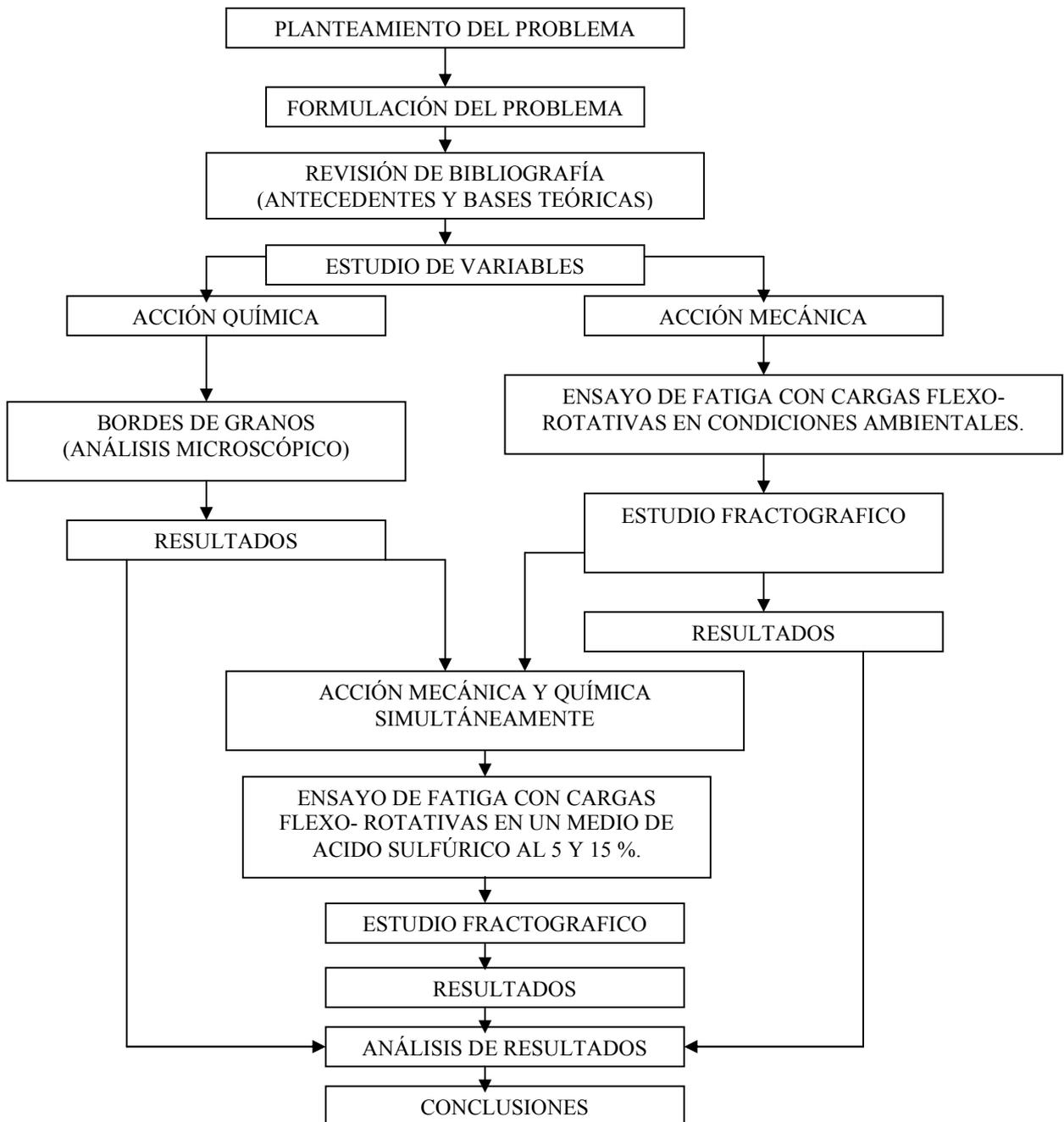


Fig. 3.1. Esquema de la investigación.



### **3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA**

#### **3.3.1 POBLACIÓN**

Para la realización de la investigación se cuenta con una población de 78 probetas, basándose en que la definición de población es un conjunto de elementos a estudiar, siendo susceptibles de ser investigados en virtud de que se encuentran en el rango efectivo.

#### **3.3.2 MUESTRA**

La población se distribuyo de la siguiente manera:

- Muestra de 3 probetas de AA-6063 para realizar los ensayos de tracción.
- Muestra de 25 probetas de AA-6063 para realizar ensayo de fatiga en condiciones ambientales (al aire).
- Muestra de 25 probetas de AA-6063 para realizar ensayo de fatiga en un medio de ácido sulfúrico con una concentración del 5%.
- Muestra de 25 probetas de AA-6063 para realizar ensayo de fatiga en un medio de ácido sulfúrico con una concentración del 15%.

#### **3.4 TIPO DE MUESTREO**

Para el caso que se estudia el muestreo seleccionado es de tipo no probabilística, ya que se desconoce la probabilidad que tienen los elementos de la población para integrar la muestra, mas aún el muestreo será del tipo intencional, porque las probetas han sido seleccionadas para que cumplan con ciertos estándares antes de la realización de los ensayos, lo cual permitirá comprobar las propiedades consideradas.



---

### 3.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas de recolección de datos que se pusieron en práctica son las siguientes: la observación directa en los diferentes ensayos y el análisis documental proveniente de la bibliografía recopilada.

Los instrumentos utilizados son los siguientes: fotografías, cuadros y tablas diseñadas previamente, donde se registraron y agruparon los datos obtenidos para su posterior análisis. Luego, dichos datos fueron sometidos a los procesos estadísticos básicos (estadística descriptiva).

### 3.6 TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Una vez recolectados los datos, los mismos fueron sometidos a un análisis teórico y comparativo con parámetros ya establecidos. De la misma manera, se aplicó un análisis de tendencias estadísticas a los datos obtenidos en los ensayos de fatiga y cualquier otro dato que también lo ameritó. Se analizaron las muestras por observación microscópica, para inferir acerca de sus características y propiedades.

### 3.7 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

#### **Microscopio óptico:**

- Marca: UNION
- Modelo: MC 86267
- Aumentos disponibles: 100X 200X 400X 1000



**Figura 3.2** Microscopio Óptico.

### **Cortadora Metalográfica:**

- Marca: BUEHLER
- Modelo: SAMPLMET



**Figura 3.3** Cortadora Metalográfica.



### Máquina de Ensayo universal:

- Marca: GALDABINI
- Modelo: CTM 20



Figura 3.4 Máquina de Ensayo universal.

### Rugosímetro:

- Marca: MITUTOYO, Modelo: SJ-201P
- Apreciación:  $0,01 \mu\text{m}$
- Limite superior del rango de medición:  $100 \mu\text{m}$



Figura 3.5 Rugosímetro.

### Máquina para Ensayos de Fatiga:

- Marca: FATIGUE DYNAMICS INC.
- Modelo: RBF-200HT
- Apreciación del momento flector: 1 lbf.in
- Rango del momento flector: [0-200] lbf.in
- Apreciación del contador de revoluciones: 100 revoluciones
- Rango del contador de revoluciones:  $999999 \times 10^2$  revoluciones

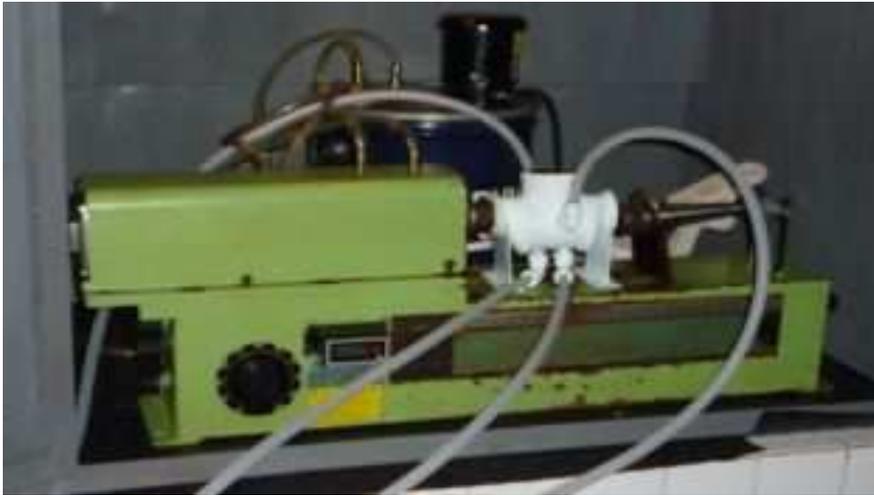


Figura 3.6 Máquina para Ensayos de Fatiga.

### Banco de Pulido:

- Marca: BUEHLER





### Microscopio Electrónico de Barrido:

Marca: PHILLIPS  
Modelo: XL-30



Figura 3.8 Microscopio Electrónico de Barrido.

### Sistema de bombeo:

- Bomba centrífuga con voluta e impeler de polipropileno
- Potencia 0.35 hp / velocidad de giro 3600 rpm.



Figura 3.9 Bomba centrífuga.

### Campana extractora:

- Fabricación propia.



Figura 3.10. Campana para extracción de vapores perjudiciales.

### Dispositivo de inyección del ácido:

- Fabricación propia con componentes de pvc y conectores Festo de alta presión



Figura 3.11. Dispositivo contenedor del ácido.

## 3.8 MATERIAL UTILIZADO

Para lograr obtener la población de probetas, se utilizaron cuatro (4) barras cilíndricas de aleación de aluminio 6063, con un diámetro de  $\frac{1}{2}$  pulgada y una

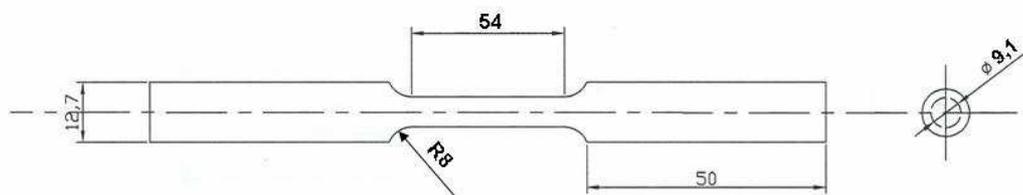


longitud de 6 metros por barra, el cual fue templado a la salida de prensa y luego envejecido artificialmente (Temper T5). Este material fue adquirido en la empresa Aluminios de Venezuela C,A (ALVEN), que se encuentra ubicada en la zona Industrial Carabobo; en la ciudad de Valencia, Estado Carabobo. Adicionalmente se 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 (Ver *Anexo 3*), con el fin de asegurar que el aluminio que suministra la empresa Sucursal Valencia es AA-6063.

El equipo utilizado para establecer dicha composición química, fue un espectrofotómetro. Dicho equipo realiza el estudio mediante una chispa que ataca la muestra, lee el espectro y en función de la longitud de onda determina los componentes de la muestra. El chispeo se realizó en 5 lugares de la muestra para obtener un promedio de los elementos presentes en la aleación.

### 3.9 NORMAS USADAS PARA EL MECANIZADO DE LAS PROBETAS

Para realizar los ensayos necesarios para cubrir éste trabajo de investigación, hay que basarse en normas ya establecidas universalmente para definir las dimensiones a utilizar en el mecanizado de las probetas. En este caso para el ensayo de tracción se utilizó la norma ASTM-B 557M (ver *Anexo 7*), dimensionando las probetas como se observa en la *Figura 3.12*.

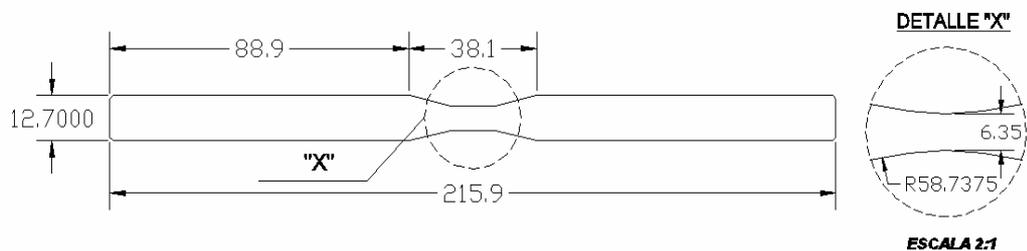


**Figura 3.12.** Dimensiones de la probeta de tracción (mm)



Para los ensayos de fatiga se utilizó la norma ASTM E-606 como parámetro de fabricación de las probetas (ver *Anexo 8*). Se dimensionaron tal cual como se muestra en la *Figura 3.13*.

Estas probetas fueron mecanizadas en un torno CNC (torno de control numérico), siguiendo parámetros de afinado para controlar la rugosidad en la zona calibrada en donde se espera fracture la probeta. Este acabado superficial juega un papel importante ya que minimiza la existencia de grietas, las cuales se pueden transformar en concentradores de esfuerzo, presentando una ruptura anticipada en ese punto y disminuyendo significativamente el número de ciclos de los esfuerzos alternantes.



**Figura 3.13.** Dimensiones de la probeta de fatiga (mm)

### 3.10 ENSAYO DE TRACCIÓN

Este tipo de ensayo es una herramienta muy importante para la realización del presente trabajo, ya que nos permite obtener información sobre la resistencia del material bajo la acción de una carga axial. Ésta carga se aplica lentamente para así poder garantizar un equilibrio en toda la probeta en cada instante de tiempo.



En esta fase del trabajo se requiere conseguir el esfuerzo de fluencia del material. Este dato es de suma importancia para llevar a cabo los ensayos de fatiga, ya que nos da una aproximación bastante cercana del esfuerzo máximo permisible que se puede aplicar en flexión cuando la probeta se encuentre girando.

Para lograr esta fase se utilizaron 3 probetas cilíndricas de AA-6063 (ver *Figura 3.14*), dimensionadas bajo la norma ASTM-B 557M (Ver *Anexo 7*).

Para el ensayo de tracción se utilizó una velocidad de deformación de 2mm/min. Se hizo uso de este valor para obtener una gráfica detallada del proceso de deformación de la probeta durante el ensayo de tracción, ya que a mayor velocidad la gráfica obtenida tiende a ser más puntual, haciendo menos visible las diferentes zonas que conforman el proceso de alargamiento.



**Figura 3.14** Probeta de Tracción de AA-6063.

Los ensayos de tracción se realizaron en la Universidad de Carabobo, específicamente en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería; donde se utilizó la máquina de ensayos de tracción marca Galdabini, modelo CTM 20, a la cual se puede aplicar una carga máxima de 200.000 Newton.

Para los ensayos realizados se utilizaron como parámetros predeterminados una velocidad de desplazamiento del cabezal de 2 mm/min y una carga máxima 30.000 N.

Luego de realizar los ensayos, 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 (ver *Anexo* ). 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 esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, entre otros.

En este caso no es necesario conseguir todas las propiedades mecánicas mencionadas en el párrafo anterior. Solamente interesa conseguir el esfuerzo de fluencia, ya que este estudio está basado en observar el comportamiento dinámico del material y no sus propiedades mecánicas estáticas.

Para obtener el gráfico Esfuerzo deformación es necesario aplicar las siguientes expresiones:

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

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.

Esta expresión permite obtener el esfuerzo aplicado durante el ensayo, a partir de los datos digitales que se obtienen del software de control de la máquina, la cual arroja más de 3000 puntos para cada uno de los gráficos de cada condición. Para el cálculo de estos esfuerzos puntuales se utilizó el software Microsoft Excel, al igual que para graficar el diagrama esfuerzo-deformación de cada probeta ensayada (ver *Anexo 6*).

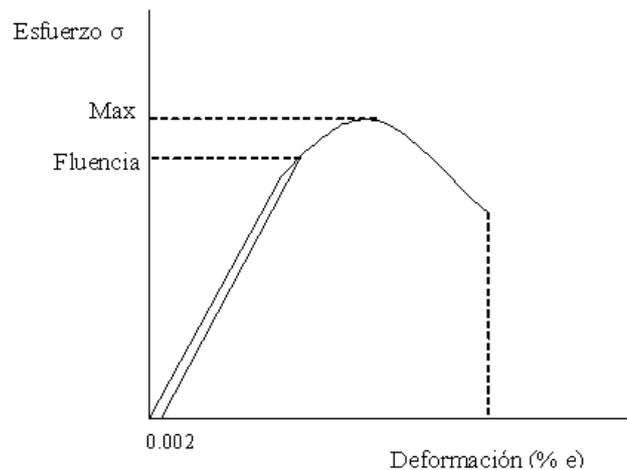
El porcentaje de alargamiento del material, se obtiene a partir de la ecuación 3.2

$$\%e = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 \quad (3-2)$$

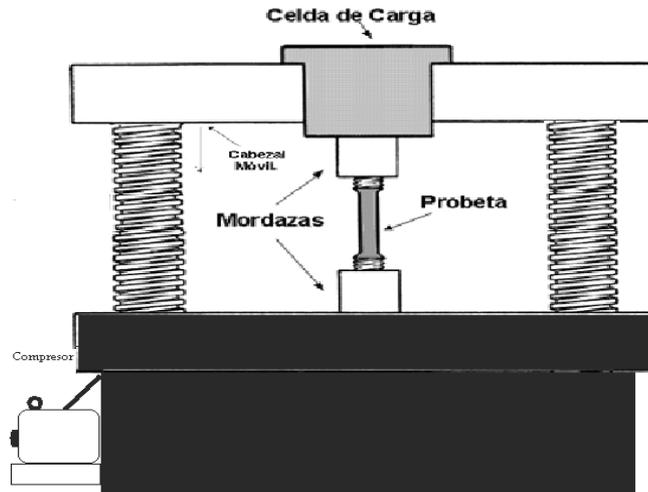


Donde  $l_f$  es la longitud final y  $l_0$  es la longitud calibrada de la probeta a ensayar, que en nuestro caso es de 45mm.

Para calcular el esfuerzo de fluencia se utilizó el método “off-set” del 0,2% de la deformación unitaria, en el cual se comienza desde un valor de 0.2% de la deformación y se traza una línea paralela a la parte recta de la zona elástica de la curva. Al interceptar ésta línea con la curva Esfuerzo Vs. Deformación se consigue el punto del valor que corresponde al esfuerzo de fluencia, el cual se muestra en la *Figura 3.15*. El esquema de montaje del ensayo de tracción se muestra en la *Figura 3.16*.



**Figura 3.15.** Método Off Set para hallar esfuerzo de fluencia



**Figura 3.16.** Esquema de montaje del ensayo de tracción.

### 3.11 ENSAYO DE FATIGA

Una vez mecanizadas las 75 probetas bajo la norma ASTM E-606 (ver *Figura 3.18*) para la realización de los ensayos de fatiga, se dividieron en tres grupos; un grupo para cada condiciones originales, un grupo para la condición en medio corrosivo al 5% y por ultimo un grupo para la condición en un medio corrosivo al 15%. El equipo a utilizar para hacer los ensayos de fatiga es una máquina marca Fatigue Dynamics Inc, modelo RBF-200 HT, con un rango de cargas (momento flector) de 20 a 200 lb.pulg (ver *Figura 3.17*). Este equipo se encuentra en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.



**Figura 3.17.** Máquina de ensayos de fatiga.



**Figura 3.18.** Probeta para ensayo de fatiga de AA-6063 ASTM E-606

Para la realización de los ensayos, es necesario conocer el esfuerzo de fluencia del aluminio; dato que fue obtenido mediante el equipo de tracción mencionado anteriormente. Una vez conocidos todos los parámetros mecánicos, se procede a calcular el momento flector a aplicar en cada ensayo.

El momento flector va a depender de la resistencia del material a ser deformado plásticamente, ya que no tiene sentido estudiar fatiga en casos en los cuales el esfuerzo es mayor al de fluencia. La velocidad de giro de la máquina de fatiga que se utilizó en los ensayos fue cerca de 4400 r.p.m. Esto se validó realizando la comparación entre el número de vueltas que registraba el contador digital de la máquina en relación con el tiempo que tardaba el eje en dar 100 vueltas, es decir, se mide el número de revoluciones por minuto a la cuales gira la máquina. La medición



se realizó en 4 oportunidades, lo cual nos permite obtener un promedio para comprobar que los resultados que se obtengan sean correctos.

### 3.11.1 MÉTODO DE LA ESCALERA

- Realizar el primer ensayo con un esfuerzo cercano a su límite de fluencia.
- Si con el primer esfuerzo o carga aplicada, el material falla rápidamente, se debe disminuir el nivel de esfuerzo a un valor menor. Los materiales no ferrosos como el aluminio no tienen un verdadero límite de fatiga. En estos casos es práctica corriente caracterizar las propiedades de fatiga del material expresando la resistencia a la fatiga para un número de ciclos convenido arbitrariamente, como lo fue en nuestra investigación el valor de  $10^6$  ciclos.
- Es necesario efectuar de 3 a 5 ensayos para cada carga de trabajo aplicada, con el fin de obtener una tendencia clara que defina un comportamiento confiable de los resultados conseguidos, como también se descartarán los que salgan de la tendencia de este comportamiento.

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

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

donde:

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



D es el diámetro de la probeta (*in*)

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

El valor del esfuerzo aplicado varió desde el 95%, 90%, 85%, 80%, 75% del esfuerzo de fluencia y el porcentaje del esfuerzo para el cual la probeta no fallara antes de los  $1,6 \times 10^6$  ciclos, el cual se estableció como límite en esta investigación. Este límite no representa la vida infinita del material, ya que este valor para el aluminio es cercano a  $5 \times 10^8$ , pero debido a que se deseaba estudiar la influencia del medio corrosivo en la resistencia a la fatiga, el valor límite de ciclos establecido, era suficiente.

El valor del momento flector que se debe aplicar en el ensayo para lograr el porcentaje de esfuerzo, se calcula mediante la ecuación 3.3 y si dicho valor no se puede representar en la regleta (ya que esta posee una escala que no permite decimales), es necesario redondear por encima o por debajo del valor calculado del momento flector y por ende recalculan el porcentaje real de carga aplicada.

Posteriormente se aumentó gradualmente el valor de la velocidad de giro hasta que no se produjeran vibraciones que pudieran afectar el ensayo, manteniendo este valor de velocidad constante a lo largo del ensayo. Una vez fijados dichos parámetros, se procedió a iniciar el ensayo y esperar hasta que ocurriera la fractura o el número de ciclos superara el valor límite. Luego de ocurrir la fractura, se procedió a anotar los resultados, apagar la máquina y a liberar la probeta de su mordaza. Con esta información adquirida fue posible construir los gráficos “Esfuerzo-Número de Ciclo” deseados y realizar los análisis respectivos.



### **3.12 ENSAYO DE FATIGA EN UN MEDIO AMBIENTE CORROSIVO**

En este ensayo se realizo el mismo procedimiento del ensayo anterior (3.11), pero con la adición de un dispositivo que permitía generar un medio ambiente corrosivo dentro de la zona calibrada de las probetas y la periferia de la misma.

Para lograr el medio corrosivo dentro del dispositivo se suministro acido sulfúrico al 5% y al 15% de concentración, por medio de un sistema de bombeo que permitía un flujo constante de 5000 ml/min, a una velocidad aproximada de 737 mm/s, incidiendo de manera radial sobre la probeta.

### **3.13 ACABADO SUPERFICIAL**

En la investigación se tomaron 5 muestras aleatorias, con la finalidad de validar experimentalmente que se cumpliera con los parámetros de afinado especificados en los planos de fabricación de las probetas de fatiga (ver Anexo 9). De esta manera se pudo constatar que la variable rugosidad se mantuvo controlada en  $0,43 \pm 0,1 \mu\text{m}$ .

### **3.14 METALOGRAFÍA**

Esta etapa consistió en realizar un análisis metalográfico a un pequeño fragmento de material. Dicho pequeño fragmento fue obtenido del mismo material utilizado para la fabricación de las probetas y cortados en dimensiones de 2,5cm de longitud por medio del uso de la cortadora metalográfica.

La forma de realizar la metalografía al fragmento fue la siguiente:



1. Se observó la pieza en el microscopio para determinar los defectos iniciales que poseía la misma.
2. Se realizó un desbaste sucesivo, de grueso a fino, con papel de lija número 250 – 400 – 600 - 1200, procurando que en cada etapa la dirección del desbaste fuera perpendicular a la anterior, para asegurar que cada desbaste eliminara las rayas anteriores.
3. Se realizó un pulido de la pieza con dos paños distintos, el primero con un tamaño de partícula de solución (Alúmina) en suspensión mayor que el segundo, hasta obtener una superficie especular.
4. Se verificó la calidad superficial de la pieza con el microscopio.
5. Se realizó un ataque químico para hacer visible la microestructura de la aleación, para ello se utilizó un reactivo conocido como Keller ( 95 ml H<sub>2</sub>O, 1 ml HF, 1.5 ml HCl, 2.5 HNO<sub>3</sub>) por un tiempo de 5s.
6. Se procedió a observar la pieza en el microscopio para verificar las condiciones de la microestructura del material. Se capturaron fotomicrografías mediante un dispositivo de video (ver *Figura 3.19*).



**Figura 3.19.** Fragmento utilizado para el estudio de Metalografía.

### 3.15 FRACTOGRAFÍA

Luego de concluidos los ensayos de fatiga, se procedió a realizar un estudio fractográfico de las probetas ensayadas. Dicho estudio se llevó a cabo en dos etapas, una etapa a nivel micro y otra a nivel macro. La etapa de estudio a nivel micro se realizó por medio del uso de un microscopio electrónico de barrido marca Phillips, modelo XL-30-EDX-4. La resolución del microscopio en referencia, es de 5mm en un rango que va desde 35X hasta 100.000X. Dicha capacidad permitió hacer tomas de las diferentes superficies de fractura, las cuales presentan características resaltantes y aspectos de interés relevantes para el estudio. Por otra parte, el estudio a nivel macro se realizó por medio del uso de una cámara de fotos digital de alta resolución, la cual permitió realizar un análisis comparativo entre los modos de falla (frágil o dúctil). El estudio fractográfico utilizó una cantidad de seis probetas que lograron alcanzar la falla o aproximarse al límite de fatiga establecido anteriormente. Se seleccionó dicha cantidad de probetas a examinar, con el motivo de poder estudiar el modo de fractura del material en las condiciones más diversas posibles, es decir, una probeta fatigada en presencia del medio corrosivo al 5% de concentración, ensayada al más alto esfuerzo (95% del esfuerzo de fluencia), otra probeta en la misma condición



ensayada al más bajo esfuerzo (50% del esfuerzo de fluencia). De igual forma, poder estudiar una probeta fatigada en presencia del medio corrosivo al 15% de concentración ensayada al más alto esfuerzo (95% del esfuerzo de fluencia), otra probeta en la misma condición ensayada al más bajo esfuerzo (50% del esfuerzo de fluencia), así como también estudiar la fractura de dos probetas en condiciones ambientales (al aire).

Para poder utilizar los equipos antes mencionados y realizar los estudios de fractura tanto micro como macro de las probetas seleccionadas; se hizo uso de la cortadora metalográfica, donde las probetas fueron cortadas en la zona del entalle a dimensiones aproximadas de 1,8cm de longitud (ver *Figura 3.20*)



**Figura 3.20.** Fragmento utilizados para el estudio de fractografía.



## CAPITULO 4

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en los diversos ensayos realizados a la aleación de aluminio AA-6063, el análisis y discusión de los datos obtenidos en los estudios y se obtendrá información sobre el comportamiento del material bajo condiciones de trabajo previamente establecidas.

#### 4.1 ANÁLISIS QUÍMICO DEL MATERIAL

Con la finalidad de obtener un promedio aproximado de los elementos presentes en la aleación, se realizaron cinco mediciones a una muestra en cuestión. El promedio de las mediciones se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Resultados obtenidos con la muestra para Análisis Químico (ALUCASA).

ELEMENTO	% EN PESO								
	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Mg	Zn	Ti	Al
AA-6063	0,44	0,15	0,020	0,002	0,000	0,57	0,040	0,018	RESTO
ALVEN	0,44	0,15	0,020	0,000	0,000	0,57	0,040	0,018	RESTO
ALUCASA	0,48	0,182	0,017	0,0028	0,0016	0,52	0,015	0,018	RESTO

Observando los resultados promedio obtenidos de la composición química de la aleación, se realizó un análisis comparativo para determinar si dichos valores están dentro de los parámetros establecidos por la Aluminium Association (ver Anexo 4). De esta forma se logra aprobar el material adquirido, ya que los elementos químicos de la aleación, se encuentran dentro de un rango aceptable con respecto a los parámetros fijados por la Aluminium Association y de igual forma avalados por la norma venezolana COVENIN 1281-80.



## 4.2 RUGOSIDAD SUPERFICIAL

Se realizaron pruebas de rugosidad superficial a los entalles de una muestra de cinco probetas, tal como se explicó en el capítulo anterior. Esto con el objeto de monitorear la variable rugosidad. A continuación se muestra la tabla con los valores obtenidos de rugosidad:

**Tabla 4.2.** Resultados obtenidos de las mediciones de rugosidad superficial.

Muestra	Longitud recorrida (mm)	Rugosidad Superficial ( $\mu\text{m}$ )			Promedio ( $\mu\text{m}$ )
1	0,8 x 5	0.41	0.42	0.43	0.42
2	0,8 x 5	0.45	0.49	0.41	0.45
3	0,8 x 5	0.58	0.45	0.49	0.5
4	0,8 x 5	0.32	0.33	0.41	0.35
5	0,8 x 5	0.40	0.45	0.44	0.43
<b>Promedio Global (<math>\bar{X}</math>) =</b>					<b>0.43</b>
<b>Desviación estándar (<math>\sigma</math>) =</b>					<b>0.054</b>

## 4.3 ENSAYO DE TRACCIÓN

Se realizaron un total de 6 ensayos de tracción, de los cuales 3 presentaron la rotura del material fuera de la zona calibrada en las probetas mecanizadas bajo la norma ASTM-B 557 M, siendo estas descartadas para la obtención del esfuerzo de fluencia. Del grupo restante, cada probeta ensayada suministró una serie de puntos,



que permitieron construir la gráfica “Carga-Alargamiento” (Ver anexo 6) respectiva, como la que se muestra a continuación:

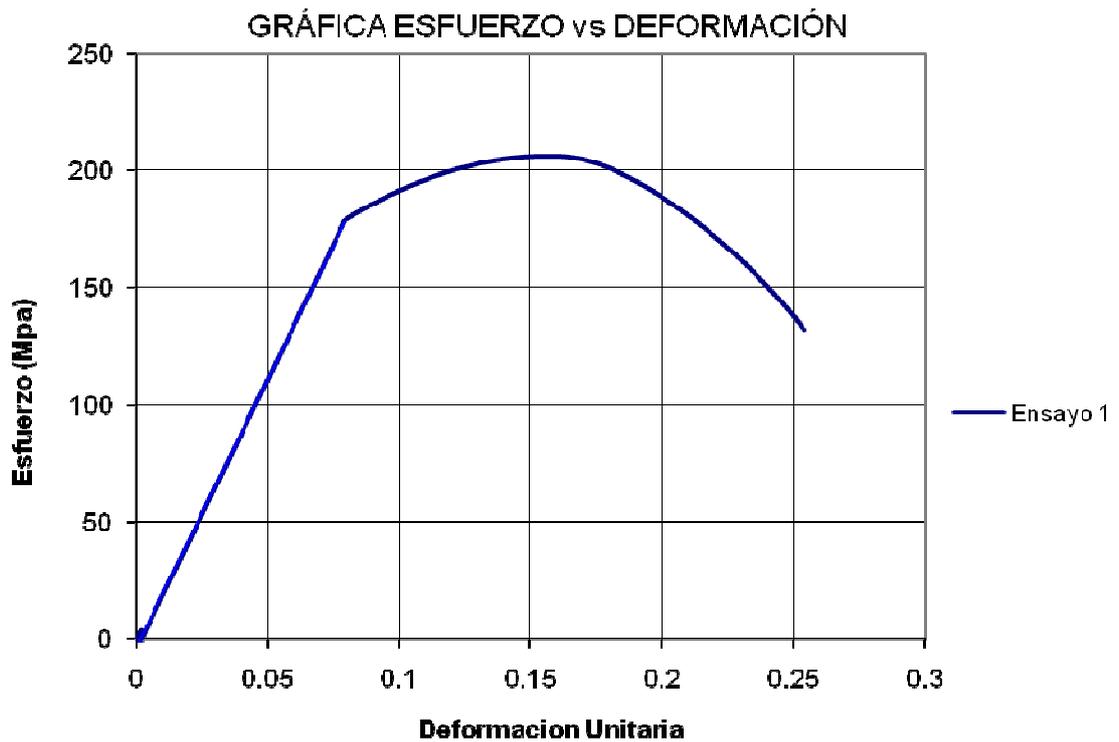


Figura 4.1. Grafica esfuerzo vs. deformación obtenida a partir de la curva “Carga-Alargamiento”

Luego de haber concluido el proceso de graficar hasta obtener la curva “Esfuerzo-Deformación”, se procedió a determinar el valor de las propiedades mecánicas deseadas. Las otras dos gráficas realizadas a partir de los ensayos de tracción se pueden ver en el anexo número 10.

El esfuerzo máximo ( $S_{m\acute{a}x}$ ) se obtuvo del mayor valor de esfuerzo contenido en los datos del gráfico “Esfuerzo-Deformación”



El esfuerzo de fluencia ( $S_y$ ) se obtuvo por medio del uso del Método Offset, el cual consiste en la intersección de la recta offset con la curva del gráfico “Esfuerzo-Deformación”, y así obtener el valor de la propiedad mecánica en cuestión. La recta offset se obtuvo trazando una recta paralela a la de la zona elástica del material y con origen en las abscisas al 0,2% de la deformación del gráfico en cuestión. A continuación se presenta una ilustración del método aplicado:

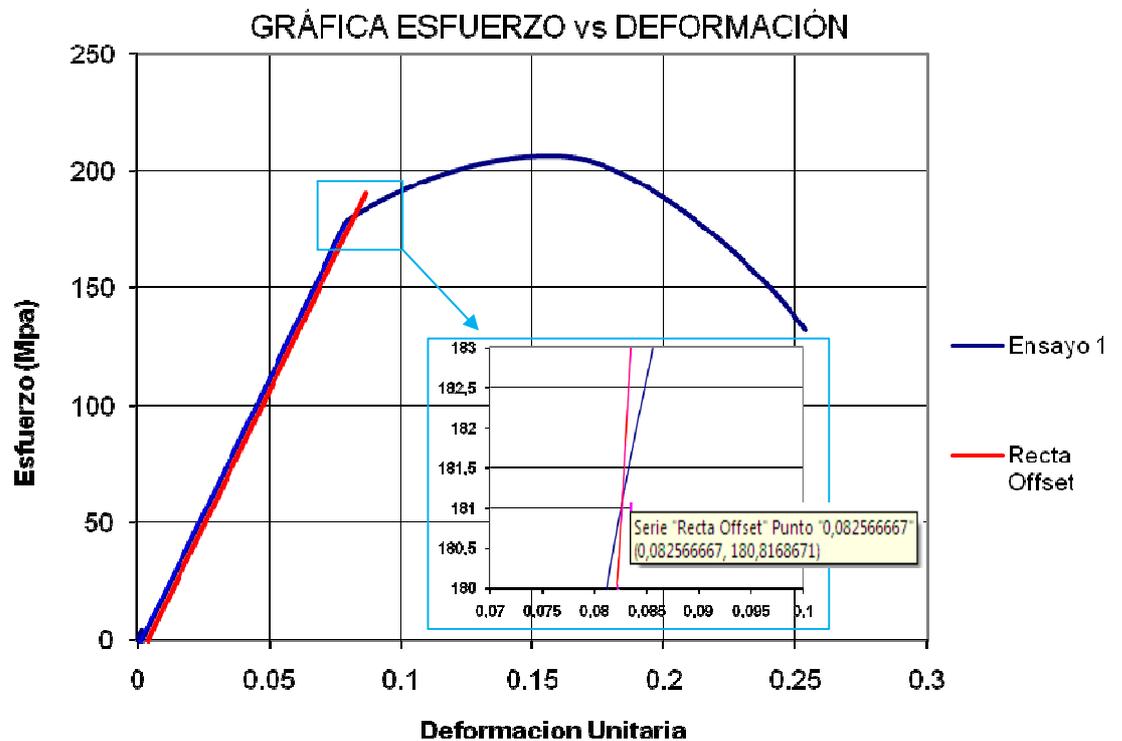


Figura 4.2. Intersección de la Curva “Esfuerzo-Deformación” con la recta offset.



A continuación se presentan las propiedades mecánicas determinadas con la información suministrada por las probetas ensayadas:

**Tabla 4.3.** Valores del esfuerzo de fluencia y máximo para la AA-6063

Probeta Numero	Sy (Mpa)	Smáx (Mpa)
1	177,48	206,36
2	184,41	211,61
3	182,46	210,75
Promedio (x):	181,45	209,57
Desviación estándar ( $\sigma$ ):	2,98	2,81

El valor de Esfuerzo de fluencia de 181,45 (Mpa) obtenido a través de los ensayos experimentales se compara con el valor de Esfuerzo de fluencia de 175 (Mpa) presentado por la Aluminium Association (Ver *Anexo 5*), observándose que la desviación entre estos dos valores se encuentra en un rango aceptable.

#### 4.5 ENSAYO A FATIGA

Una vez estudiados y analizados los factores (resistencia a la tracción y acabado superficial) que intervienen en el fenómeno de la fatiga, se procede a estudiar el comportamiento del material bajo esta condición. Para realizar esta parte de la investigación se midió la velocidad de giro de las mordazas de sujeción, con la finalidad de establecer un parámetro fijo tanto para los ensayos en un medio ambiente inerte (aire) como para las dos condiciones en medio corrosivo.



Tabla 4.4. Velocidad de giro para los ensayos de fatiga

VELOCIDAD DE ENSAYO	
MEDICIÓN #	Rev./min (rpm)
1	4386
2	4525
3	4423
4	4526
<b>PROMEDIO:</b>	<b>4465±71,47</b>

Los ensayos de fatiga se inician con la condición en un medio inerte, aplicando los esfuerzos teóricos del orden de 95%, 90%, 85%, 80%, 75% y adicionalmente con un 60%, esfuerzo para el cual la probeta no fracturó luego de 2.500.000 ciclos.

A continuación se presenta las tabla 4.5, 4.6 y 4.7 en donde se contemplan los resultados obtenidos por cada nivel de esfuerzo ensayado en las tres condiciones.

Tabla 4.5. Resultados obtenidos en los ensayos de fatiga de la primera condición (medio inerte).

PROBETA	RPM	Sy (Psi)	(%).TEORICO	Sy.TEÒRICO.(psi)	(%).REAL	Sy EXP. (psi)	CICLOS (N)	MOMENTO (Lb.plg)
CO-A-1	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	87700	39
CO-A-2	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	71700	39
CO-A-3	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	80600	39
CO-A-4	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	70600	39
CO-A-5	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	98200	39
CO-A-6	4465	26309,84	90	23678,90	89,92	23657,84	267600	36
CO-A-7	4465	26309,84	90	23678,90	89,92	23657,84	133300	36
CO-A-8	4465	26309,84	90	23678,90	89,92	23657,84	307900	36
CO-A-9	4465	26309,84	90	23678,90	89,92	23657,84	210000	36
CO-A-10	4465	26309,84	90	23678,90	89,92	23657,84	276700	36
CO-A-11	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	367500	34
CO-A-12	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	355600	34
CO-A-13	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	375100	34
CO-A-14	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	399400	34
CO-A-15	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	328700	34
CO-A-16	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	154400	32
CO-A-17	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	482700	32
CO-A-18	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	534900	32



CO-A-19	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	403200	32
CO-A-20	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	459800	32
CO-A-21	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	661800	30
CO-A-22	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	734400	30
CO-A-23	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	1131500	30
CO-A-24	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	852500	30
CO-A-25	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	1023000	30
CO-A-26	4465	26309,84	60	15785,90	59,45	15641,54	2500000	24

Tabla 4.6. Resultados obtenidos en los ensayos de fatiga en ácido sulfúrico al 5%

PROBETA	RPM	Sy (Psi)	(%).TEORICO	Sy.TEORICO.(psi)	(%).REAL	Sy EXP. (psi)	CICLOS (N)	MOMENTO (Lb.plg)
A5-A-1	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	14200	39
A5-A-2	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	12700	39
A5-A-3	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	25100	39
A5-A-4	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	18600	39
A5-A-5	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	20800	39
A5-A-6	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	27400	34
A5-A-7	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	32400	34
A5-A-8	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	29900	34
A5-A-9	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	28000	34
A5-A-10	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	29400	34
A5-A-11	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	35000	32
A5-A-12	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	28600	32
A5-A-13	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	31400	32
A5-A-14	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	29000	32
A5-A-15	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	35000	32
A5-A-16	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	86100	30
A5-A-17	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	91400	30
A5-A-18	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	89300	30
A5-A-19	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	81500	30
A5-A-20	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	84900	30
A5-A-21	4465	26309,84	50	15785,90	49,54	15641,54	168500	20
A5-A-22	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	152400	20
A5-A-23	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	128500	20
A5-A-24	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	190000	20
A5-A-25	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	168100	20



Tabla 4.7 Resultados obtenidos en los ensayos de fatiga en ácido sulfúrico al 15%

PROBETA	RPM	Sy (Psi)	(%).TEORICO	Sy.TEÒRICO.(psi)	(%).REAL	Sy EXP. (psi)	CICLOS (N)	MOMENTO (Lb.plg)
A15-A-1	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	19500	39
A15-A-2	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	19500	39
A15-A-3	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	18200	39
A15-A-4	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	26900	39
A15-A-5	4465	26309,84	95	24994,35	95,36	25091,65	19500	39
A15-A-6	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	21300	34
A15-A-7	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	19800	34
A15-A-8	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	31100	34
A15-A-9	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	45700	34
A15-A-10	4465	26309,84	85	22363,37	85,46	22484,72	31500	34
A15-A-11	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	26900	32
A15-A-12	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	23200	32
A15-A-13	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	26000	32
A15-A-14	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	24100	32
A15-A-15	4465	26309,84	80	21047,87	80,01	21050,91	22000	32
A15-A-16	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	24900	30
A15-A-17	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	53200	30
A15-A-18	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	62100	30
A15-A-19	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	56000	30
A15-A-20	4465	26309,84	75	19732,40	75,05	19747,45	54700	30
A15-A-21	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	53500	20
A15-A-22	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	168500	20
A15-A-23	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	152400	20
A15-A-24	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	128500	20
A15-A-25	4465	26309,84	50	13154,92	49,54	13034,62	190000	20



De los resultados obtenidos, mostrados en la tabla 4.7, se puede observar que mientras mayor es el esfuerzo aplicado, menor es la dispersión en los resultados obtenidos de los ciclos de falla. Esto se puede comprobar mediante el cálculo de la desviación estándar de los ciclos de falla por cada nivel de esfuerzo.

Tabla 4.8. Desviación estándar de los ciclos de falla para la condición en medio inerte.

PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	CARGA (%)
81760	11539,62	95,36
239100	68920,06	89,92
365260	25967,92	85,46
407000	148910,99	80,01
880640	195746,02	75,05

Una de las explicaciones a este comportamiento se debe principalmente a que a bajos esfuerzos los múltiples factores como: el tipo de material, su grado de aleación, método de fabricación, condiciones y atmósfera de trabajo, presencia de entallas, rugosidad, que afectan a la resistencia a la fatiga tienen una mayor influencia que para altos esfuerzos.

A pesar de que se este controlando el parámetro de rugosidad dentro de cierto rango de valores, este sigue influyendo en la dispersión de los valores obtenidos en la resistencia a la fatiga.

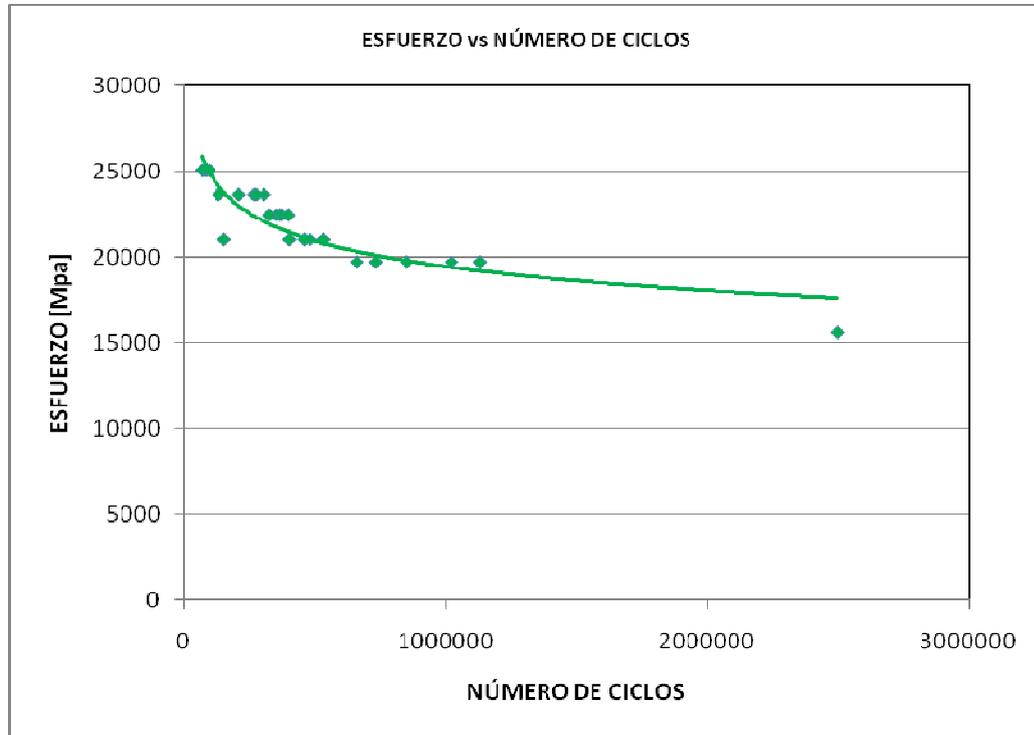


Figura 4.3. Gráfica esfuerzo vs número de ciclos de la condición inicial (medio inerte).

En la figura 4.4. se puede observar por cada nivel de esfuerzo los puntos que representan el número de ciclos a la cual falló cada probeta, con excepción del ultimo nivel de esfuerzo que representa solo los ciclos a los que se consideró como vida infinita.

Desafortunadamente existe una dispersión considerable en los datos obtenidos en estos ensayos de resistencia a la fatiga, esto es, una variación en los valores medidos de "N" para un número de probetas ensayadas en los mismos niveles de tensiones. Esto puede guiar a incertidumbres en el diseño cuando se consideran vida a la fatiga y/o límite de fatiga. La dispersión de los resultados es consecuencia de la sensibilidad de la fatiga al número de ensayos y parámetros del material, imposibles de controlar precisamente. Estos parámetros incluyen fabricación de la pieza de ensayo, preparación de la superficie, variables metalúrgicas, alineación de las



probetas en el equipo de ensayo, tensiones a las que esta sujeta y frecuencia del ensayo.

Para la obtención de la curva que mejor se ajustaba a los puntos graficados, se utilizó un modelo potencial, el cual tiene su base en la ecuación de Basquin (1910). Las ecuaciones resultantes fueron las siguientes:

$$\text{Curva en medio inerte: } E = 86679.N_f^{-0,108} \quad R^2 = 0,8229$$

Donde:

E: Esfuerzo [Mpa]

$N_f$ : Numero de Ciclos de Falla

$R^2$ : Coeficiente de correlación.

Estas ecuaciones fueron calculadas mediante el programa Microsoft Excel 2008. Las mismas pueden ser linealizadas de la siguiente manera:

$$S = A \times N^k$$

$$\text{LogS} = \text{LogA} + k\text{LogN}$$

$$\text{LogS} = Y$$

$$\text{LogA} = b$$

$$\text{LogN} = X$$

$$k = m$$

$$Y = mX + b$$



Estas ecuaciones se pueden graficar en un Sistema Bilogarítmico obteniéndose el siguiente gráfico:

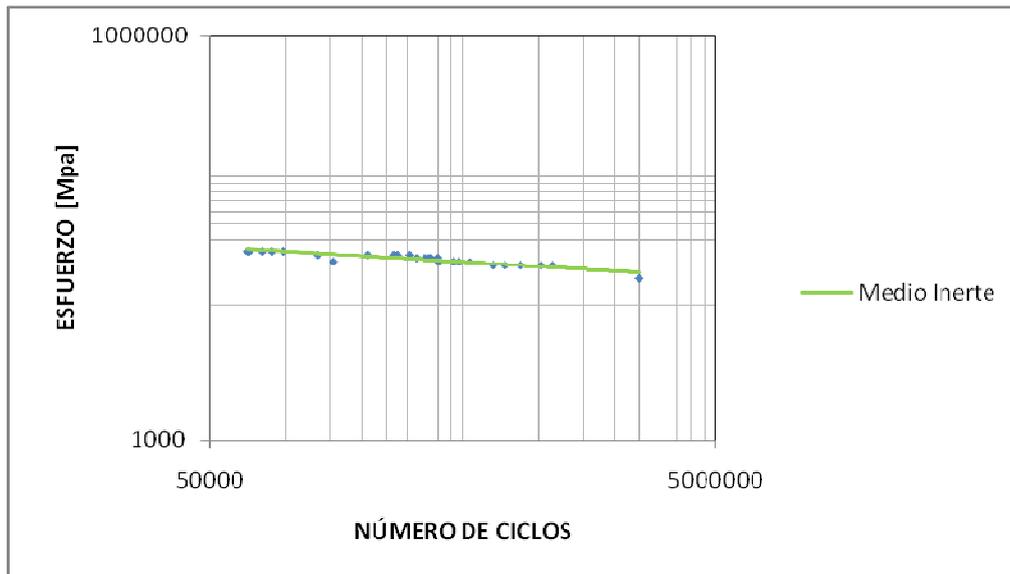


Figura 4.4. Gráfica de los ensayos de fatiga a las probetas en un medio inerte.

Para los ensayos realizados en condiciones corrosivas también se realizaron las gráficas de esfuerzo vs número de ciclos, en donde se puede evidenciar el comportamiento de la aleación de aluminio AA-6063 bajo estos factores adicionales.

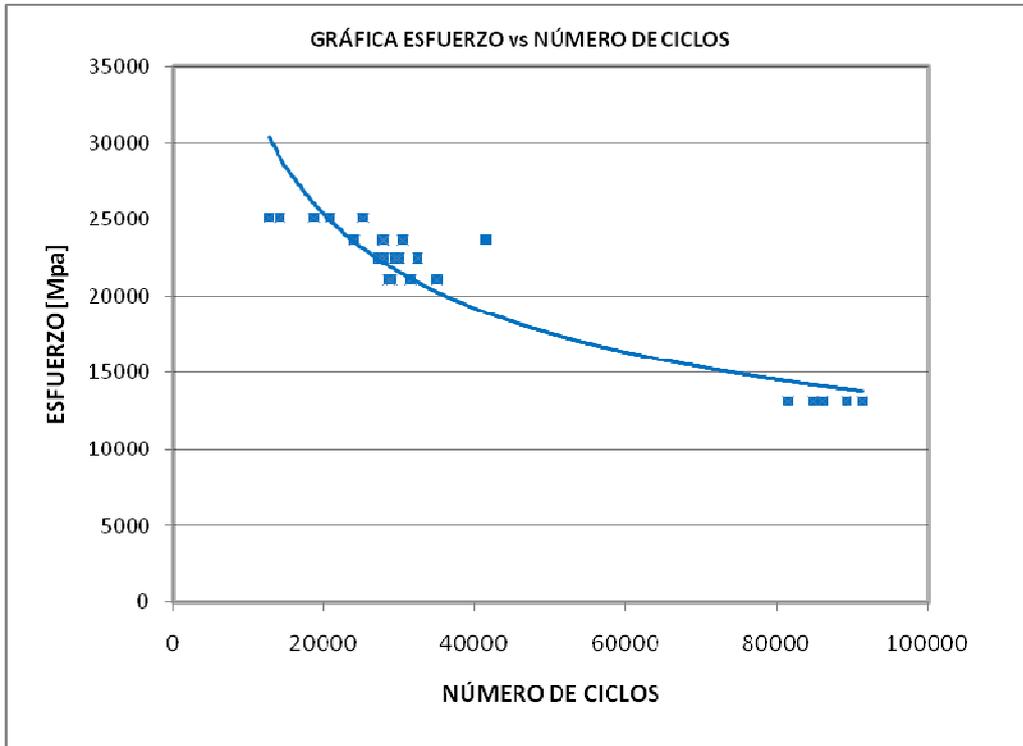
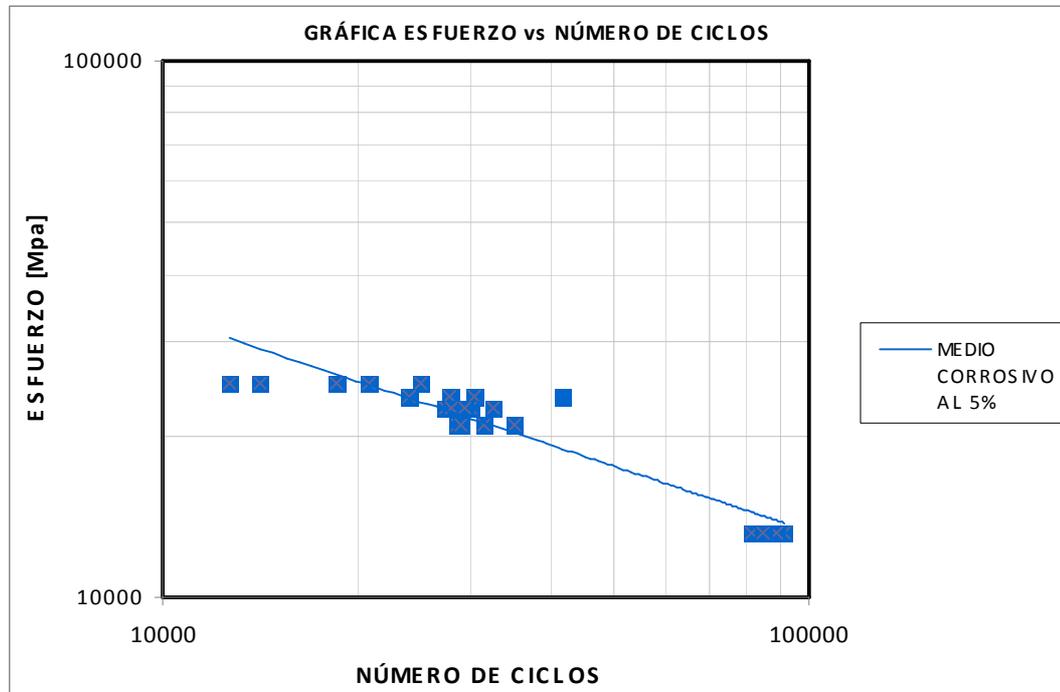


Figura 4.5. Gráfica de los ensayos de fatiga a las probetas en ácido sulfúrico al 5%.

Al igual que para la curva anterior, se utilizó un modelo potencial basado en el modelo de Basquin obteniéndose la siguiente ecuación:

Curva en medio corrosivo al 5%:  $E = 1000000.N_f^{-0,401}$   $R^2 = 0,8695$



**Figura 4.6.** Gráfica bilogarítmica de los ensayos de fatiga a las probetas de AA-6063 en ácido sulfúrico al 5%.

En la gráfica 4.7 se representa los valores obtenidos del ensayo de fatiga realizado a las probetas de aluminio 6063 sometidas a la acción del ácido sulfúrico al 15% de concentración.

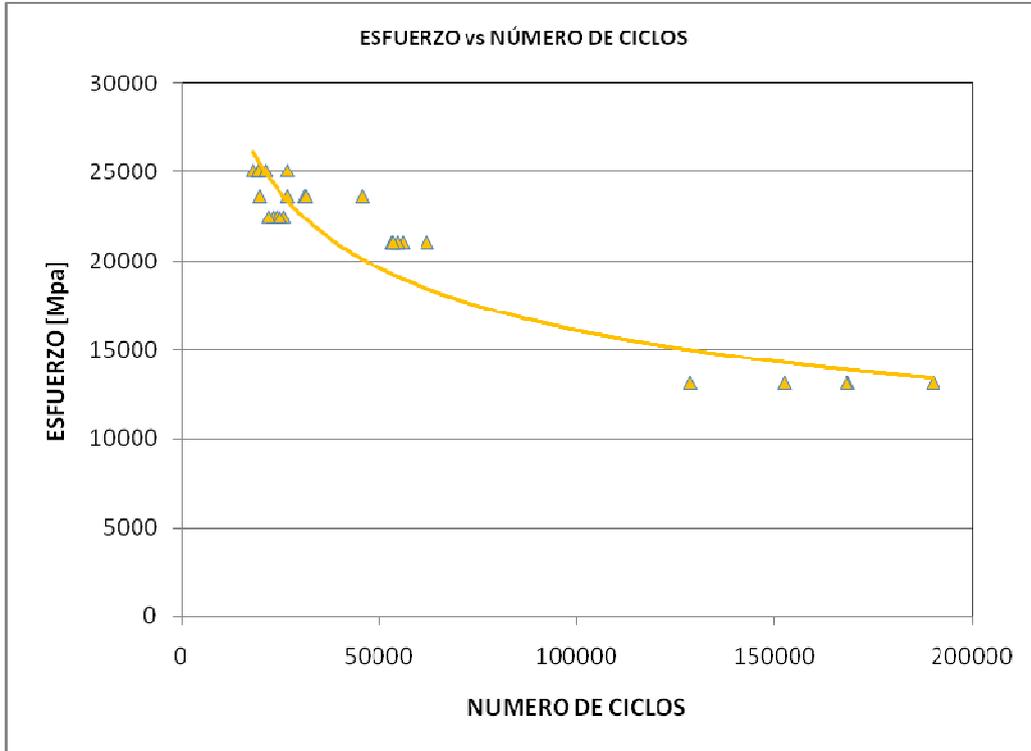


Figura 4.7. Gráfica de los ensayos de fatiga a las probetas de AA-6063 en ácido sulfúrico al 15%.

Curva en medio corrosivo al 15%:  $E = 428595.N_f^{-0,285}$   $R^2 = 0,883$

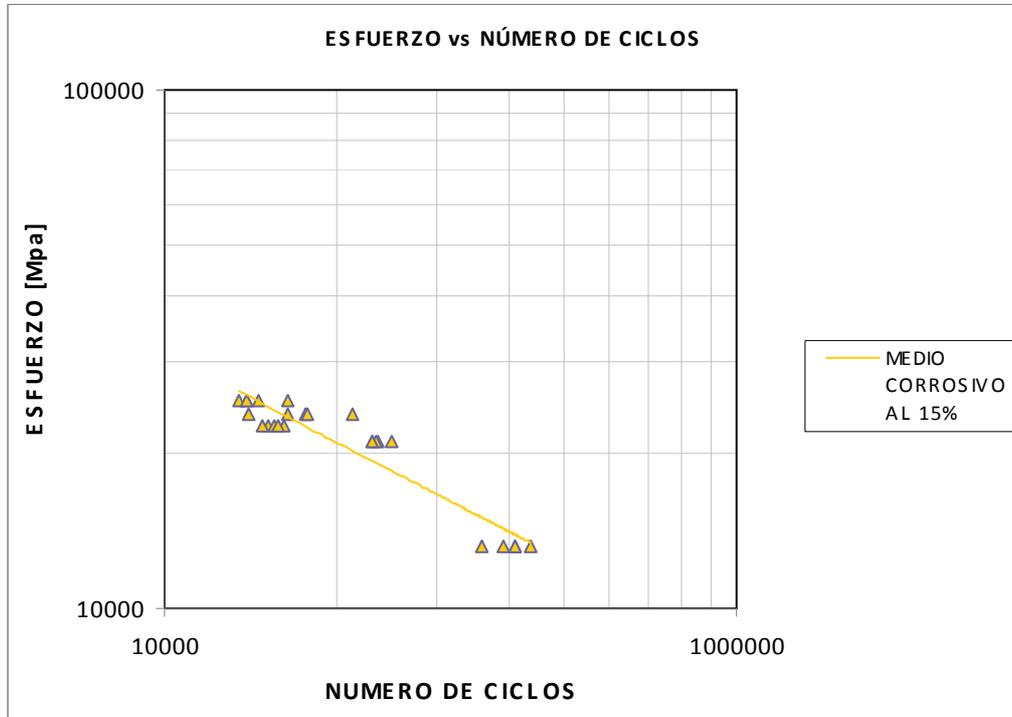
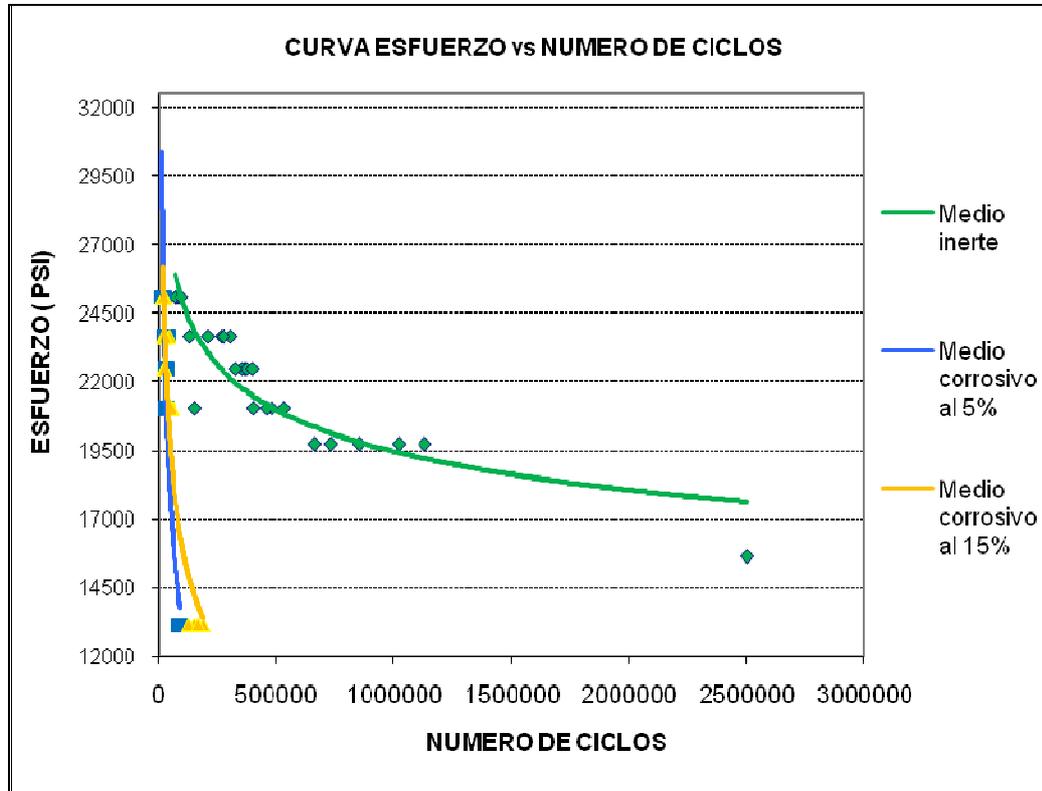


Figura 4.8. Gráfica bilogarítmica de los ensayos de fatiga a las probetas de AA-6063 en ácido sulfúrico al 15%.

Realizando un gráfico comparativo entre las curvas obtenidas en los distintos medios obtenemos lo siguiente:



**Figura 4.9.** Gráfica comparativa de los ensayos de fatiga a las probetas de AA-6063 en los diferentes medios.

En la gráfica 4.9, se observa que al aumentar la concentración del ácido sulfúrico del 5% al 15% el número de ciclos aumentó, resultando esto inesperado e interesante. Se sabe que el aluminio aumenta su velocidad de corrosión con un aumento del pH de la solución en medio acuoso. Tal vez es el caso de nuestros ensayos [22].

El resultado inesperado se puede explicar de la siguiente manera: en la concentración del 5%, cerca de 1N, prevalece una condición reductora y el aluminio se oxida en la zona activa de la curva de polarización anódica que es susceptible de experimentar el aluminio. Al aumentar la concentración al 15% se puede esperar una



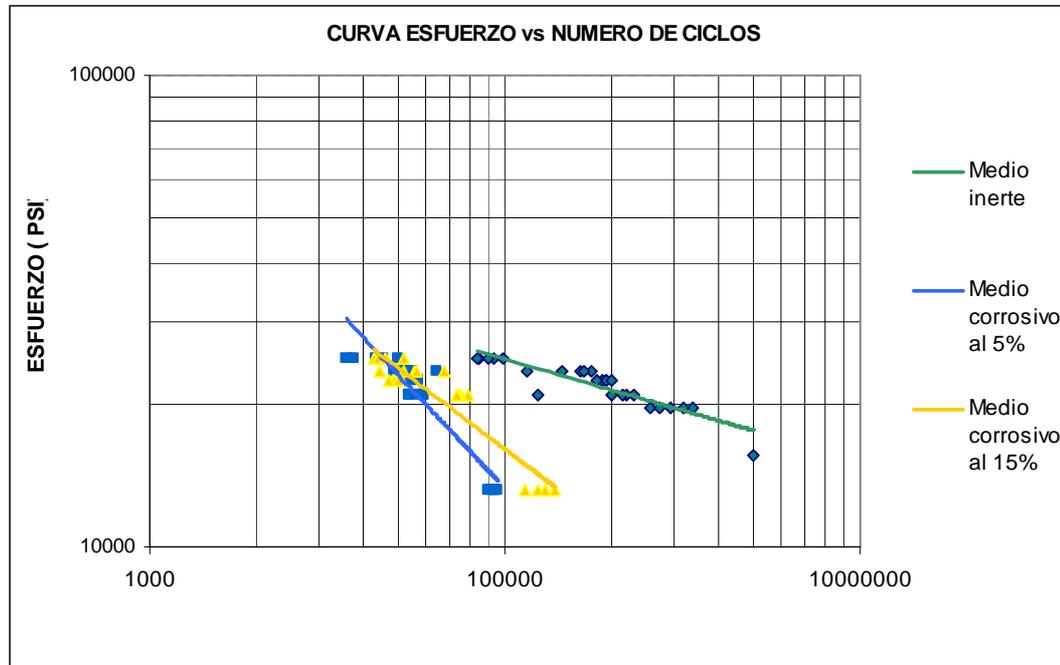
---

condición oxidante y el aluminio podría pasivarse con formación de un óxido estable, en condiciones de no fatiga [22]. El esfuerzo alternante aplicado introduce condiciones de rotura y nueva formación del óxido.

Lo que ocurrió en nuestros ensayos con la película de óxido en la zona pasiva es de esperarse. Si fuera completamente estable se ha debido dar una mayor prolongación de la vida de fatiga en concordancia con el hecho, de que metales y aleaciones que experimentan la transición activo-pasivo como aceros, aceros inoxidable, titanio y otros, reducen significativamente su velocidad de corrosión cuando se pasiva mediante polarización anódica. Por esta vía se han obtenido disminuciones en la velocidad de corrosión hasta de tres órdenes de magnitud [23].

El pequeño aumento en la vida de fatiga de la aleación de aluminio 6063 al aumentar la concentración del ácido al 15%, confirma que la protección del óxido pasivante que se crea es limitadora.

Se pueden realizar otros ensayos aumentando la concentración del ácido a valores mayores, del orden del 40% y 50% para alcanzar la zona típica transpasiva que en condiciones de alta concentración del oxidante experimentan los metales y aleaciones con transición activo-pasivo. Si esto ocurre, será un fuerte aporte a la interpretación de nuestros resultados.



**Figura 4.10.** Gráfica comparativa bilogarítmica de los ensayos de fatiga a las probetas de AA-6063 en los diferentes medios.

La fatiga por corrosión implica un deterioro mayor en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 6063 a través de la acción simultánea de los esfuerzos alternantes y la exposición al medio ambiente corrosivo. Cuando el esfuerzo aplicado es alto se acentúan las condiciones de fatiga, mientras que cuando se reduce el esfuerzo se podría estar dando más tiempo para que el medio corrosivo ejerza su acción de disolución del metal. Esto dependerá de las características del medio agresivo, esto es, de la concentración, del contenido de oxígeno, velocidad del flujo, contaminantes, etc. En la figura 4.10 se observa que la vida de fatiga de la aleación de aluminio experimentó un aumento cuando la concentración del ácido sulfúrico pasa de 5% al 15%.

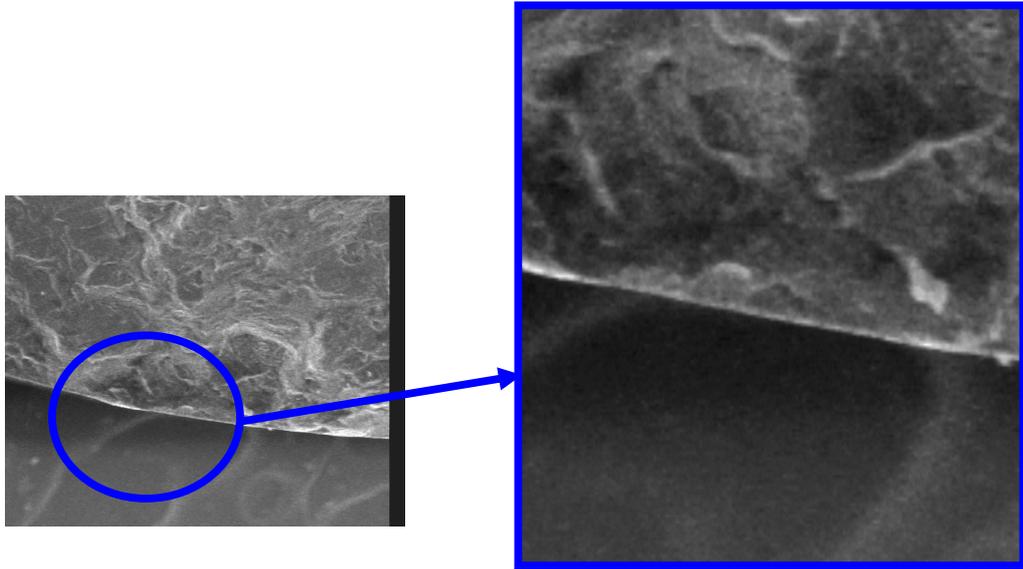


Figura 4.11. Borde de la probeta en medio inerte.

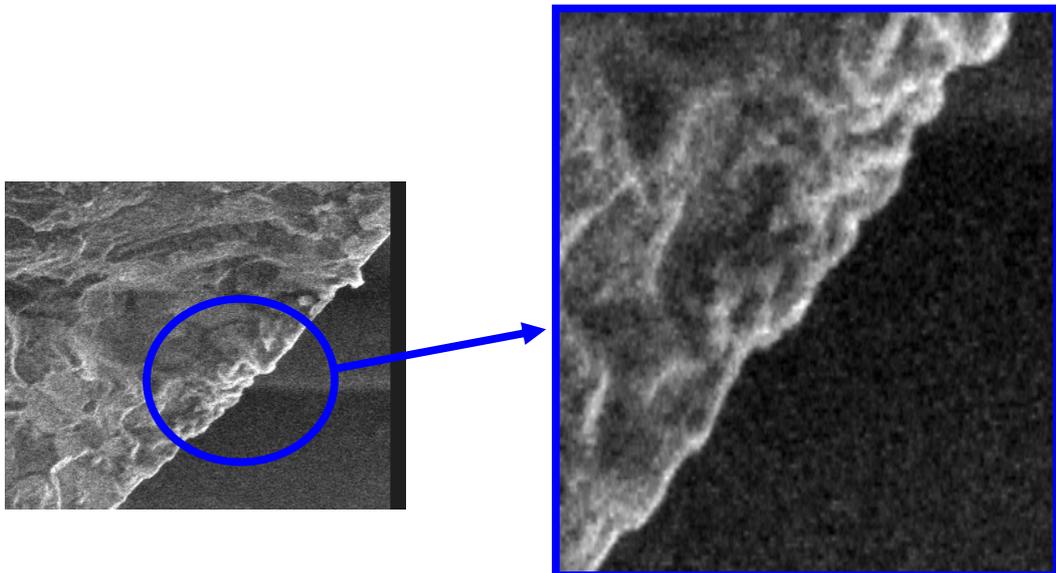


Figura 4.12. Borde de la probeta en medio corrosivo.



---

Al existir desprendimiento en la superficie del aluminio se van generando pequeños cráteres (ver *Anexo 10*) cuando los esfuerzos son bajos, estos fungen como concentradores de esfuerzo y hacen que la resistencia a la fatiga disminuya.

En la figura 4.12 se observa en la zona de fatiga la aparición de productos de corrosión, en ésta el borde presenta irregularidades causadas por el desprendiendo de material, en lugar de ser una zona casi suave como en fatiga sola, lo cual se puede observar en la figura 4.11.

Si comparamos las curvas en el anexo número 10, la pendiente de la curva cuando se ensaya con ácido al 5% es mayor que la pendiente de la curva cuando se trabaja con ácido al 15% y se puede evidenciar que mientras más concentrado este el ácido sulfúrico, se tiende a mejorar la resistencia a la fatiga.

Cuantitativamente no se encontró un soporte técnico u otro trabajo que afianzara los resultados obtenidos en esta investigación. No obstante se consulto la bibliografía de autores como el profesor de la Universidad de Carabobo Ing. Iván Uzcategui o el Dr. Luís A. Godoy de la Universidad de Puerto Rico, entre otros, los cuales aportan cualitativamente las bases teóricas que fundamentan este fenómeno presente en los resultados obtenidos a través de los ensayos de fatiga por corrosión.

Estos autores coinciden en el hecho de que al tener una aleación de aluminio en presencia de ácido sulfúrico, esta se comportara en este medio corrosivo de manera más favorable a medida que la concentración aumenta, obteniendo el material un recubrimiento de manera artificial de oxido de aluminio, muy característico por su excelente resistencia a los agentes químicos y dureza.



#### 4.6 ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO.

Se procedió a realizar un estudio de fractografía con la intención de analizar y asociar la proporción del modo de falla (dúctil o frágil) para altas y bajas cargas de fatiga, y la identificación de marcas características (dimples y facetas de clivajes) por cada modo de falla.

Para el análisis de las zonas dúctiles y frágiles se utilizó el programa informático Autocad 2008, en el cual se delimitaron las zonas mediante dos trazados diferentes. El programa es capaz de suministrar el área de cada trazado y así obtener de forma precisa los porcentajes de la zona frágil (zona brillante y trazada con puntos) y de la zona dúctil (zona opaca y trazada con líneas)

La fragilidad o ductilidad del material quedan en general reveladas en la superficie de fractura. Una aleación más bien dúctil presenta una superficie de fractura con cavidades características llamados dimples, pero un material más bien frágil rompe preferentemente por un mecanismo de clivaje transgranular. En el caso general estos modos de fractura aparecen mezclados, pero la proporción relativa de los distintos tipos (figura 4.13), es indicativa de las propiedades fracto - mecánicas de la aleación de aluminio 6063.

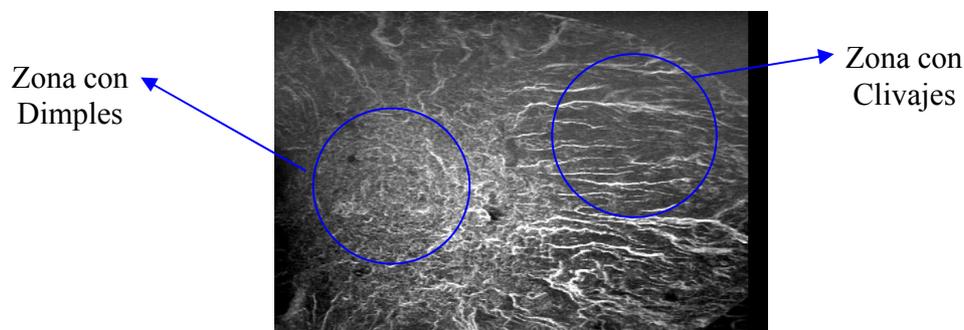


Figura 4.13. Zonas de rotura de la aleación de aluminio 6063.

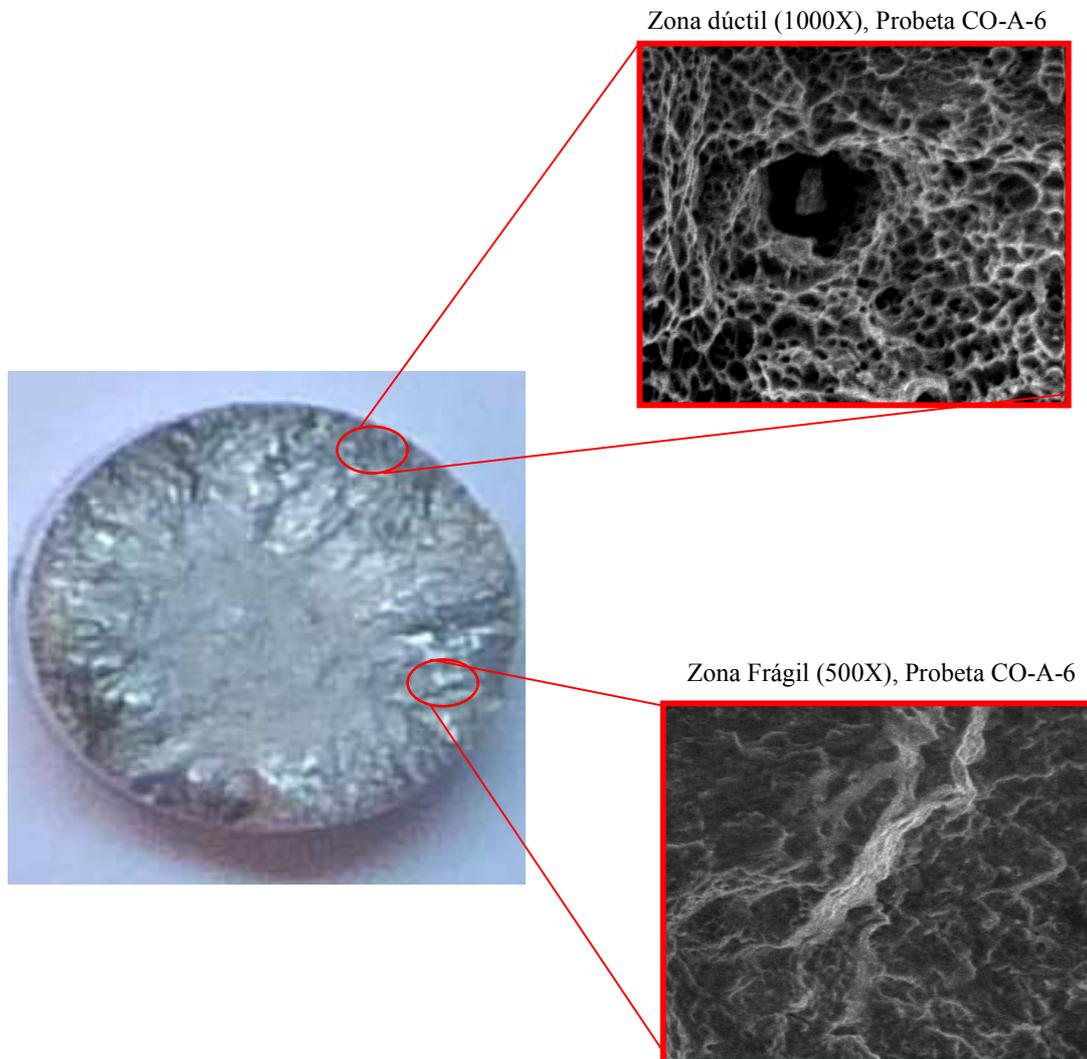
### Condición medio inerte

Probeta CO-A-2, esfuerzo aplicado  $S_y = 23678,90$  (Psi) que representa el 95% del esfuerzo de fluencia, Momento aplicado de  $36$  (lb \* plg) y número de ciclos de rotura 71700.



**Figura 4.14.** Foto de la superficie de fractura en la probeta CO-A-6

La zona que se observa opaca (*Figura 4.14.*) es la zona dúctil la cual representa un 25,15% y la zona que se aprecia brillante es la zona frágil la cual representa un 74,850 %, en esta fractura existe mayor presencia de clivajes que de dimples y es característico de roturas rápidas.



**Figura 4.15.** Proporciones relativas de la zona de rotura

En la foto superior derecha de la Figura 4.15, se notan las cavidades (dimples) que son la resultante de la coalescencia de microcavidades iniciales alrededor de inclusiones, partículas o discontinuidades que originan una concentración de tensiones y un aumento local de la deformación plástica.

En la foto inferior derecha de la Figura 4.15. Se pueden observar los característicos “ríos de clivaje” (river patterns), siendo esta la de mayor porcentaje.

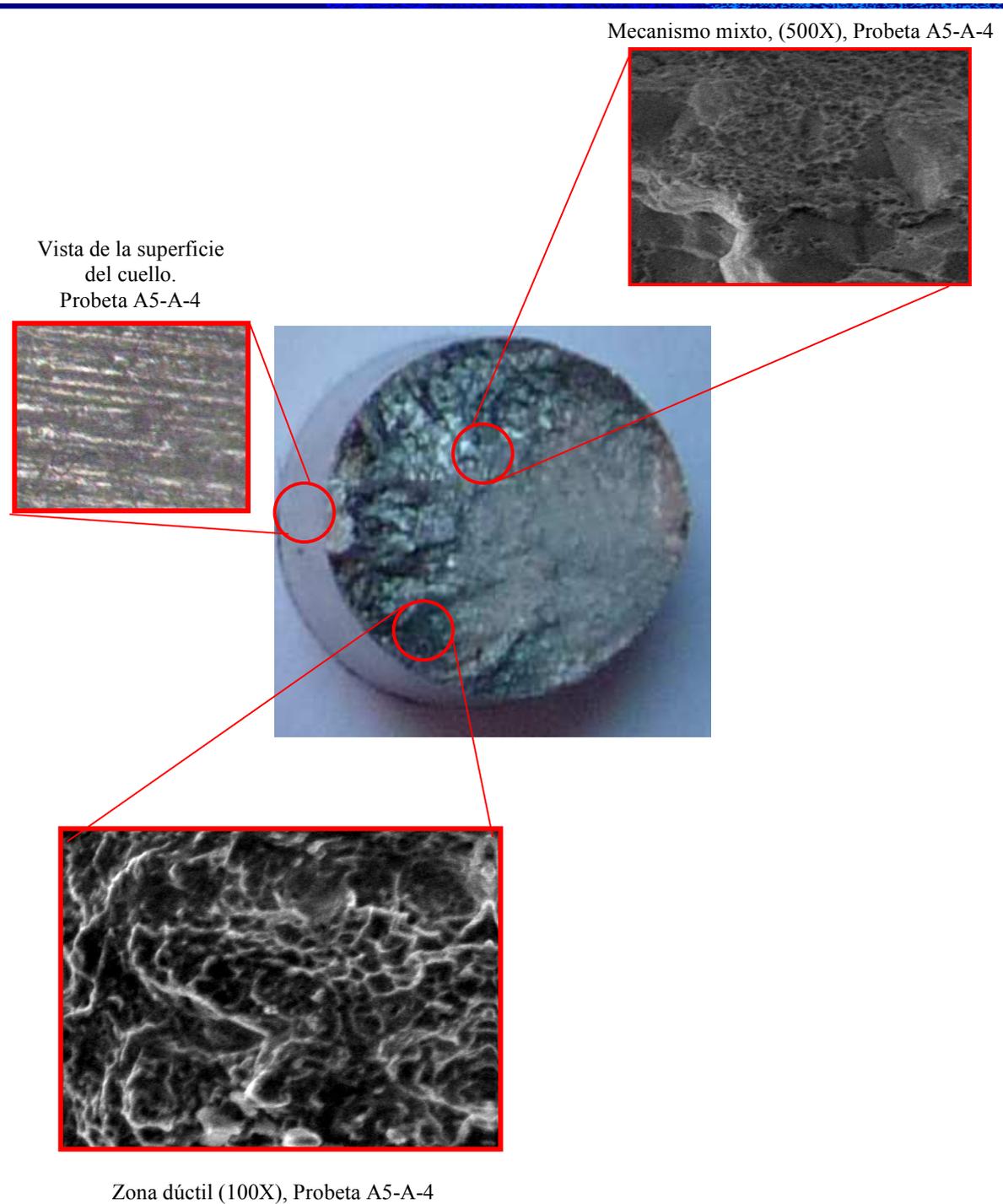
### Condición ácido sulfúrico al 5%

Probeta A5-A-4, esfuerzo aplicado  $S_y = 23678,90$  (Psi) que representa el 95 % del esfuerzo de fluencia, Momento aplicado de 36 (lb \* plg) y número de ciclos de rotura de 18600.



**Figura 4.16.** Foto de la superficie de fractura en la probeta A5-A-4

La zona que se observa opaca (*Figura 4.16.*) es la zona dúctil la cual representa un 26,18 % y la zona que se aprecia brillante es la zona frágil la cual representa un 73,82 %, en esta fractura existe mayor presencia de clivajes que de dimples y es característico de roturas rápidas.

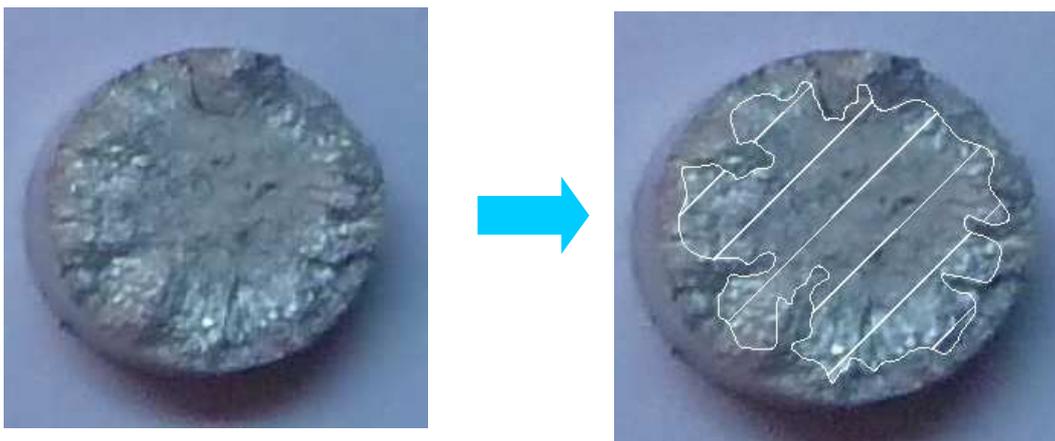


**Figura 4.17.** Proporciones relativas de la zona de rotura en presencia de ácido sulfúrico al 5%.

En la foto superior izquierda de la Figura 4.17. se puede apreciar el inicio del ataque químico producido por el ácido sulfúrico, en donde se observa una leve picadura. También se puede observar en la foto superior derecha un mecanismo mixto de fractura donde están presente las zonas dúctil – frágil.

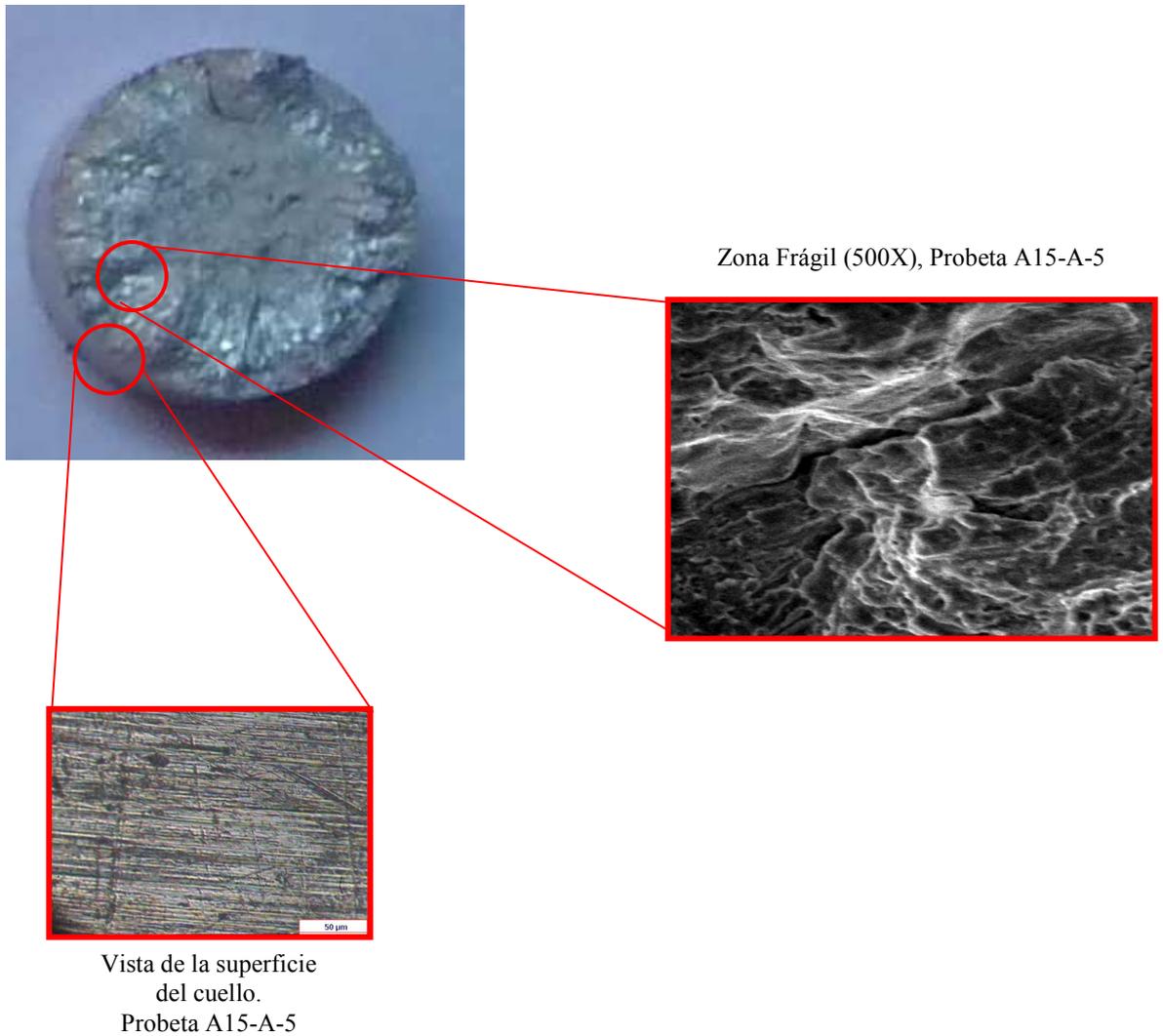
### Condición ácido sulfúrico al 15%

Probeta A15-A-5, esfuerzo aplicado  $S_y = 23678,90$  (Psi) que representa el 95 % del esfuerzo de fluencia, Momento aplicado de  $36$  (lb \* plg) y número de ciclos de rotura de 19500.



**Figura 4.18.** Foto de la superficie de fractura en la probeta A15-A-5

La zona que se observa opaca (*Figura 4.18*) es la zona dúctil la cual representa un 23,72 % y la zona que se aprecia brillante es la zona frágil la cual representa un 76,29 %, en esta fractura se asemeja a las características de las fotos anteriores en donde prevalece la fragilidad como modo de rotura.

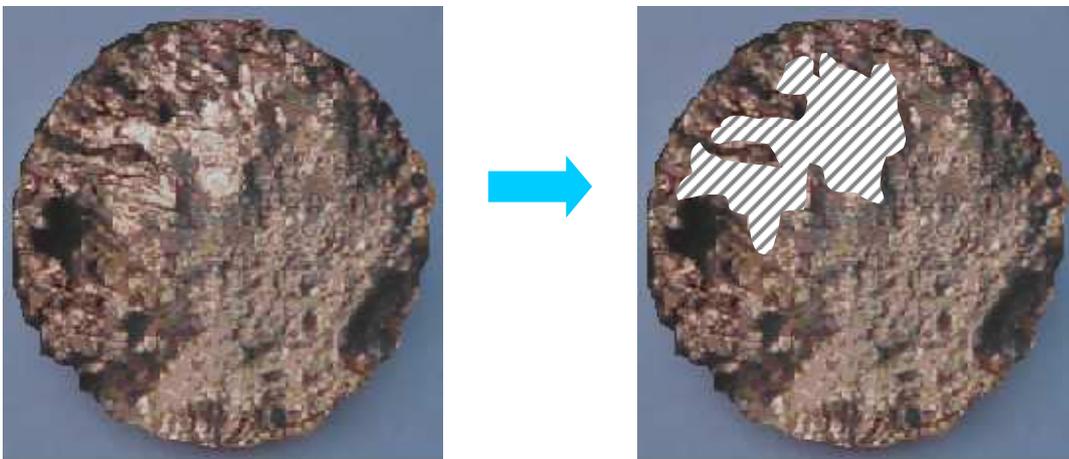


**Figura 4.19.** Proporciones relativas de la zona de rotura en presencia de ácido sulfúrico al 15%.

En la figura 4.19 se observa en la foto superior derecha el mecanismo de fractura dúctil, ubicándose en esta impresión una micro grieta entre los llamados “ríos de clivaje” (river patterns). En la foto inferior izquierda conseguimos el detalle visto en el microscopio del estado de la superficie al estar sometido al medio corrosivo al 15%.

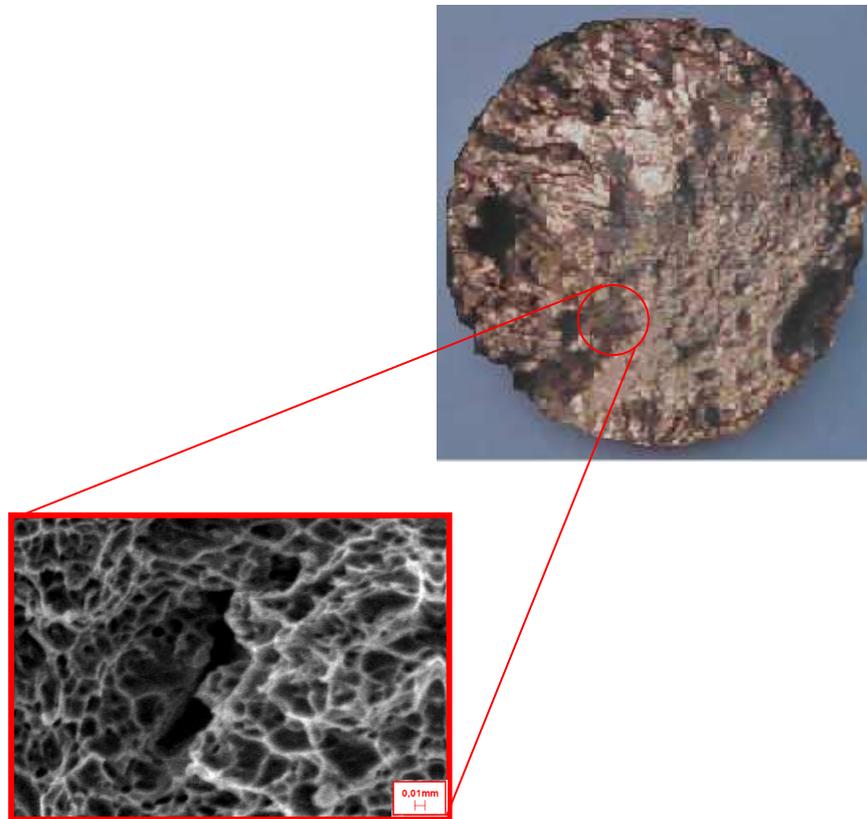
### Condición medio Inerte

Probeta CO-A-26, esfuerzo aplicado  $S_y = 15641,54$  (Psi) que representa el 60 % del esfuerzo de fluencia, Momento aplicado de 24 (lb \* plg) y número de ciclos de rotura de 2500000.



**Figura 4.20.** Foto de la superficie de fractura en la probeta CO-A-26.

La zona que se observa opaca (*Figura 4.20*) es la zona dúctil la cual representa un 85,32 % y la zona que se aprecia brillante es la zona frágil la cual representa un 14,68 %.



Zona dúctil, (1000X), CO-A-26

**Figura 4.21.** Proporciones relativas de la zona de rotura en presencia de medio ambiente.

### **Condición ácido sulfúrico al 5%**

Probeta A5-A-21, esfuerzo aplicado  $S_y = 15785,90$  (Psi) que representa el 50 % del esfuerzo de fluencia, Momento aplicado de 20 (lb \* plg) y número de ciclos de rotura de 168500.



**Figura 4.22.** Foto de la superficie de fractura en la probeta A5-A-21.

La zona que se observa opaca (*Figura 4.22.*) es la zona dúctil la cual representa un 88,46 % y la zona que se aprecia brillante es la zona frágil la cual representa un 11,54 %.

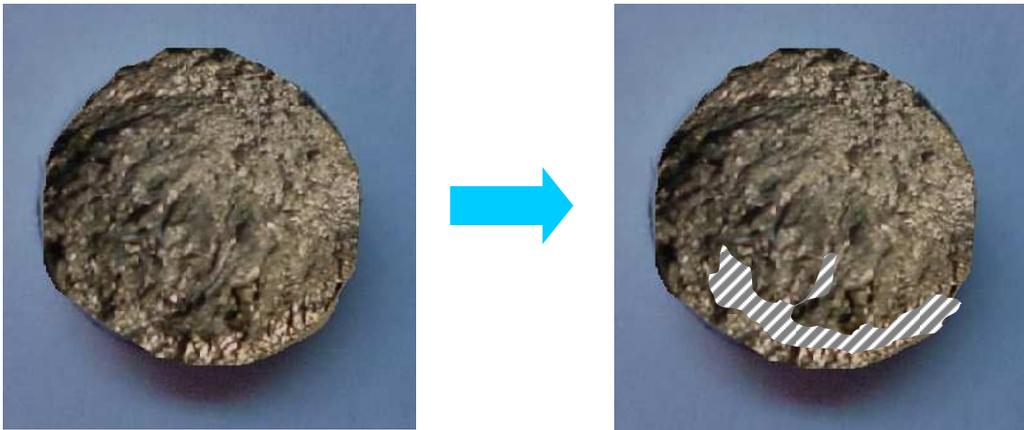


**Figura 4.23.** Proporciones relativas de la zona de rotura en presencia de ácido sulfúrico al 5%.

En la foto inferior derecha de la Figura 4.23 se puede observar el grado de ataque del ácido sulfúrico en los bordes de la superficie de la probeta, también en la foto superior derecha se observa el grado de ataque corrosivo que presenta la superficie, esto debido a que existe un periodo mas largo de exposición al ácido dando mas tiempo a que éste actué y logre crear grandes poros que se convierten en concentradores de esfuerzos.

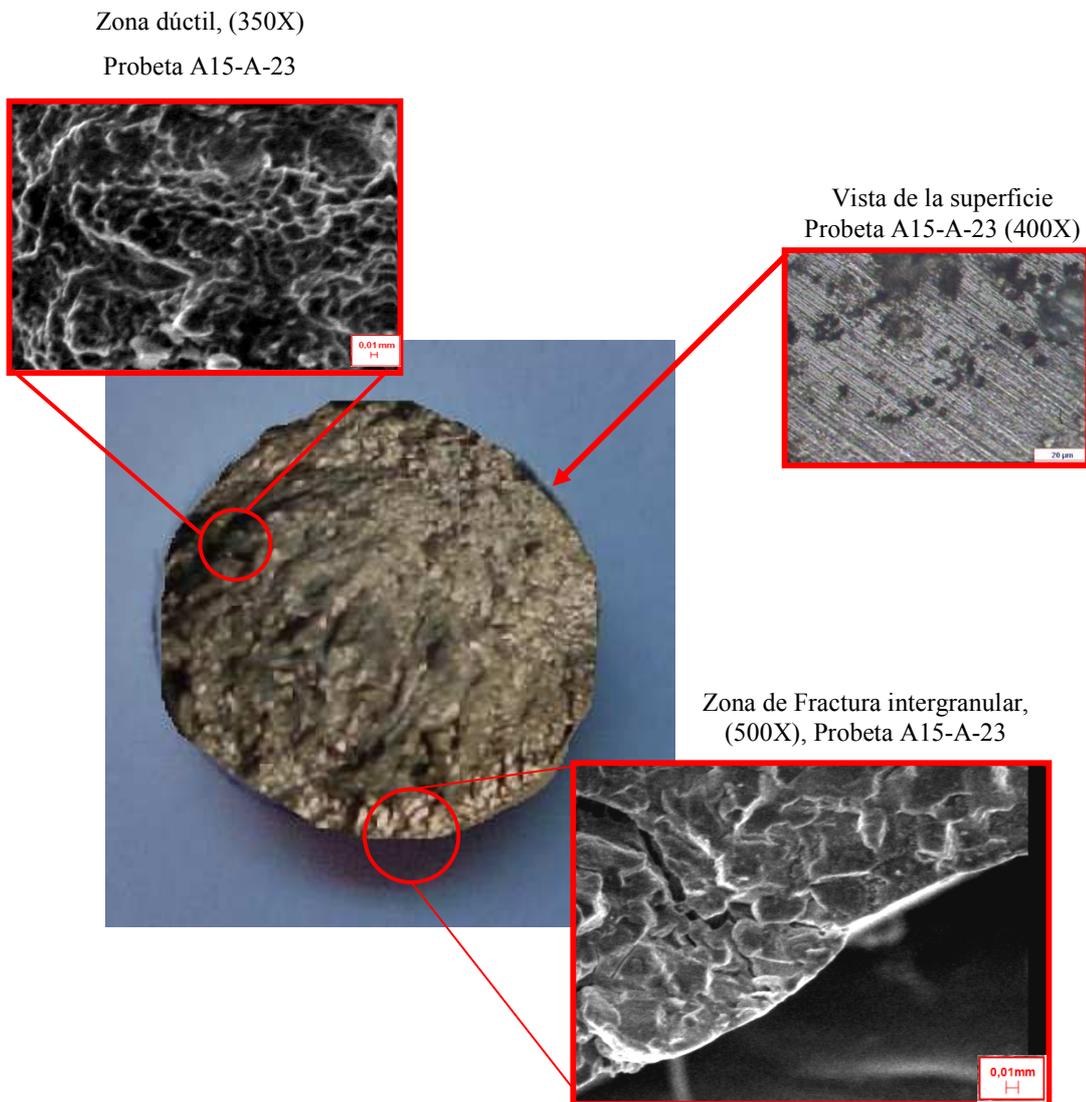
### Condición ácido sulfúrico al 15%

Probeta A15-A-23, esfuerzo aplicado  $S_y = 13034,62$  (Psi) que representa el 50% del esfuerzo de fluencia, Momento aplicado de 20 (lb \* plg) y número de ciclos de rotura de 152400.



**Figura 4.24.** Foto de la superficie de fractura en la probeta A15-A-23

La zona que se observa opaca (*Figura 4.24*) es la zona dúctil la cual representa un 88,67 % y la zona que se aprecia brillante es la zona frágil la cual representa un 11,32 %.



**Figura 4.25.** Proporciones relativas de la zona de rotura en presencia de ácido sulfúrico al 15%.

En la foto inferior derecha se observa la presencia de fractura intergranular que suele aparecer en procesos de fatiga por corrosión, también podemos observar en la foto superior derecha el grado de ataque corrosivo que presenta la superficie de la



---

probeta, esto debido a que existe un periodo mas largo de exposición al ácido dando mas tiempo a que éste actúe y logre crear grandes poros que se convierten en concentradores de esfuerzos. La cantidad de poros que se observan cuando se ataca con ácido sulfúrico al 15% es menor que cuando se ataca con el mismo ácido pero con una concentración de 5%.



---

## CONCLUSIONES

Del estudio de las propiedades mecánicas del aluminio AA – 6063 en relación a la resistencia a la fatiga en medio inerte (al aire) y corrosivo (ácido sulfúrico al 5 y 15 %) se encontró:

1. La resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA – 6063 se ve severamente afectada debido a la influencia del ácido sulfúrico, tanto para concentración al 5% como al 15%, encontrándose una disminución de la vida a fatiga con respecto al medio inerte, dependiendo del esfuerzo alternante aplicado.
2. El periodo de exposición del agente corrosivo sobre el material tiene un papel importante en la fatiga por corrosión, ya que a mayor exposición mayor va a ser el ataque y la formación de picaduras profundas, las que pasarán a ser concentradores de esfuerzo que harán disminuir la resistencia a la fatiga.
3. Con la microscopía electrónica de barrido, se observó que el comportamiento de fatiga de la aleación de aluminio 6063 presenta una zona de fractura donde predomina la fractura dúctil al ser sometida a bajos esfuerzos y con esfuerzos altos predomina una zona de fractura frágil.
4. Los efectos en el mecanizado no fueron factor determinante en la fractura de la aleación de aluminio 6063 durante los ensayos a fatiga, debido a que la rugosidad superficial fue un parámetro uniforme ubicándose en un valor aproximado de  $0.43 \mu\text{m}$ .
5. La polarización anódica de la aleación de aluminio influyó directamente en la vida de fatiga del material, al variar la concentración del ácido sulfúrico en valores de 5% al 15%



---

## RECOMENDACIONES

1. Realizar un estudio de fatiga para la aleación de aluminio AA-6063 en un medio corrosivo de ácido sulfúrico, aumentando las concentraciones a un 30% y 50% y observar su influencia en dicha aleación.
2. Realizar un estudio de fatiga para la aleación de aluminio AA-6063, usando el mismo medio corrosivo pero manteniendo la temperatura del ácido sulfúrico en condiciones ambientales a través de un intercambiador de calor y observar la influencia de esta variable en la investigación.
3. Realizar un estudio de fatiga en un medio corrosivo de ácido sulfúrico al 5% y 15%, usando la aleación de aluminio AA-6063 con otros tipos de tratamientos térmicos y observar su comportamiento bajo estas condiciones.
4. Realizar un estudio de fatiga en un medio corrosivo de ácido sulfúrico al 5% y 15%, empleando otros medios corrosivos y establecer las comparaciones pertinentes entre los resultados obtenidos y los presentados en esta investigación.
5. Reparar el sensor de parada de la maquina de fatiga, así como también el sensor de alineación, para evitar que se ensayen probetas que estén dobladas, ya que mediante este ultimo sensor, la maquina no arranca si la probeta no está completamente recta.
6. Realizar un estudio de anodizado a la aleación de aluminio 6063, para visualizar el efecto de la capa protectora de óxido de aluminio sobre la vida de fatiga del material.



- 
7. Realizar ensayos de fatiga con corrosión a la aleación de aluminio 6063 variando la velocidad de de giro de la maquina de roto-flexión, para determinar su efecto en la vida de fatiga del material.
  8. Realizar mediante un potencióstato la curva de polarización anódica de la aleación 6063, en ácido sulfúrico de concentración 1N.



---

## REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

- [1] Rafael Avilés (2005). Análisis de fatiga en máquinas. Editorial Thomson Learning Ibero.
- [2] Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke.(2003). Diseño en Ingeniería Mecánica (6ta edición). Editorial McGraw Hill.
- [3] F. A. Champion, Ensayos de Corrosión, Ediciones Urmo, Bilbao, 1964.
- [4] J.C. Scully, M. A., Fundamentos de la Corrosión, Editorial Alhambra, 1993.
- [5] Williams Smith, Fundamentos de las ciencias e ingeniería de materiales, McGraw Hill, Segunda edición, España 1993.
- [6] King, S. (1972). *El Aluminio y sus aleaciones* (2da edición)
- [7] Hamer Davis, George Troxell, Clement Wiskocil, Ensayo e inspección de los materiales en ingeniería, Editorial Continental, México 1964.
- [8] American Conference of Gevermental Industrial Hygienists, Threshold Limit Values for Chemical Substances and Phphysical Agents. 1992-1993, Ohio, U.S.A.
- [9] Metals Abstracts, *Precipitation of Mg<sub>2</sub>Si in Al-Mg-Si Alloys during cooling from homogenization temperature*, volumen 31, numero 4, (1988).
- [10] [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lim/villela\\_e\\_ij/Capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/villela_e_ij/Capitulo5.pdf)
- [11] <http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>



- 
- [12] <http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/catedras/materiales/fatiga.pdf>
- [13] <http://www.alu-stock.es/tecnica/composicion.html>
- [14] <http://www.tpi.cl/>
- [15] [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec\\_7.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_7.html)
- [16] <http://www.tpi.cl/pdf/biblioteca/industrial/corros2.pdf>
- [17] <http://www.elsevier.com/locate/simpat>
- [18] Ing. Iván Uzcategui, Corrosión, Universidad de Carabobo, Enero de 1973.
- [19] Ing. Ricardo Echevarria, Fractura de materiales, Universidad Nacional del Comahue, 2003.
- [20] Sáenz, Laura. (1996). Fundamentos y aplicaciones en ingeniería de fluencia lenta fatiga. Trabajo de ascenso, Universidad de Carabobo, Valencia.
- [21] Dr. Luis A. Godoy (2006). Mecánica Avanzada de Materiales, Universidad de Puerto Rico.
- [22] Jones, D.A., Principales and prevention of corrosión, second editon, Prentice hall, New jersey, 1996.
- [23] Fontana, M.G., Corrosion Engineering, Mc Graw Hill, third edition, New york, 1986.



---

ANEXO # 1: Certificado de compra del aluminio 6063.



ALUMINIO DE VENEZUELA C.A.

DIRECCION FISCAL: AV. VENEZUELA, TORRE CLEMENT, PISO 4, EL ROSAL,  
TELF.S.: (0212) 951.15.22 - 951.65.33 - FAX: 951.62.90 - 951.17.23  
APARTADO 60384. CARACAS 1060-A, VENEZUELA

PLANTA: AV. RICAUARTE, URB. INDUSTRIAL SOCO, LA VICTORIA, EDO. ARAGUA  
TELF.S.: (58244) 322.22.11 - (0416) 544.07.02 al 04 - FAX: (58244) 322.19.84

SUCURSAL VALENCIA:  
ZONA INDUSTRIAL NORTE, AV. PROLONGACION MICHELENA, C.C. UNICENTRO  
GALPON N° 9, VALENCIA - EDO. CARABOBO  
TELEFONO: (0416) 841.72.85 / TEL/FAX: (58241) 834.34.12  
E-mail: sucval@cantv.net

Factura Nro.: 53681  
Vendido a: MARQUEZ

Dirección: VALENCIA, VALENCIA, Edo. CARABOBO  
Telefono: 0241

R.I.F.: V14871405 N.I.T.:0

FACTURA

SERIE D / CONTROL N° 49411

R.I.F.: J-00000891-4 - N.I.T.: 0005243289

Valencia 03/12/07

Sucursal Valencia

PEDIDO		GUIA DE DESPACHO	TRANSPORTE	CONDICIONES DE PAGO
FECHA	N°			
		DEL / /		Contado

CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	TIPO	PRECIO UNITARIO	TOTAL
E6063T5A1104610	BARRA REDONDA 1/2" = 12,7MM	1		27.025,91	27.025,91

Se Cobrara Bs 25,000.00 de Comisión por Cada Cheque Devuelto.

Forma de Pago:

Efectivo: 29.458,24

Cheque: 0,00

Nro. Cheque:

Entidad Bancaria:

PAGADO

ENTREGADO

I.V.A.(%): 9,00 Sobre el SubTotal: 27.025,91

SubTotal: 27.025,91

Total I.V.A.: 2.432,33

Total a Pagar: 29.458,24

SUC. LA VICTORIA  
Av. Ricaurte, Galpón N° 7  
Urb. Ind. Soco, La Victoria  
Telf.: (0244) 321.37.90

SUC. LOS ROSALES  
Av. El Paseo c/c Calle Branger  
Galpón N° 1, Los Rosales, Caracas  
Telf.: (0212) 633.06.34

SUC. BARCELONA  
Av. Guzmán Lander, Colinas del Neverí  
Barcelona, Edo. Anzoátegui  
Telf.: (0281) 276.37.01

ORIGINAL

Impresos Flexoprint, C.A. / Avenida El Paseo, cruce con Calle Branger, Galpón N°1, Los Rosales, Caracas / Teléfonos: 633.33.07 - 633.13.98  
R.I.F.: J-04234396-9 / Resolución E-960313065 del 15-03-96 / Región Capital / N° de Control desde 49001 hasta 52000 / Fecha: 31-08-2007



---

ANEXO # 2: Certificado de calidad del aluminio 6063.



## CERTIFICADO DE CALIDAD

**FECHA:** 04 de Marzo de 2008

**CLIENTE:**

ENGELBERT MARQUEZ.

**PEDIDO:** 203740 0501

**HOJA DE RUTA:** 521065

**MATRIZ:** A - 1104

**Nº DE COLADA:** 112

**ALEACION:** 6063

**TEMPLE:** T - 5

**FACTURA Nº:** 50256

**VENTA POR:** SUC.

VALENCIA

### Composición Química.

Número	Concentración (Porcentaje en peso)								
Colada	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
112	0.44	0.15	0.020	0.000	0.57	0.000	0.008	0.040	0.018

### PROPIEDADES MECANICAS:

**DUREZA:** (WEBSTER)

VALOR ESPECIFICADO: 8 - 12 WB

VALOR CHEQUEADO: 11 WBCARACTERÍSTICAS

**DIMENSIONALES:** SEGÚN ESTÁNDARES DE LA "ALUMINIUM ASSOCIATION"

**MEDIDAS IMPORTANTES:** (mm)

**NOMINAL CHEQUEADO**

**TOLERANCIA**

12.70

12.75

± 0.30

CONTROL DE CALIDAD

**MIGUEL MORILLO**



---

ANEXO # 3: Reporte de ALUCASA sobre la composición química del aluminio 6063.



Superintendencia de Laboratorio

### Reporte de Composición Química

Analista/Ficha: <u>Julio Rodriguez 18461</u>	Fecha: <u>04-11-08</u>	Turno: <u>2</u>
Recibido/Ficha: <u>Nb</u>	Equipo: <u>ND</u>	Aleación: <u>6063</u>
	Nº rollo: <u>Nb</u>	HF <input checked="" type="checkbox"/> HR <input checked="" type="checkbox"/>

Programa: AL-10

04/11/2008 02:25:29 p.m.

Comentario: Programa Aluminio Resultado en %  
Media (n=2)

Elementos: Concentración

Operador: Jrodriguez

Aleación:

Comentarios:

Muestra Id: Aleacion 6063

Horno:

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
-	%	%	%	%	%	%	%	%	%
x	0.481	0.182	0.017	0.0028	0.5126	0.0149	0.004	0.0016	0.001
	Sn	Ti	B	Bi	Ca	Cd	Ga	Sr	Li
-	%	%	%	%	%	%	%	%	%
x	0.003	0.018	0.0005	0.000	0.00028	<0.00010	0.010	<0.000	<0.00010
	V	As	Al						
-	%	%	%						
x	0.008	<0.000	98.74						



---

ANEXO 4: Composición química de las aleaciones de aluminio según la ALUMINUM ASOCIATION.



COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO SEGÚN LA ALUMINUM ASSOCIATION (AA)

Normas ENAW	Denominaciones ALU-STOCK	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ti	% Pb	% Cr	%	% Otros	% Al
1050 A	Puraltok 99,50	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05				0,03	99,50
1060	Puraltok 99,60	0,25	0,35	0,05	0,03	0,03	0,05	0,03				0,03	99,60
1080	Puraltok 99,80	0,15	0,15	0,03	0,02	0,02	0,06	0,03		Ga 0,03	V 0,05	0,02	99,80
1100	Puraltok 99,10	0,95 Si+Fe		0,05-0,20	0,05		0,10					0,05	99,00
1200	Puraltok 99,00	1,0 Si+Fe		0,05	0,05		0,10	0,05				0,15	99,00
1350	Elect-pural 99,5	0,10	0,40	0,05	0,01		0,05				0,05 B, 0,02 V+Ti	0,03	99,50
2007	Cobrealtok 07	0,80	0,80	3,30-4,60	0,50-1,00	0,40-1,80	0,80	0,20	0,80-1,50		Bi 0,20	0,30	Resto
2011	Cobrealtok 11	0,40	0,70	5,00-6,00			0,30		0,20-0,60	0,01	Bi 0,20-0,60	0,15	*
2014	Cobrealtok 14	0,50-1,20	0,70	3,90-5,00	0,40-1,20	0,20-0,80	0,25	0,15		0,10		0,15	*
2018	Cobrealtok 19	0,50-0,90	0,50	3,90-5,00	0,40-1,20	0,40-0,80	0,25	0,15		Bi 0,2-0,6	0,20 Zr + Ti	0,15	*
2017 A	Cobrealtok 17	0,20-0,80	0,70	3,50-4,50	0,40-1,00	0,40-1,00	0,25	0,15		0,10	0,25 Zr + Ti	0,15	*
2024	Cobrealtok 24	0,50	0,50	3,80-4,90	0,30-0,90	1,20-1,80	0,25	0,15		0,10	0,25 Zr + Ti	0,15	*
2618 A	Cobrealtok 18	0,15-0,25	0,90-1,40	1,80-2,70	0,25	0,40-0,80	0,15	0,20	Ni (0,8-1,4)	0,10	0,25 Zr + Ti	0,15	*
2030	Cobrealtok 30	0,80	0,70	3,30-4,50	0,20-1,00	0,50-1,30	0,50	0,20	0,80-1,50	0,10	Bi 0,20	0,15	*
3003	Almantok 3003	0,60	0,70	0,05-0,20	1,00-1,50		0,10	+Zr 0,20		0,10		0,15	*
3004	Almantok 3004	0,30	0,70	0,25	1,00-1,50	0,80-1,30	0,25					0,15	*
3104	Almantok 3104	0,60	0,80	0,05-0,25	0,8-1,4	0,80-1,30	0,25	0,10			0,05	0,15	*
3005	Almantok 3005	0,60	0,70	0,30	1,0-1,5	0,2-0,6	0,25	0,10		0,10	0,05 V	0,15	*
3105	Almantok 3105	0,60	0,70	0,30	0,30-0,80	0,20-0,80	0,40	0,10		0,20		0,15	*
5005	Magnealtok 10	0,30	0,45	0,05	0,15	0,70-1,10	0,20			0,10		0,15	*
5050	Magnealtok 15	0,40	0,70	0,20	0,10	1,10-1,80	0,25	0,15		0,10		0,15	*
5052	Magnealtok 25	0,25	0,40	0,10	0,10	2,20-2,80	0,10	0,20		0,15-0,35		0,15	*
5056	Magnealtok 50	0,30	0,40	0,10	0,05-0,20	4,50-5,60	0,20			0,05-0,20		0,15	*
5083	Magnealtok 45	0,40	0,40	0,10	0,40-1,00	4,00-4,90	0,25	+Zr 0,20		0,05-0,25		0,15	*
5086	Magnealtok 40	0,40	0,50	0,10	0,20-0,70	3,50-4,50	0,25	+Zr 0,20		0,05-0,25		0,15	*
5154 A	Magnealtok 35	0,50	0,50	0,10	0,50	3,10-3,90	0,20	+Zr 0,20		0,15-0,35		0,15	*
5251	Magnealtok 20	0,40	0,50	0,15	0,10-0,50	1,70-2,40	0,15	0,15		0,15		0,15	*
5454	Magnealtok 31	0,25	0,40	0,10	0,50-1,00	2,40-3,60	0,25	0,20		0,05-0,20		0,15	*
5754	Magnealtok 30	0,40	0,40	0,10	0,50	2,60-3,60	0,15	0,15		0,30	0,1-0,6Mn+Cr	0,15	*
6005 A	Simagaltok 05	0,50-0,90	0,35	0,10	0,30	0,40-0,70	0,20	0,10		0,30	0,12-0,5 Mn+Cr	0,15	Resto
6012	Simagaltok 12	0,60-1,40	0,50	0,10	0,40-1,00	0,60-1,20	0,30	0,30	0,40-2,0	0,30	Bi 0,7	0,15	*
6060	Simagaltok 60	0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,60	0,15	0,10		0,05		0,15	*
6061	Simagaltok 61	0,40-0,80	0,70	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,25	0,15		0,04-0,35		0,15	*
6063	Simagaltok 63	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10		0,10		0,15	*
6082	Simagaltok 82	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-1,00	0,60-1,20	0,20	0,10		0,25		0,10	*
6101	Simagaltok 01	0,30-0,70	0,50	0,10	0,03	0,35-0,80	0,10	-				0,15	*
6106	Simagaltok 06	0,30-0,60	0,35	0,25	0,05-0,20	0,40-0,8	0,20	0,10		0,20		0,15	*
6181	Simagaltok 81	0,80-1,20	0,45	0,10	0,15	0,60-1,00	0,20			0,10		0,15	*
6262	Simagaltok 62	0,40-0,80	0,70	0,15-0,40	0,15	0,80-1,20	0,25		0,40-0,70	0,04-0,14	Bi 0,4-0,7	0,15	*
6351	Simagaltok 51	0,70-1,30	0,50	0,10	0,40-0,80	0,40-0,80	0,20	0,20				0,15	*
7003	Alzintok 03	0,30	0,35	0,20	0,30	0,50-1,00	5,00-6,50	+Zr 0,20		0,10-0,35		0,15	*
7020	Alzintok 20	0,35	0,40	0,20	0,05-0,50	1,00-1,40	4,00-5,00	-Zr 0,09-0,25		0,10-0,30	Ga 0,08-0,2	0,15	*
7022	Alzintok 22	0,50	0,50	0,50-1,00	0,10-0,40	2,60-3,70	4,30-5,20	+Zr 0,20				0,15	*
7049 A	Alzintok 49	0,40	0,50	1,20-1,90	0,50	2,10-3,10	7,20-8,40	+Zr 0,25		0,05-0,25		0,15	*
7050	Alzintok 50	0,12	0,15	1,90-2,50	0,10	2,00-2,70	5,90-6,90	0,06		0,04		0,15	*
7075	Alzintok 75	0,40	0,50	1,20-2,00	0,30	2,10-2,90	5,10-6,10	+Zr 0,20				0,15	*
7175	Alzintok 175	0,15	0,20	1,20-2,00	0,10	2,10-2,90	5,1-6,1	+Zr 0,20		0,18-0,28		0,15	*
-	Moldeal-tok	0,12	0,15	1,50-2,60	0,10	1,80-2,60	5,70-6,70	0,06		0,05	Zr 0,08-0,15	0,15	*



---

**ANEXO # 5: Propiedades mecánicas del aluminio según la  
ALUMINUM ASOCIATION.**



## PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO SEGÚN LA ALUMINUM ASOCIATION (AA).

Para comparar el esfuerzo de fluencia obtenido mediante el procedimiento descrito anteriormente, con el esfuerzo correspondiente a la aleación AA-6063 sometida a tratamiento térmico de envejecimiento (T5), se utilizó la siguiente tabla obtenida de la Aluminum Association:

Aleación Normas A.A.	Aleación Normas ALU-STOCK	ESTADO	Carga de rotura Rm N / mm <sup>2</sup>	Limite elástico Rp 0,2 N / mm <sup>2</sup>	Alargamiento A 5,65%	Limite de fatiga N / mm <sup>2</sup>	Dureza Brinell HB
Serie 6000							
6005 A	Simagaltok 05	T1	200	100	25	-	-
6005 A	Simagaltok 05	T4	210	110	16	-	-
6005 A	Simagaltok 05	T5	270	240	13	-	-
6005 A	Simagaltok 05	T6	285	260	12	190	90
6060	Simagaltok 60	0	100	50	27	110	25
6060	Simagaltok 60	T1	150	90	25	-	45
6060	Simagaltok 60	T4	160	90	20	-	50
6060	Simagaltok 60	T5	220	185	13	160	75
6060	Simagaltok 60	T6	245	215	13	160	85
6061	Simagaltok 61	0	125	55	27	120	30
6061	Simagaltok 61	T4	235	140	21	180	65
6061	Simagaltok 61	T6 / T651	310	270	14	190	95
6063	Simagaltok 63	0	100	50	27	110	25
6063	Simagaltok 63	T1	150	90	26	150	45
6063	Simagaltok 63	T4	160	90	21	150	50
6063	Simagaltok 63	T5	215	175	14	150	60
6063	Simagaltok 63	T6	245	210	14	150	75
6063	Simagaltok 63	T8	260	240	-	-	80
6082	Simagaltok 82	0	130	60	27	120	35
6082	Simagaltok 82	T1	260	170	24	200	70
6082	Simagaltok 82	T4	260	170	19	200	70
6082	Simagaltok 82	T5	325	275	11	210	90
6082	Simagaltok 82	T6 / T651	340	310	11	210	95
Serie 7000							
7020	Alzintok 20	0	180	80	24	-	55
7020	Alzintok 20	T5	375	315	14	250	110
7020	Alzintok 20	T6 / T651	380	335	13	270	120
7049 A	Alzintok 49	T6	590	500	7	-	-
7075	Alzintok 75	0	225	105	-	230	60
7075	Alzintok 75	T6 / T651	570	505	10	300	150
7075	Alzintok 75	T7351	505	435	13	300	140



---

## ANEXO # 6: Ensayos de tracción.



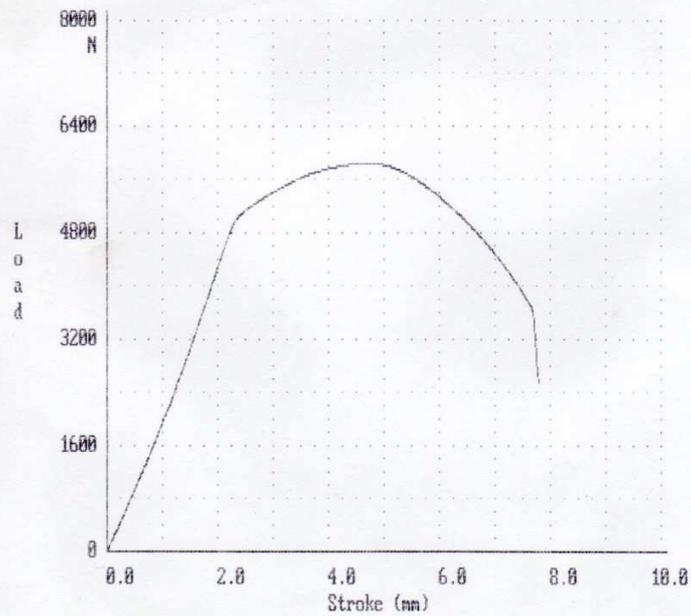
CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing  
CTM 20 GALDABINI

Ens de Tracc  
Codigo muestra : AA/6063

Muestra 1  
Velocidad 2mm/min

Maximum load : 5834.00 N



Fecha : 21-01-2008

Hora : 21:17:46

Operador : Yosmari P..



CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing

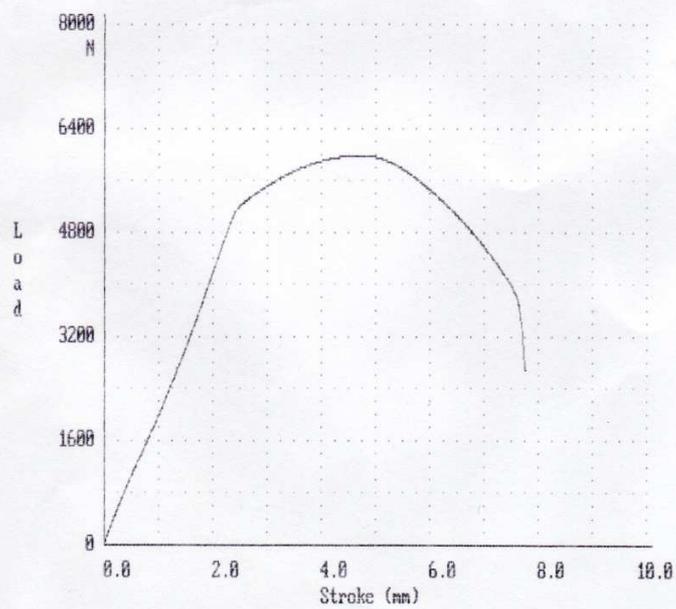
CTM 20 GALDABINT

Ens de Trace

Codigo muestra : AA/6063

Muestra 2  
Velocidad 2mm/min

Maximum load : 5983.00 N



Fecha : 21-01-2008

Hora : 21:22:23

Operador : Vosmari P...



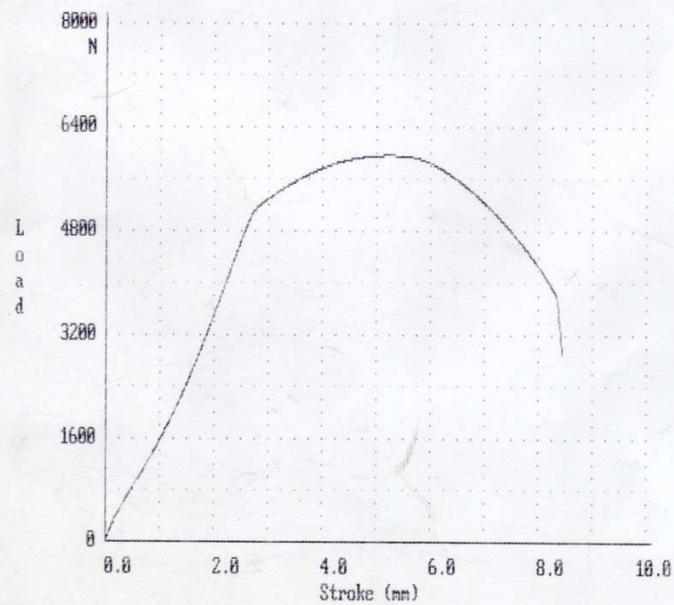
CENTRO DE INVESTIGACION DE MATERIALES  
UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Manual processing  
CTM 20 GALDABINI

Ens de Tracc  
Codigo muestra : AA/6063

Muestra 3  
Velocidad 2mm/min

Maximum load : 5983.00 N



Fecha : 21-01-2008 Hora : 21:25:59

Operador : Yosmari P..

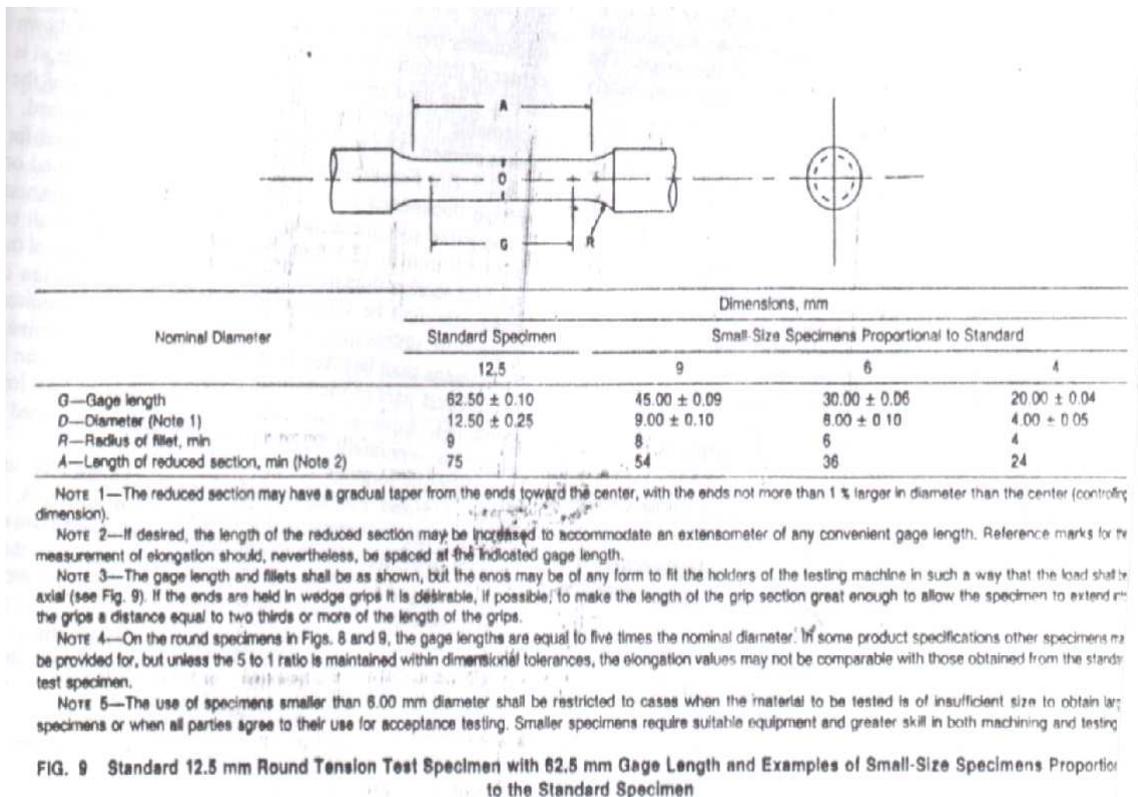


---

ANEXO # 7: Normas ASTM-B-557M para ensayos de tracción.



## NORMAS ASTM B-557M PARA ENSAYOS DE TRACCIÓN EN ALUMINIO





---

ANEXO # 8: Normas ASTM E-606 para ensayos de fatiga.



## NORMAS ASTM E-606 PARA ENSAYOS DE FATIGA EN ALUMINIO

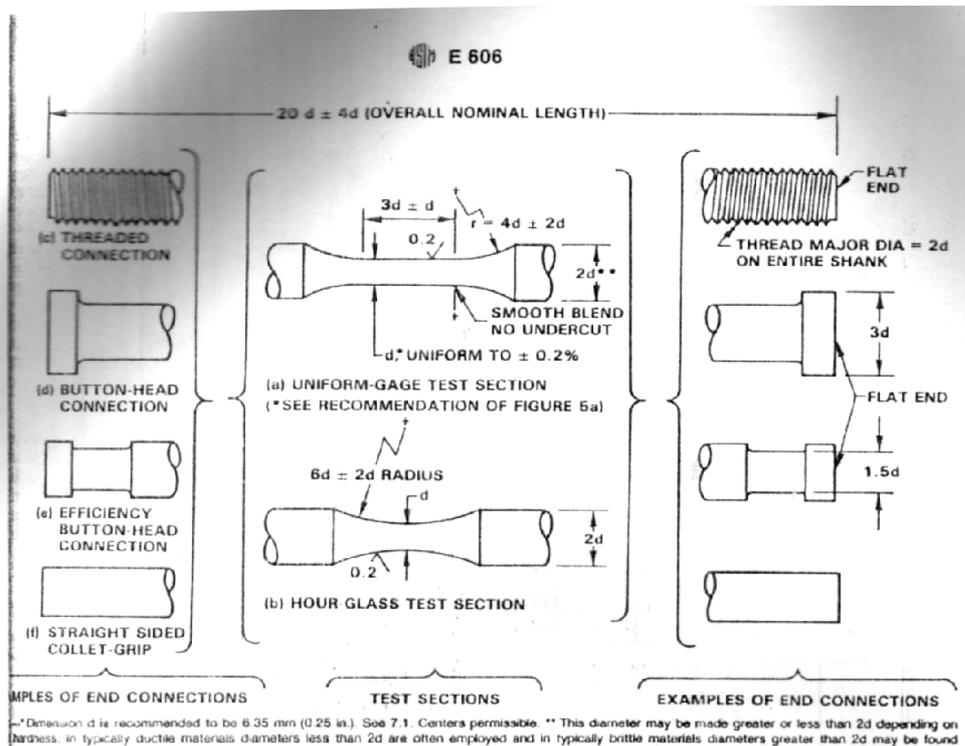


FIG. 1 Recommended Low-Cycle Fatigue Specimens

Additional definitions associated with time-dependent behavior observed in tests at elevated homologous temperatures are as follows:

1 *hold period*,  $\tau_h$ —the time interval within a cycle which the stress or strain is held constant.

2 *inelastic strain*,  $\epsilon_{in}$ —the strain that is not elastic. For small conditions,  $\epsilon_{in}$  is calculated by subtracting the elastic strain from the total strain.

3 *total cycle period*,  $\tau_c$ —the time for the completion of one cycle. The parameter  $\tau_c$  can be separated into hold and nonhold components:

$$\tau_c = \sum \tau_h + \sum \tau_{nh} \quad (1)$$

4  $\tau_h$ —sum of all the hold portions of the cycle and

5  $\tau_{nh}$ —sum of all the nonhold portions of the cycle.

6  $f$ —is equal to the reciprocal of the overall frequency if the frequency is held constant.

7 The following equations are often used to define the instantaneous stress and strain relationships for many metals by:

$$\epsilon = \epsilon_m + \epsilon_p \quad (2)$$

$$\epsilon_p = \frac{\sigma}{E^*} \quad (\text{see Note 2})$$

and the change in strain from any point (1) to any other point (3), as illustrated in Fig. 2, can be calculated as follows:

$$\epsilon_3 - \epsilon_1 = \left( \epsilon_{3m} + \frac{\sigma_3}{E^*} \right) - \left( \epsilon_{1m} + \frac{\sigma_1}{E^*} \right) \quad (3)$$

All strain points to the right of and all stress points above the origin are positive. The equation would then show an increase in inelastic strain from 1 to 3 or:

$$\epsilon_{3in} - \epsilon_{1in} = \epsilon_3 - \epsilon_1 + \frac{\sigma_1}{E^*} - \frac{\sigma_3}{E^*} \quad (4)$$

Similarly, during the strain hold period, the change in the inelastic strain will be equal to the change in the stress divided by  $E^*$ , or:

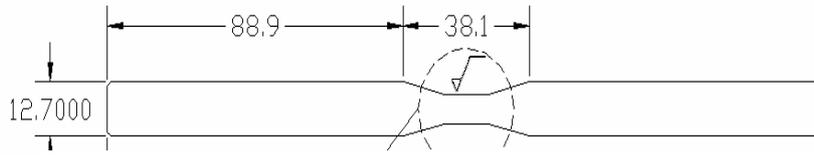
$$\epsilon_{3in} - \epsilon_{2in} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{E^*} \quad (5)$$

NOTE 2— $E^*$  represents a material parameter that may be a function of environment and test conditions. It also may vary during a test as a result of metallurgical or physical changes in the specimen. In many instances, however,  $E^*$  is practically a constant quantity and is used



---

ANEXO # 9: Plano de fabricación para las probetas del ensayo  
de fatiga.

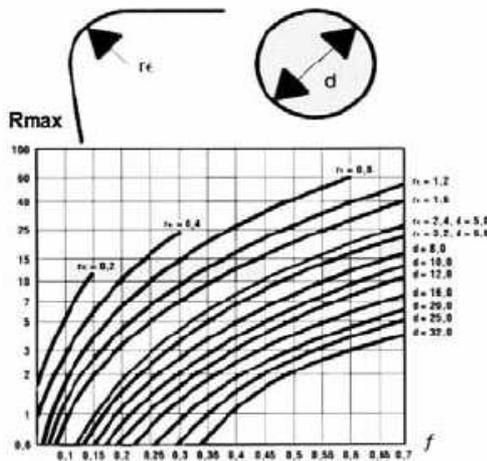


DETALLE "X"

ESCALA 2:1

### 4.2. Guía de aplicaciones y obtención de distintas calidades superficiales

RUGOSIDAD	APLICACIÓN
N1	Espejos. Bloques patrón
N2	Planos de apoyo de relojes comparadores
N3	Herramientas de precisión. Cojinetes superacabados. Acoplamiento estancos de alta presión en movimiento alternativo. Superficies bruñidas de retención sin retén.
N4	Soportes de cigüeñales y árboles de levas. Pies de válvulas. Superficies de cilindros de bombas hidráulicas. Cojinetes lapeados. Pernos de árboles para rotores de turbinas, reductores...
N5	Árboles acanalados. Superficie exterior de pistones. Acoplamiento efectuados a presión. Asientos de válvulas..
N6	Tambores de freno. Agujeros brochados. Cojinetes de bronce. Dientes de engranaje. Superficies de piezas deslizantes, como patines y sus guías.
N7	Caras de engranajes. Árboles y orificios de engranajes. Cara de émbolo.
N8	Pernos y cojinetes para transmisión (montaje a mano). Superficies de acoplamiento de partes fijas desmontables.
N9	Superficies laterales de retención con retenes normales.



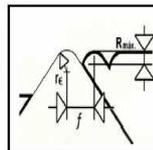
R <sub>max</sub> μm	R <sub>a</sub> = CLA = AA μm	μinch	Grado de rugosidad	Símbolo triangular
1.6	0.30	11.8		
1.8	0.35	13.8		
2.0	0.40	15.7	N5	
2.2	0.44	17.5		
2.4	0.49	19.2		
2.6	0.53	20.8		
2.8	0.58	22.7		
3.0	0.63	24.6		
3.5	0.71	27.8		
4.0	0.80	31.4	N6	
4.5	0.90	35.2		
5.0	0.99	38.8		
6.0	1.2	47.2		
7.0	1.4	55.1		
8.0	1.6	63.0	N7	
9.0	1.8	71		
10.0	2.0	79		
15.0	3.2	126	N8	
20.0	4.4	173		
25.0	5.8	238		
27.0	6.3	247	N9	
30.0	7.4	292		
35.0	8.8	348		
40.0	10.7	422		
45.0	12.5	485	N10	
50.0	14.0	562		

Torneado en acabado → Rugosidad

→ Depende de:

- ✓ Avance.
- ✓ Radio de punta de la plaquita.
- ✓ Condiciones generales de la máquina.

$$R_{max} = \frac{f^2 \cdot 1000}{8 \cdot r_c}$$





---

ANEXO # 10: Gráfica comparativa sobre los niveles de corrosión en las probetas de AA-6063.

