

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE LA FATIGA AL AIRE DE UNA
ALEACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MUESTRAS CON DEFECTOS
DE COLADA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres
Hung C. Miguel J.
Plaz D. Domingo A.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE LA FATIGA AL AIRE DE UNA
ALEACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MUESTRAS CON DEFECTOS
DE COLADA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alberto D. Pertuz C.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los bachilleres
Hung C. Miguel J.
Plaz D. Domingo A.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



ACTA

Caracas, 20 de abril de 2.010

Prof. GERARDO GONZÁLEZ

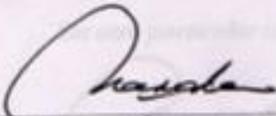
Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los bachilleres:

DOMINGO PLAZ y MIGUEL HUNG

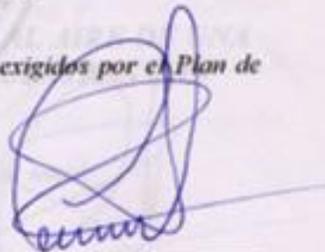
Titulado:

“ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE LA FATIGA AL AIRE DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MUESTRAS CON DEFECTOS DE COLADA”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniería Mecánica.


Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado




Prof. Crisanto Villalobos
Jurado


Prof. Alberto Pertuz
Tutor



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE PRODUCCION

Caracas, 20 de abril de 2010

Prof. GERARDO RAMÍREZ
Jefe de la División de Control de Estudios
Facultad de Ingeniería

Presente.-

Quienes suscriben, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, nos dirigimos a usted con la finalidad de informarle que hemos decidido otorgarle a los Bachilleres:

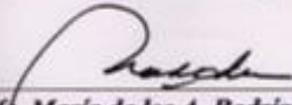
DOMINGO PLAZ (C.I.V.- 17.926.769) y
MIGUEL HUNG (C.I.V.- 15.367.084)

“MENCIÓN HONORÍFICA”

Por la excelencia demostrada en la realización del Trabajo Especial de Grado titulado:

“ESTUDIO PROBABILISTICO DE LA FATIGA AL AIRE DE UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MUESTRAS CON DEFECTOS DE COLADA”

Sin otro particular a que hacer referencia quedamos de usted.


Prof. María de los A. Rodríguez
Jurado




Prof. Crisanto Villalobos
Jurado


Prof. Alberto Pertuz
Tutor

DEDICATORIA

A Dios ante todas las cosas
por brindarnos la oportunidad
de estar aquí.

A nuestra familia
por el apoyo incondicional
brindado en todo momento.

A la escuela de Ingeniería Mecánica
y todos aquellos que de alguna manera u
otra ayudaron a la realización de este
trabajo de investigación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios ante todas las cosas

A la Universidad Central de Venezuela, por habernos proporcionado las herramientas para nuestra formación como personas y como ingenieros.

A nuestro profesor y tutor, Alberto Pertuz, por habernos ayudado en la realización de este trabajo de investigación.

A nuestro compañero, amigo y profesor guía, Pedro Álvarez, por brindarnos su apoyo incondicional.

A nuestro profesor, compañero y amigo, Crisanto Villalobos, pieza fundamental en este trabajo de investigación.

A nuestros familiares, ya que sin ellos no hubiésemos podido lograr ésta y muchas de las metas a lo largo de nuestras vidas.

A nuestros compañeros de estudio y excelentes profesores por incentivarnos a seguir luchando por alcanzar nuestros objetivos y ayudarnos a adquirir nuestros conocimientos en la carrera.

A los que están y los que no pueden estar acompañándonos, Gracias por todo.

**Hung C. Miguel J.
Domingo A. Plaz D.**

**ESTUDIO PROBABILÍSTICO DE LA FATIGA AL AIRE DE UNA
ALEACIÓN DE ALUMINIO A PARTIR DE MUESTRAS CON DEFECTOS
DE COLADA**

**Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz. Tesis
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2010, 101 pp.**

Palabras Claves: Aluminio-Silicio, Fatiga, Defectos, Análisis Probabilístico.

Resumen. Las porosidades son bien conocidas como potentes concentradoras de esfuerzos las que actúan como iniciadoras de grietas de fatiga en aleaciones de Aluminio. En el presente trabajo de investigación se estudió el comportamiento de la fatiga al aire de alto ciclaje de una aleación de Aluminio-10%Silicio partiendo de muestras con defectos de colada. Estas muestras fueron ensayadas haciendo uso de dos geometrías diferentes en condiciones de flexión rotativa, dando a conocer que la dispersión en las muestras de geometría de sección transversal constante es mayor que las de geometría de radio continuo, ya que la probabilidad de existencia de defectos aumenta. Posterior a estos ensayos, se procedió a analizar las superficies de fractura de muestras de cada geometría, tomadas al azar para realizar el estudio probabilístico en el cual se estudiaron los tamaños de los defectos que fueron posibles responsables de la nucleación de la grieta, clasificándolos en tres grupos según su magnitud, en un rango que abarca desde la ausencia de defectos, hasta las porosidades de mayor tamaño.

Luego de haber sido clasificados los especímenes, fueron realizadas las curvas $S-N$ doble logarítmica para cada grupo. Una vez obtenidas las regresiones lineales para cada clasificación, se relacionaron las pendientes y los puntos de corte con el eje de la variable S con respecto al área, en mm^2 , de la porosidad. Partiendo de estas variables, se propuso un modelo que describe el comportamiento a la fatiga al aire del material según la magnitud del defecto posible causante de la nucleación de la grieta.

El modelo fue validado con diversas curvas $S-N$ de fatiga al aire suministradas en estudios anteriores, partiendo de muestras de aleaciones similares. El comportamiento de estas, fueron muy similares al comportamiento de la curva $S-N$ de la clasificación de menor rango de defectos estudiada en este trabajo.

INDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1.- MARCO TEÓRICO	3
1.1- EL ALUMINIO	3
1.1.1.- Propiedades.....	4
1.1.2.- Aplicaciones	5
1.1.3.- Aleación.....	6
1.1.4.- Aleación AlSi10	8
1.2.- FUNDICIÓN	10
1.2.1 Fundición por gravedad en molde metálico.....	12
1.3.- FRACTURA DE LOS MATERIALES	13
1.3.1.-Tipos de fractura.....	14
1.3.2.- Efecto de las imperfecciones en la fractura	15
1.3.3.- Fatiga	18
1.3.4.-Etapas de la fatiga.....	21
1.3.5.- Velocidad de propagación de la grieta	22
1.3.6.- Curva <i>S-N</i>	24
1.3.7.- Modelos estadísticos utilizados en ensayos de fatiga.....	27
1.3.7.1.- Características de la Distribución de Weibull	28
1.3.7.2.- Análisis de Weibull	31
1.3.7.3.- Coeficiente de Correlación de Pearson ^[11]	33
CAPÍTULO II	
2.- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	35
2.1.- DIAGRAMA EXPERIMENTAL	35

2.2.- MATERIAL RECIBIDO	36
2.3.- MAQUINADO Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS	37
2.3.1.- Dimensionamiento de las probetas de fatiga de radio continuo	37
2.3.2.- Dimensionamiento de las probetas de fatiga de sección transversal constante	38
2.3.3.- Dimensionamiento de las probetas de tracción	39
2.3.4.- Número mínimo de probetas	40
2.4.- ENSAYOS MECÁNICOS	40
2.4.1.- Ensayos de tracción	40
2.4.2.- Ensayos de fatiga al aire	42
2.5.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO	49
2.5.1.- Estudio fractográfico: Microscopía Electrónica de Barrido	49
2.5.2.- Estudio fractográfico: Macrografía a través Imágenes Estereográficas ...	50
2.5.3.- Microestructura de la aleación.....	50
2.6.- ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	51
2.6.1.- Coeficiente de Correlación de Pearson.....	53
CAPÍTULO III	
3.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
3.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA	55
3.2.- ENSAYOS DE TRACCIÓN.....	56
3.3.- OBTENCIÓN DE LAS CURVAS S-N DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 10% SILICIO	58
3.3.1.- Curva S-N generada a partir de probetas de radio continuo	58
3.3.2.- Curva S-N generada a partir de probetas de sección transversal constante	62
3.4.- ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LOS ESPECÍMENES ENSAYADOS	65
3.4.1.- Análisis fractográfico mediante Microscopía Electrónica de Barrido	65
3.4.2.- Análisis fractográfico: Macrografía a través de imágenes Estereográficas	76

3.5.- ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	81
3.5.1.- Análisis probabilístico para muestras de sección transversal constante...	81
3.5.1.- Coeficiente de Correlación de Pearson:	84
3.5.2.- Análisis probabilístico para muestras de radio continuo	86
CAPÍTULO IV	
4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
4.1.- CONCLUSIONES	96
4.2.- RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFÍA	100

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1, Diagrama de Fases de la aleación Aluminio-Silicio. 10

Figura N° 2, Molde Permanente 13

Figura N° 3, (a) Fractura muy dúctil en la cual la probeta se estiriona hasta llegar a un punto. (b) Fractura moderadamente dúctil después de cierta estircción. (c) Fractura frágil sin ninguna deformación plástica. 13

Figura N° 4, Etapas de la fractura dúctil 15

Figura N° 5, (a) Espécimen con grietas superficiales sometido a tensión. (b) Espécimen con grietas internas sometido a tensión..... 16

Figura N° 6, Espécimen que contiene una Imperfección. 17

Figura N° 7, Ciclo de tensión de inversión total..... 20

Figura N° 8, Ciclo de tensión repetitiva 21

Figura N° 9, Ciclo de tensión al azar 21

Figura N° 10, Etapas de Fractura por Fatiga. 22

Figura N° 11, Gráfico de Velocidad de crecimiento de grieta en función del intervalo defactor de intensidad de esfuerzo..... 23

Figura N° 12, Curva S – N en donde el material muestra un límite a la fatiga..... 26

Figura N° 13, Curva S-N Donde el material no muestra límite de fatiga 26

Figura N° 14, Variación de la densidad de probabilidad $f(t)$, tasa de fallas $l(t)$ y la función acumulativa de fallas $F(t)$ en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma β 30

Figura N° 15, Material entregado36

Figura N° 16, Esquema de las probetas de radio continuo para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 60638

Figura N° 17, Esquema de las probetas de sección transversal constante para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 60639

Figura N° 18, Esquema del dimensionamiento de las probetas de Tracción según la norma A 370.....40

Figura N° 19, Curva de tracción típica de un metal que muestra una transición elástico-plástica de forma gradual.....42

Figura N° 20, Maquina de fatiga; Fatigue Dynamics RBF-200.....42

Figura N° 21, Representación Gráfica del Momento Flector ejercido en una Probeta de radio continuo43

Figura N° 22, Representación Gráfica del Momento Flector ejercido en una Probeta de sección transversal constante43

Figura N° 23, Representación Gráfica de la distribución de esfuerzo ejercida en una Probeta de radio continuo44

Figura N° 24, Representación Gráfica de la distribución de esfuerzo ejercida en una Probeta de sección transversal constante.44

*Figura N° 25, Representación gráfica del esfuerzo nominal de la probeta
sección transversal constante46*

*Figura N° 26, Representación grafica del Esfuerzo Real y el Esfuerzo Nominal,
en la probeta de sección transversal constante.....46*

Figura N° 27, Representación gráfica de la relación de triángulos.....47

Figura N° 28, Microscopio Electrónico de Barrido49

*Figura N° 29, a) Del lado izquierdo se observa la microestructura de la
aleación AlSi10 sin modificación, b) Del lado derecho se
observa la microestructura de la aleación AlSi10 modificado51*

Figura N° 30, Esfuerzo efectivo, según el área de la probeta ^[21]53

Figura N° 31, Ensayos de Tracción56

Figura N° 32, Gráfico de la Función de Densidad de Probabilidad.....60

Figura N° 33, Curva S-N de radio continuo no discretizada.....61

*Figura N° 34, curva S-N a partir de probetas de geometría de la zona
calibrada de sección transversal constante.64*

*Figura N° 35, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de
Aluminio 10% Silicio, sometida a un esfuerzo alternante de 92
MPa la cual falló a 256.000 ciclos.....66*

*Figura N° 36, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de
Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 92*

MPa, la cual falló a 256.000 ciclos donde se puede observar una estructura segregada o de tipo dendrítica.....67

Figura N° 37, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 92 MPa, la cual falló a 1.432.900 ciclos.....68*

Figura N° 38, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 92 MPa, la cual falló a 1.432.900 ciclos.....69*

Figura N° 39, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 719.000 ciclos.....70*

Figura N° 40, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 719.000 ciclos, donde se observan burbujas.....71*

Figura N° 41, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 719.000 ciclos, donde se observan burbujas.....72*

Figura N° 42, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 383.000 ciclos.....73*

Figura N° 43, *Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 383.000 ciclos.....74*

Figura N° 44, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 90 MPa, la cual falló a 328.900 ciclos.....75

Figura N° 45, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 90 MPa, la cual falló a 328.900 ciclos.....76

Figura N° 46, Probeta de radio continuo clasificada como Tipo A. Arriba Imagen estereográfica, abajo MEB.....77

Figura N° 47, Acercamiento con el MEB, que muestra un defecto, donde se nucleó la grieta.....78

Figura N° 48, Probeta de radio continuo clasificada como Tipo B. Arriba imagen estereográfica, abajo MEB.....79

Figura N° 49, Probeta de radio continuo clasificada como Tipo C. Arriba imagen estereográfica, abajo MEB.....80

Figura N° 50, Gráfico de sección transversal constante, según la calificación “A”, “B” y “C”83

Figura N° 51, Gráfico S-N de sección transversal constante, según la calificación A, B y C.....88

Figura N° 52, Regresión lineal de la curva área vs pendiente90

Figura N° 53, Curva de Relación Área – Término Independiente.....91

Figura N° 54, Curvas S-N de predicción según el área del poro93

*Figura N° 55, Comparación de la Curva S-N de clasificación “A” con
respecto a la bibliografía y otras investigaciones.....95*

INDICE DE TABLAS

Tabla I.1: *Clasificación del Aluminio y sus principales Aleaciones en Fundición* 7

Tabla I.2: *Clasificación de la Aleación Aluminio-Silicio según el porcentaje del elemento aleante*..... 8

Tabla I.3: *Clasificación de Pearson según su magnitud*..... 34

Tabla II.1: *Tabla de Composición Química suministrada por la empresa*..... 36

Tabla II. 2: *Rango de variación de porcentaje de esfuerzo* 48

Tabla II. 3: *Tabla comparativa de Clasificación mediante imágenes estereográficas* 52

Tabla III. 1: *Análisis Químico de la Aleación AlSi10*..... 55

Tabla III. 2: *Resultados de los ensayos de tracción* 57

Tabla III. 3: *Ensayos de Fatiga al Aire de la Aleación de Aluminio al 10 % de Silicio*..... 58

Tabla III. 4: *Resultados de la Distribución de Weibull para los ensayos de fatiga al aire de probetas de radio continuo de la aleación de Aluminio al 10% de Silicio*..... 60

Tabla III. 5: *Resultados de los Ensayos de Fatiga al Aire de la Aleación AlSi10 con probetas de sección transversal constante* 63

Tabla III. 6: *Clasificación de las probetas de sección transversal constante* 81

Tabla III. 7: *Resultados de Fatiga agrupados según la clasificación* 82

Tabla III. 8: *Parámetros de Basquin para probetas de sección transversal constante de clasificación B*..... 84

Tabla III. 9: *Parámetros de Basquin para probetas de sección transversal constante de clasificación C*..... 84

Tabla III. 10: *Tabla de resultados para la obtención de Correlación de Pearson* 84

Tabla III. 11: Tabla para la obtención de la Varianza en los ciclos 85

Tabla III. 12: Clasificación de las probetas de radio continuo 86

Tabla III. 13: Resultados de Fatiga agrupados según la clasificación 87

Tabla III. 14: Evaluación del modelo propuesto para ciertos valores de áreas de defectos 92

INTRODUCCIÓN

Históricamente, el desarrollo y la evolución de las sociedades ha estado vinculado a la capacidad de sus miembros para producir y conformar los materiales, a fin de satisfacer sus necesidades. Hace, relativamente, poco tiempo los científicos llegaron a comprender la relación entre los elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento adquirido los ha capacitado para variar y adaptar las características de los materiales; metales, plásticos, vidrios son ejemplos de las decenas de miles de materiales distintos que se han desarrollado para satisfacer las necesidades de nuestra moderna y compleja sociedad ^[1].

El aluminio no exento de este proceso evolutivo o de desarrollo, que se ha venido dando desde el siglo XIX, ha pasado de ser un material precioso y decorativo, hasta tener más de 300 aleaciones conocidas ^[1], debido a sus diversas aplicaciones este metal no ferroso se encuentra entre las aleaciones livianas, las cuales tienen por características su bajo peso en relación a su resistencia mecánica; por lo tanto, son muy utilizadas en la industria automotriz, aeronáutica entre otras ^[2].

Entre las aplicaciones más importantes del aluminio y sus aleaciones se encuentran intercambiadores de calor, ya que posee una buena conductividad térmica en relación a su peso, por ello es ventajoso también en evaporadores, aplicaciones de calefacción eléctrica, radiadores, además de poseer una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes como la atmósfera, agua, agentes petroquímicos y químicos. En la industria automotriz se encuentran los pistones, la culata, colectores, cárter, carburadores, cajas de transmisión, válvulas de los frenos, cáliper de los frenos, las láminas de aluminio son utilizadas para la carrocería, tomas de aires, parachoques y rines los cuales presentan una tendencia a aumentar en el mercado ^[2].

“El aluminio se caracteriza por poseer una excelente relación peso-resistencia, con una densidad de $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente un tercio de la densidad del acero. Debido al rango de propiedades físicas y mecánicas que pueden ser desarrolladas desde este metal en alta pureza, hasta sus más complejas aleaciones para optimizar algunas de sus propiedades, teniendo en cuenta que otras pueden ser perjudicadas”^[2], las características de manufactura así como las necesidades del consumidor tienen como consecuencia que los fabricantes experimenten con nuevas aleaciones.

Se estima que alrededor del 90% de las fallas en las piezas metálicas que se encuentran en servicio son causadas por la existencia del fenómeno conocido como fatiga^[1], que pudiera ocurrir cuando una pieza está sometida a cargas cíclicas alternantes, ésta se divide en la nucleación de una grieta, propagación de la misma y por último la fractura por sobrecarga, que a nivel macroscópico no evidencia ninguna característica hasta que ocurre la tercera etapa de fractura, lo que hace necesario por diversas medidas el estudio en detalle de este comportamiento.

El objetivo de los ensayos de fatiga es obtener una aproximación racional de la vida de un material para luego extrapolar estas propiedades a lo que representa un elemento estructural, elementos de máquina, partes y piezas en general que están sometidas a cargas cíclicas.

El propósito fundamental que se persigue con la realización de este trabajo es estudiar el comportamiento a la fatiga al aire de una aleación de aluminio-silicio, que fueron suministradas por la empresa SERMAMET, encargada del proceso de fabricación de rines de fundición con diferentes geometrías. Una vez estimadas su composición química y propiedades estáticas se procederá a estudiar el fenómeno de fatiga utilizando dos tipos de probetas y realizando un posterior análisis mediante algún diseño probabilístico tomando en cuenta la morfología de la zona de fractura, considerando que ésta presenta defectos en la colada. Se analizarán las variables capturadas de ambas geometrías con el fin de buscar una aproximación de la curva de fatiga según sean las condiciones encontradas en las muestras.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1- EL ALUMINIO

El aluminio es el segundo elemento metálico de mayor abundancia en la tierra, y el tercer elemento más encontrado en la corteza terrestre, es un material que se ha convertido en un excelente competidor económico para la ingeniería y que además de ser de fácil mecanizado es un excelente conductor de electricidad y calor.

Para la obtención de aluminio, se extrae el mineral conocido como bauxita, luego se transforma en alúmina mediante el proceso Bayer, que es la disolución de bauxita con hidróxido sódico donde se obtiene óxido de aluminio, y luego se le aplica la electrolisis para finalmente conseguir aluminio. Una de las principales desventajas en el proceso de producción de aluminio es que se requieren grandes cantidades de energía eléctrica, pero como ventaja, se puede mencionar que su reciclaje es un proceso de bajo gasto energético aproximadamente un 5% del proceso original si se extrae del mineral.

Fue descubierto en 1807, y se encontró que era extremadamente difícil su separación de las rocas, es por esto que se consideró un metal precioso, más caro que el oro. Las primeras aplicaciones del aluminio fueron artículos que utilizaba la nobleza como marcos para cuadros, números para las casas, utensilios para cocinar y embases. El aluminio creció en diversidad de aplicaciones y se extendió en muchos artículos utilizados en la vida moderna, que es afectada directamente o indirectamente por su uso.

Luego de la invención del proceso para la obtención de alúmina, a partir de la bauxita de Charles Hall en EE.UU. y Paul Heroult en Francia en el año 1886, lo que abarató el proceso de obtención del metal, permitiendo junto con el proceso de Bayer

inventado un año después en 1887, que se expandiera su uso, para ser utilizado en nuevas aplicaciones ^[2]. Cuando se realizó el primer motor de combustión interna para vehículos, el aluminio que jugaría un papel importante en el uso de la industria automotor, incrementó su valor para la ingeniería. En la electrificación, se necesitarían inmensas cantidades del liviano y conductor material, para las líneas de transmisión de largas distancias así como también para la construcción de torres, necesarias para soportar el peso de los cables, los cuales entregan energía desde los sitios de la generación de la electricidad, para luego después de décadas convertirse en un producto confiable estructuralmente, fuerte y resistente a la fractura, con el que se construyen partes como fuselaje de avión, rines para vehículos motores, cuerpos de misiles componentes de satélites entre muchos otros.

1.1.1.- Propiedades

De todas las características del aluminio, la que se podría decir es más sobresaliente es su versatilidad, debido al rango de propiedades físicas y mecánicas que pueden ser desarrolladas desde el aluminio de alta pureza, hasta las más complejas aleaciones, más de trescientas aleaciones son comúnmente reconocidas y muchas variaciones adicionales han sido desarrolladas internacionalmente, además de las generadas en la relación proveedor-consumidor.

Las propiedades del aluminio y sus aleaciones hacen más económica y atractiva para una amplia variedad de usos, el punto de fusión en el aluminio es de 660 °C (933 K) la densidad del aluminio es de 2,7 g/cm³, aproximadamente un tercio de la densidad del acero 7,83 g/cm³, el cobre que tiene una densidad de 8,93 g/cm³ o el latón 8,53 g/cm³, puede desarrollar una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes como la atmosfera, agua (incluyendo agua salada), agentes petroquímicos y químicos, para mayor detalle de corrosión se recomienda revisar Volume 13 of ASM Handbook, 9na edición.

Normalmente el aluminio posee excelente conductividad eléctrica y térmica, pero aleaciones especiales han sido desarrolladas con alto grado de resistividad eléctrica, también es seleccionado por su conductividad eléctrica, que comparado con el mismo peso del cobre, el aluminio pueda conducir casi el doble de la corriente, requerimientos de alta conductividad y resistencia mecánica es utilizado en las líneas de alto voltaje. La conductividad térmica de las aleaciones de aluminio oscila entre 50% y 60% de la conductividad térmica del cobre, es ventajoso en intercambiadores de calor, evaporadores, en aplicaciones de calefacción eléctrica, radiadores y en partes del motor de los vehículos.

El aluminio no es ferromagnético, la cual es una propiedad importante en la industria eléctrica y electrónica, así como tampoco este es tóxico.

1.1.2.- Aplicaciones

Entre las muchas aplicaciones que tiene el aluminio, se pueden conseguir en diferentes áreas de la industria, como por ejemplo el área automotriz. El aluminio bien sea forjado o en fundición ha sido ampliamente usado, en el ámbito automotriz, la cantidad de aluminio utilizado en la producción de una unidad vehicular es desde 70 kg (150 lb) hasta 295 kg (650 lb), definiendo el aluminio como uno de los objetivos de los fabricantes debido a el ahorro de combustible por su menor peso, los moldes de arena, de dado y permanente juegan un papel importante en la constitución del motor del vehículo, como por ejemplo: los pistones, la culata, colectores, cárter, carburadores, cajas de transmisión, válvulas de los frenos, caliper de los frenos, las laminas de aluminio son utilizadas para la carrocería, tomas de aires y parachoques, mientras cada vez los rines de aluminio aumentan en el mercado ^[22].

En la industria naval el aluminio se utiliza en embarcaciones donde se consiguen piezas que permiten mejoras en la estructura, en consecuencia se obtienen piezas más livianas y se reduce el mantenimiento por ataques corrosivos o biológicos.

Los bajos módulos de elasticidad ofrecen ventajas en los cascos de las embarcaciones lo que hará la no generación de tensiones en las estructuras de aluminio. El aluminio es usado en motores fuera de borda, en partes estructurales, que se encuentra en continua o intermitente inmersión.

En la industria aeronáutica se utiliza en los aviones, en misiles, y naves espaciales. Esta aplicación aeronáutica se debe a las características que posee el aluminio con respecto a su resistencia a la corrosión, peso eficiente con respecto a su resistencia, especialmente en compresión. ^[2]

1.1.3.- Aleación

La aleación se trata de una mezcla sólida homogénea de dos o más metales, es conveniente dividir las aleaciones de aluminio en dos grandes categorías según su proceso de manufactura, por fundición y por forja. Muchas aleaciones responden a tratamientos térmicos, estos tratamientos incluyen temple, envejecimiento y endurecimiento. En el caso de aleaciones por forja un gran número de aleaciones responden a endurecimiento por deformación a lo largo de su proceso de fabricación, mientras que en el proceso de fundición algunas aleaciones no se pueden tratar térmicamente, en su lugar se varían las condiciones de fundición como su enfriamiento.

En el proceso de fundición al momento de la colada es común que se formen porosidades, las cuales hacen que el producto final modifique algunas de sus propiedades mecánicas, la formación de porosidades en el aluminio es causada por el hidrogeno en forma gaseosa o por la reducción de volumen una vez se solidifica el material, la mayor formación y geometría de poros está relacionada con las condiciones del proceso de fundición. ^[2]

Los aleantes principales en el aluminio, que le otorgan propiedades de interés tecnológico, son: Silicio, Cobre, Magnesio, Zinc, Estaño. Los aleantes secundarios o

impurezas son: Hierro, Cromo, Manganeso, Níquel, Berilio, Cobalto, Sodio, Fósforo, Titanio, Boro y Calcio, que generan y evitan diversos efectos.

1.1.3.1.- Nomenclatura de las aleaciones de aluminio

El aluminio se clasifica numéricamente, según la clasificación Norteamericana se divide en una nomenclatura para la fundición y forja de sus diferentes aleaciones.

Las composiciones están descritas por tres dígitos y un valor decimal, el decimal hace referencia a los límites de aleación en la fundición. Los decimales .1 y .2 hacen referencia a los valores de los lingotes, que una vez fundidos y procesados, se deben obtener resultados químicos conforme a las especificaciones de fundición.

La familia de aleaciones por fundición se muestra en la Tabla I.1:

Tabla I.1: Clasificación del Aluminio y sus principales Aleaciones en Fundición

Nomenclatura.	Característica de la aleación.
1xx.x	Sin aleación, aluminio puro, se obtiene bajo condiciones controladas.
2xx.x	Cobre como principal elemento aleante, pero otros elemento aleantes pueden ser especificados.
3xx.x	El silicio es el principal elemento aleante, pero elementos como el cobre y magnesio pueden ser especificados.
4xx.x	El principal elemento aleante es el silicio.
5xx.x	El principal elemento aleante es el magnesio.
6xx.x	No es usado.
7xx.x	El zinc es el principal elemento aleante, pero elementos como el cobre y magnesio pueden ser especificados.
8xx.x	El principal elemento en la aleación es el estaño.
9xx.x	No es usado.

1.1.4.- Aleación AlSi10

La aleación Aluminio-Silicio está comprendida entre las aleaciones binarias sencillas, son las que contienen 5% y 12% de silicio, siendo esta última una composición muy próxima a la eutéctica, esto es, la aleación con el intervalo de solidificación mínimo. El Silicio, como elemento aleante, tiene los siguientes efectos sobre la aleación:

- Aumenta notablemente la colabilidad, para composiciones cercanas a la eutéctica.
- Disminuye el coeficiente de dilatación térmica.
- Mejora la resistencia a la corrosión.
- Aumenta la resistencia al desgaste.
- Disminuye el agrietamiento por contracción y fragilidad en caliente.
- Mejora la fluidez, mejorando la soldabilidad.
- No mejora las propiedades mecánicas en gran medida, pero aumenta la dureza.

La clasificación de la aleación Aluminio-Silicio, se observa en la Tabla I.2.

Tabla I.2: Clasificación de la Aleación Aluminio-Silicio según el porcentaje del elemento aleante

Clasificación	Porcentaje de Silicio
Hipoeutéctica	De 0% a 10%.
Eutéctica	De 10% a 13%.
Hipereutéctica	De 13% a 25%.

Cuando las aleaciones son eutécticas, el silicio aparece en la estructura en forma de partículas angulares relativamente grandes, cuando el silicio se encuentra en estas estructuras, el material disminuye en alguna de sus propiedades mecánicas tales como en resistencia y ductilidad. Para evitar esto se debe modificar la aleación, esto se consigue a través del sodio, bien sea como metal o a través de sales de sodio

añadidas en la fundición. El proceso de la modificación del silicio no afecta el tamaño de grano de la aleación, la modificación viene acompañada de un mejoramiento de las propiedades mecánicas de la aleación, aumentando la carga máxima con el límite de deformación, carga de rotura por tracción y alargamiento; el efecto de la modificación se hace evidente cuando la apariencia de la superficie de fractura es fina y sedosa, mientras que la no modificada observa una zona de fractura bastante irregular en ambas caras como consecuencia de las grandes partículas eutécticas de silicio.

La microestructura del silicio también puede ser modificada por el Estroncio (Sr) y por el Antimonio (Sb).^[3]

Las propiedades de la aleación Aluminio-Silicio se controlan mediante endurecimiento de la solución sólida de la matriz de aluminio α , con endurecimiento por dispersión de la fase β y con la solidificación, lo que controla el tamaño y forma del grano primario, así como la naturaleza del grano eutéctico, el enfriamiento rápido se obtiene en la fundición de presión o molde permanente, incrementando la resistencia al disminuir el tamaño de grano y del microconstituyente eutéctico, se utiliza titanio y boro para obtener granos más pequeños.

El cobre en las aleaciones de aluminio mejora sustancialmente el comportamiento durante el mecanizado, pero disminuye la resistencia a la corrosión, también la resistencia mecánica aumenta. El hierro en forma general es considerado dañino para las aleaciones, este se encuentra como impureza natural del aluminio y es por eso que debe ser controlado, ya que si aumenta su porcentaje pueden verse afectadas sus propiedades. El magnesio como aleante secundario en porcentajes del 1% mejora las propiedades mecánicas al formar compuesto intermetálico endurecedor Mg_2Si .^[4]

A continuación se muestra el diagrama de fase de Aluminio-Silicio, Figura N° 1, donde se presenta, luego de una evaluación de la composición química del material suministrado, que esta es una aleación eutéctica.

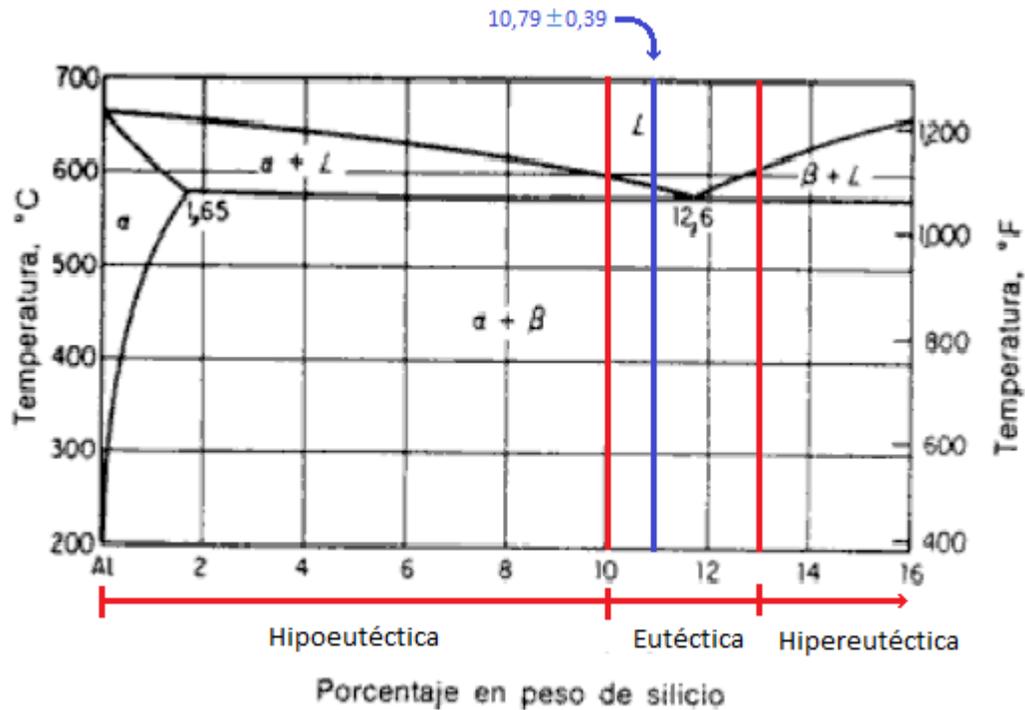


Figura N° 1, Diagrama de Fases de la aleación Aluminio-Silicio.

1.2.- FUNDICIÓN

Los procesos de manufactura pueden ser divididos en dos grupos como lo son los productos de uso común como hojas, placas, láminas, varillas, alambre, tubos, entre otros. La otra división son los productos de usos para ingeniería son los productos diseñados para aplicaciones específicas extrusión, piezas forjadas, por fundición, por estampado, polvo metalúrgico, etc. ^[20]

Entre los productos para aplicaciones específicas se encuentra la fundición, en el caso de la aleación de aluminio es normalmente producida por dado de presión, moldes permanente, arena y arena verde. Las variables del proceso incluyen presión

de vacío, baja presión, fuerza centrífuga, el tipo y uso de moldes. La elección del tipo de proceso de fundición por lo general se basa en la consideración de la forma del producto a ser creado, diseños complejos pueden ser hechos por fundición debido a que maquinarlos o hacerlos por forja sería muy costoso, la ingeniería de fundición, en el momento obtiene resultados con tolerancias muy bajas, y con propiedades mecánicas controladas con altos valores de resistencia ^[2].

La fundición es la producción de piezas colando metal fundido en moldes preparados que contienen cavidades con la forma deseada dentro de las cuales el metal se solidificará, para luego ser removido del molde, algunas de las ventajas del proceso de colada con respecto a los procesos de trabajo mecánico tienen las siguientes ventajas:

- Se puede producir a cantidad y bajo costo piezas de geometría complicada.
- Dentro de ciertos límites o parámetros las piezas producidas respecto a sus propiedades y proporciones.
- Con tal que se guarde el modelo o la coquilla, se pueden producir piezas iguales en cualquier momento.
- A menudo las piezas son más rígidas cuando se producen como una sola unidad que cuando se producen como un conjunto de partes.

La solidificación y el enfriamiento de los metales en el molde se ven afectados por varios factores, entre ellos las propiedades térmicas y metalúrgicas del metal. Según el tipo de molde varia la velocidad de enfriamiento. Después del vaciado ocurren una serie de eventos durante la solidificación, por ejemplo la temperatura del metal baja al punto de solidificación la temperatura se mantiene constante mientras en calor latente de fusión es disipado, el frente de solidificación que es la interfaz solido liquido, inicia en las paredes del molde y se desplaza hacia el centro. Una vez ocurrida la solidificación, se reinicia el enfriamiento, el metal

denominado como fundición se retira del molde y se deja enfriar a temperatura ambiente ^[20].

1.2.1 Fundición por gravedad en molde metálico.

Molde permanente o coquilla, este tipo de moldes son los que se utilizan en la fabricación de rines, consta de dos mitades de un molde de materiales como hierro colado, acero, bronce, el grafito o aleaciones de metal refractario. El molde posee una cavidad o canal de alimentación que se maquina en el molde formando parte integral del mismo, estos moldes son utilizados para moldes grandes en fundiciones de aluminio o magnesio. Para incrementar su vida por lo general se cubren con barros refractarios, como silicato de cobre y arcilla, sirviendo como agentes de separación y barreras térmicas, controlando la velocidad de enfriamiento. El proceso se realiza vertiendo el metal fundido en el molde bien sea de manera automatizada o manual, en el canal de alimentación donde se distribuye el fluido hacia el molde y se va llenando por acción de la gravedad, en ocasiones los moldes pueden tener ángulos de inclinación para que el fluido se distribuya de manera más suave y uniforme.

Los moldes se sujetan por medios mecánicos y se calientan aproximadamente a 150 °C-200 °C, para enfriar los moldes se usa medios especiales como por ejemplo agua o aire, y en ocasiones se les coloca aletas como los motores de las motos que son refrigerados por aire. Este proceso puede producir elevadas tasas de producción, fundiciones con buen acabado superficial, buenas tolerancias dimensionales, propiedades mecánicas uniformes ^[5]. A continuación se muestra un molde permanente o coquilla Figura N° 2.

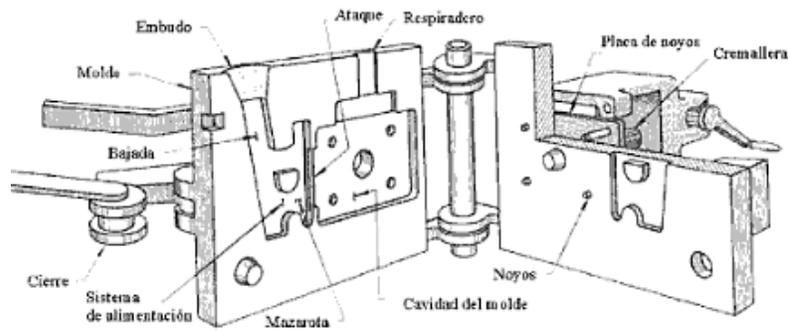


Figura N° 2, Molde Permanente

1.3.- FRACTURA DE LOS MATERIALES

La fractura simple es la separación de un cuerpo en dos o más piezas en respuesta a una tensión aplicada constante y a temperaturas que son relativamente bajas en comparación con la temperatura de fusión del material. La tensión aplicada puede ser de tracción, compresión, cizalladura o torsión. Cualquier proceso de fractura está compuesto de dos etapas, la formación y la propagación de una fisura. En los materiales de ingeniería, existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica ^[1].

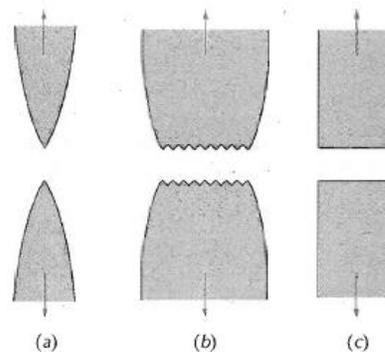


Figura N° 3, (a) Fractura muy dúctil en la cual la probeta se estiraciona hasta llegar a un punto. (b) Fractura moderadamente dúctil después de cierta estiración. (c) Fractura frágil sin ninguna deformación plástica.

1.3.1.-Tipos de fractura

Las típicas clases de fracturas son: Fractura dúctil, fractura frágil, fractura por fatiga y fractura por Creep.

La fractura frágil se caracteriza por tener una deformación plástica inapreciable, además ocurre por una propagación rápida de la grieta. La dirección del movimiento de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana. En la mayoría de los materiales cristalinos frágiles, la propagación de la grieta corresponde a una sucesiva y repetida rotura de enlaces atómicos a lo largo de planos cristalográficos. Este tipo de fractura se denomina transgranular, debido a que las grietas pasan a través de los granos. Por el contrario, en algunas aleaciones, la propagación de la grieta ocurre a lo largo de los bordes de grano; esta fractura se denomina fractura intergranular.

Por otra parte, el proceso de fractura dúctil normalmente ocurre en varias etapas. En primer lugar, después de iniciarse la estricción, se forman pequeñas cavidades, o microcavidades, en el interior de la sección. Posteriormente, a medida que la deformación aumenta, estas microcavidades se hacen mayores, se juntan y coalescen para formar una grieta elíptica, la cual tiene su eje mayor perpendicular a la dirección de la fuerza aplicada. La grieta continúa creciendo en esta dirección perpendicular y finalmente, se produce la fractura por la rápida propagación de una grieta alrededor del perímetro exterior de la estricción, por deformación de cizalladura formando un ángulo de 45° con respecto del eje de tracción ya que este es el ángulo en el cual la tensión de cizalladura es máxima. ^[1]

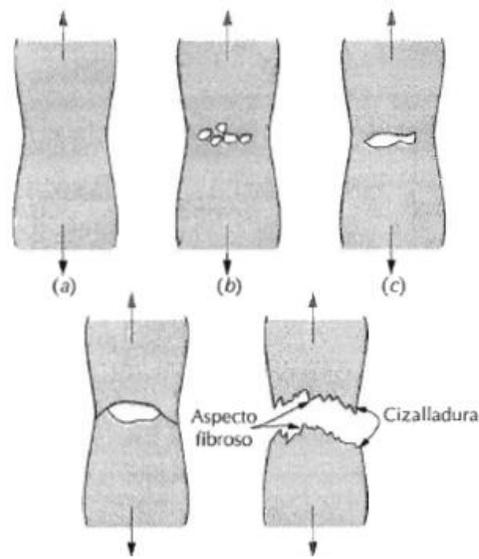


Figura N° 4, Etapas de la fractura dúctil

1.3.2.- Efecto de las imperfecciones en la fractura

La capacidad de un material para resistir el crecimiento de una grieta depende de una gran cantidad de factores, en nuestro caso el epicentro se encuentra en las imperfecciones del material, en donde las más grandes reducen el esfuerzo admisible. Las técnicas especiales de manufactura, como el filtrado de las impurezas de los metales líquidos reducen el tamaño de las imperfecciones y mejoran la tenacidad a la fractura. Nos referimos a una imperfección a pequeños poros, inclusiones o microgrietas, no indica defectos a nivel atómico como vacancias o dislocaciones.

La tenacidad a la fractura mide la capacidad de un material que contiene una imperfección para resistir una carga aplicada. Basta con aplicar un esfuerzo de tensión a un espécimen preparado con una imperfección de tamaño y geometría conocidos, como se muestra en la Figura N° 5, para obtener el factor de intensidad de esfuerzo, K , que causa el crecimiento de la imperfección y lleva a la falla. ^[1]

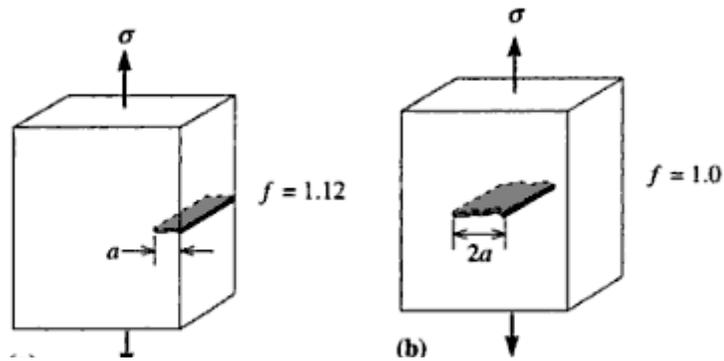


Figura N° 5, (a) *Especímen con grietas superficiales sometido a tensión.* (b) *Especímen con grietas internas sometido a tensión*

El factor de intensidad de esfuerzo viene dado por la ecuación:

$$K = \sigma f \sqrt{\pi a} \quad (E.1)$$

Donde f viene dado por el tipo de muesca como se muestra en la Figura N° 5.

El factor crítico de intensidad de esfuerzo se conoce como tenacidad a la fractura, K_c , siendo la K necesaria para la propagación de la grieta. Al aumentar el grosor del espécimen, la tenacidad a la fractura disminuye hasta llegar a un valor constante. Esta constante se llama Tenacidad a la fractura en deformación plana, K_k ó K_{Ic} .^[1]

Toda grieta o imperfección limita la capacidad de un material para resistir un esfuerzo a la tensión, ya que esta amplifica y concentra el esfuerzo aplicado. Es por ello que debemos estudiar el esfuerzo real que se obtiene en la punta de la grieta.

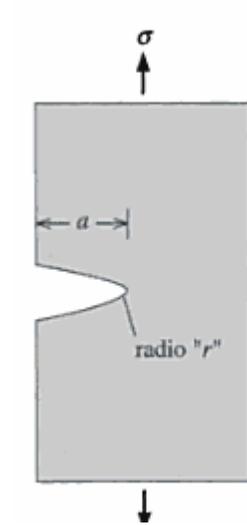


Figura N° 6, Especimen que contiene una Imperfección.

La Figura anterior muestra una grieta, que se denomina Imperfección de Griffith, que tiene una longitud a , en la superficie de un material. También indicando el radio r de esta. Cuando se aplica un esfuerzo de tensión σ , el esfuerzo real en la punta de la grieta viene dado por:

$$\sigma_{real} = 2\sigma\sqrt{a/r} \quad (E.2)$$

Dejando en evidencia que para grietas muy delgadas o largas, la relación σ_{real}/σ se hace grande, es decir, se intensifica el esfuerzo. Si el esfuerzo σ_{real} es mayor que la resistencia a la cedencia, la grieta crece y termina por causar la falla.

Utilizando un método distinto, se reconoce que un esfuerzo aplicado causa una deformación elástica, relacionada con el módulo de elasticidad E , dentro del material. Cuando se propaga una grieta, esta energía de deformación se libera y se reduce la energía total. Sin embargo, al mismo tiempo se crean dos superficies al extenderse la grieta; esto aumenta la energía asociada con la superficie. Si se

balancean estas dos energías, se observa que el esfuerzo crítico necesario para que la grieta se propague se determina con la ecuación E.3.

$$\sigma_{crítica} \cong 2\sigma \sqrt{\frac{E\gamma}{\pi a}} \quad (E.3)$$

Donde a , es la longitud de una grieta superficial (o la mitad de la longitud de una grieta interna) y γ es la energía superficial por unidad de área. De nuevo, esta ecuación indica que, aunque las grietas sean pequeñas, se limita mucho la resistencia del material.

Si reordenamos la ecuación E.1 que describía el factor de intensidad de esfuerzo K , obtenemos que:

$$\sigma = \frac{K}{f\sqrt{\pi a}} \quad (E.4)$$

Esta ecuación tiene forma parecida a la ecuación anterior, lo que nos indica la dependencia de las propiedades mecánicas respecto al tamaño de las imperfecciones presentes en el material.

El desarrollo de procesos de manufactura que reduzcan al mínimo el tamaño de las imperfecciones se vuelve determinante para mejorar la resistencia del material.

1.3.3.- Fatiga

La fatiga es la disminución de la resistencia de un material debida a esfuerzos repetitivos o de forma variable, que pueden ser mayores o menores que la resistencia a la cedencia. Este fenómeno ocurre de forma común en componentes sujetos a cargas dinámicas de autos, aviones, álabes de turbinas, resortes, cigüeñales y demás maquinaria, implantes biomédicos y productos al consumidor como zapatos, que están sujetos en forma constante a cargas repetitivas en forma de tensión,

compresión, flexión, vibración, dilatación térmica y contracción u otros. Aunque esos esfuerzos son con mucha frecuencia menores a la resistencia a la fluencia causan la falla por fatiga si se aplican una cantidad suficiente de veces. Sin embargo este tipo de fractura también ocurre por encima de la resistencia a la cedencia del material. ^[6]

Para obtener medidas cuantitativas de resistencia a la fatiga, es necesario realizar ensayos en condiciones controladas y para ello se pueden adoptar diferentes métodos de ensayos de fatiga, desde los ensayos de laboratorio con probetas, bajo las más simples condiciones de esfuerzo, a los ensayos a escala natural de componentes y estructuras bajo condiciones simuladas de lo que ocurre en la práctica. Los ensayos de laboratorio son utilizados principalmente para determinar la influencia de la resistencia a la fatiga en factores como elementos de aleación, tratamiento térmico o acabado superficial y estos pueden hacerse en probetas lisas o entalladas, a baja o alta temperatura, o bajo condiciones corrosivas.

Las tensiones cíclicas en un ensayo de fatiga 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 las figuras N° 7, N° 8 y N° 9. La Figura N° 7 muestra que la amplitud es simétrica a un nivel de tensiones promedio cero, por ejemplo, alternando desde una tensión máxima de tracción ($\sigma_{m\acute{a}x}$) a una tensión de compresión ($\sigma_{m\acute{i}n}$) de igual magnitud; esto se llama ciclo de reversión completo. Otro tipo llamado ciclo de tensiones repetitivas se ilustra en la Figura N° 8. El máximo y el mínimo son asimétricos relativo al nivel de tensiones cero. Finalmente, el nivel de tensiones puede variar al azar en amplitud y frecuencia como se ejemplifica en la Figura N° 9. En la figura N° 8 también se indica que son varios los parámetros usados para caracterizar los ciclos de tensiones fluctuantes. La tensión amplitud media σ_m está definida como el promedio de las tensiones máximas y mínimas en el ciclo y dadas por la ecuación.

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\grave{a}n})}{2} \quad (\text{E.5})$$

Además, el intervalo de tensiones, σ_r , es sólo la diferencia entre $\sigma_{m\acute{a}x}$ y $\sigma_{m\grave{a}n}$ de la ecuación

$$\sigma_r = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\grave{a}n} \quad (\text{E.6})$$

El esfuerzo alternante σ_a es solamente la mitad de este rango de tensiones y dado por la ecuación

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\grave{a}n})}{2} \quad (\text{E.7})$$

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

$$R = \frac{\sigma_{m\grave{a}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (\text{E.8})$$

Por convención las tensiones de tracción son positivas y las de compresión son negativas.

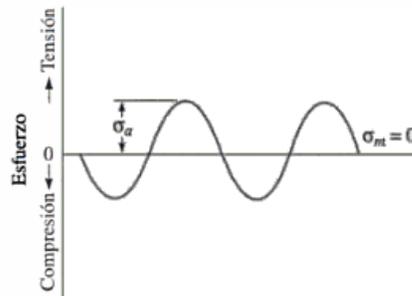


Figura N° 7, Ciclo de tensión de inversión total

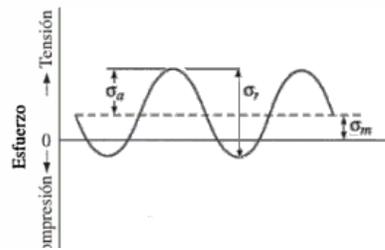


Figura N° 8, Ciclo de tensión repetitiva

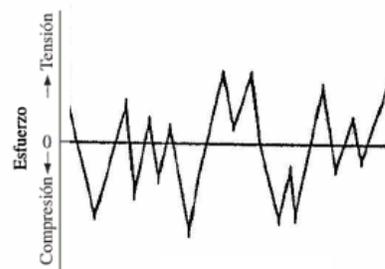


Figura N° 9, Ciclo de tensión al azar

1.3.4.-Etapas de la fatiga

Etapa I: Es la iniciación de la grieta y su propagación por el plano de deslizamiento de la fractura, extendiéndose desde la superficie hacia el centro aproximadamente 45° de la dirección del esfuerzo axial, en esta etapa la fractura nunca se extiende por más de 2 o 5 granos de alrededor del origen. En cada grano, la superficie de fractura está a lo largo de un plano cristalográfico bien definido. Usualmente no existen estriaciones de fatiga asociadas con la superficie de fractura en esta etapa. En algunos casos, dependiendo del material, el ambiente y el nivel de esfuerzo, la fractura de la etapa I puede que no sea perceptible. ^[7]

Etapa II: El crecimiento de la grieta no está gobernado por el esfuerzo cizallante local sino por el esfuerzo normal máximo principal en la vecindad de la punta de la grieta. Así, la punta de la grieta está obligada a desviarse desde su camino

de deslizamiento y propagarse en una dirección perpendicular a la dirección del máximo esfuerzo normal. ^[7]

Etapa III: Ocurre durante el último ciclo de esfuerzo cuando la sección transversal no puede soportar la carga aplicada. La fractura final, la cual es el resultado de una sobre carga, puede ser frágil, dúctil, o una combinación de ambas. ^[7]

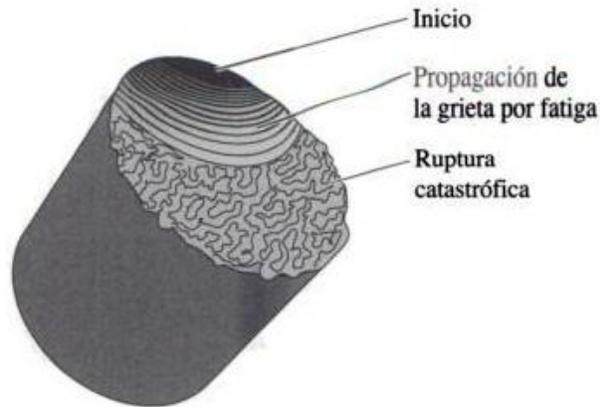


Figura N° 10, Etapas de Fractura por Fatiga.

1.3.5.- Velocidad de propagación de la grieta

La rapidez de crecimiento de la grieta es una función del intervalo del factor de intensidad de esfuerzo, ΔK , que caracteriza la geometría de la grieta y la amplitud del esfuerzo. Por debajo de un ΔK umbral no crece grieta; para intensidades de esfuerzo un poco mayores, una grieta crece con una velocidad determinada por la expresión de Paris-Edrogan ^[6]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (\text{E.9})$$

En donde:

C y n son constantes empíricas que dependen del material

$\frac{da}{dN}$: Pendiente de la curva de velocidad de crecimiento

Por último, cuando ΔK es todavía mayor, las grietas crecen con rapidez y en forma inestable, hasta que sobreviene la fractura. La velocidad de crecimiento de la grieta aumenta a medida que aumenta el tamaño de la misma.

A continuación se muestra un gráfico representando la velocidad de crecimiento de grieta en relación con el intervalo de factor de intensidad de tensiones ΔK [6].

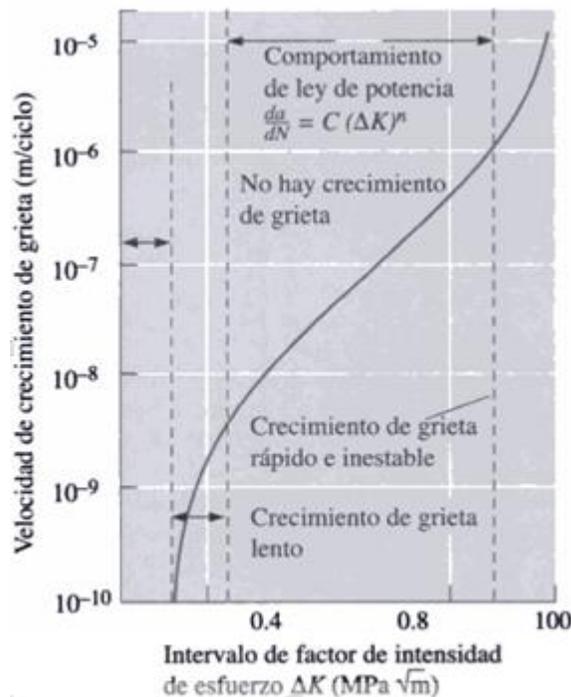


Figura N° 11, Gráfico de Velocidad de crecimiento de grieta en función del intervalo de factor de intensidad de esfuerzo

El gráfico de la Figura N° 11, fue generado por vez primera por Paul C. Paris en 1961 que permitió obtener la siguiente ecuación:

$$N_f = \frac{da}{C\pi^{\frac{n}{2}}(\Delta\sigma)^n} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{Y^n a^{\frac{n}{2}}} da \quad (\text{E.10})$$

Donde:

- N_f : número de ciclos hasta la rotura
- Y : parámetro independiente de la longitud de la fractura
- C y n : parámetros definidos por el material
- a_c : longitud crítica de la grieta
- a_0 : longitud de la grieta inicial

a_c se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_Y \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad (\text{E.11})$$

Siendo K_{Ic} es la tenacidad de fractura en deformaciones planas ^[6].

1.3.6.- Curva S-N

La Curva S-N o también conocida como curva de Wöhler es utilizada para determinar tanto la resistencia como el límite a la fatiga del material. En el caso del Aluminio el límite a la fatiga no existe. Esta curva se genera ensayando un número de probetas similares, sometiendo cada una a un valor particular de carga fluctuante o alternante hasta su rotura; así se obtiene una relación entre la carga fluctuante S y el número de ciclos para la fractura N.

La curva de Wöhler es representada en escala logarítmica, el número de ciclos se representa en escala logarítmica ya que su valor puede variar entre unos millares a muchos millones. El esfuerzo también puede representarse en esta escala y se ha pretendido que los resultados puedan representarse por una línea recta.

Un rasgo característico del comportamiento a la fatiga, es la dispersión en los resultados de los ensayos. Parte de la dispersión puede atribuirse a errores experimentales, como una mala alineación de la probeta o una determinación inexacta del valor del esfuerzo; pero lo que parece cierto es que la dispersión es una característica inherente del comportamiento de la fatiga. Por otra parte, es necesario realizar un gran número de ensayos si se quiere determinar exactamente la curva $S-N$. Para obtener la recta que mejor se ajusta a esa curva es necesario utilizar un método cualitativo del cual se hablará más adelante.

La resistencia a la fatiga se define como el valor máximo del esfuerzo alternante (o fluctuante) que resistirá sin fallo un material para un número dado de ciclos.

La representación de esta curva se da lugar entre 10^5 y 10^8 ciclos. Existen materiales para los cuales los fallos tienen lugar rara vez después de ensayos mayores a 1.000.000 de ciclos, incluso si los ensayos de fatiga se prolongan hasta 10^8 ó 10^9 ciclos. El diagrama $S-N$ representa una primera línea inclinada con gran pendiente negativa en donde las probetas están sometidas a esfuerzos por encima del límite a la fluencia del material y está caracterizada por ser de bajo ciclaje. Luego le sigue una recta con menor inclinación caracterizada por ser de alto ciclaje. En estas dos rectas las probetas fallan; por último se genera una línea horizontal que por debajo de esta las probetas no fracturan. La sollicitación a la cual la curva llega a ser horizontal se conoce como límite de fatiga ^[8].

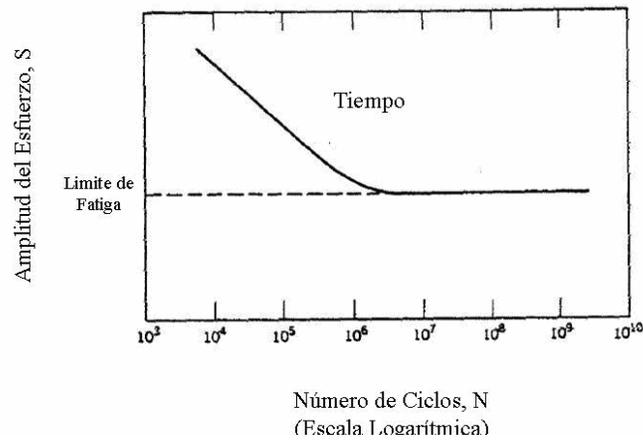


Figura N° 12, Curva $S - N$ en donde el material muestra un límite a la fatiga

En materiales no ferrosos, como viene siendo la aleación estudiada, la curva de Wöhler no presenta límite de fatiga, es decir, no posee la última etapa denominada “vida infinita” del material.

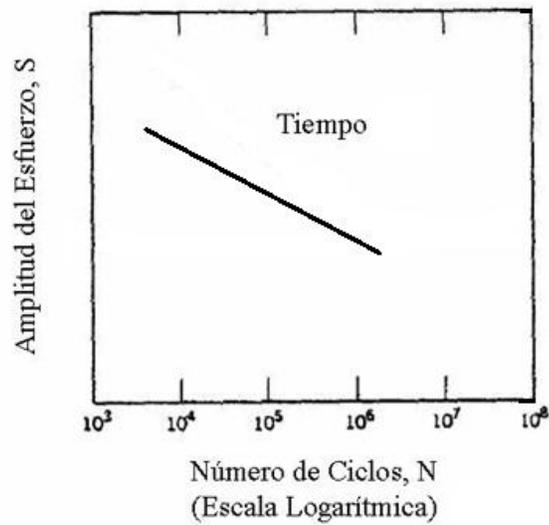


Figura N° 13, Curva $S-N$ Donde el material no muestra límite de fatiga

1.3.7.- Modelos estadísticos utilizados en ensayos de fatiga

En la actualidad, para estudiar la prevención de fallas en los procesos industriales es necesario acudir a la aplicación de modelos probabilísticos para disponer de adecuadas técnicas de predicción, que han sido fundamentales para el aseguramiento de calidad de procesos y productos.

La Distribución de Weibull es un complemento entre la Distribución Normal y la Distribución Exponencial, que son casos particulares de ella. Por su complejidad, sólo se usa cuando se anticipa que una de ellas es la que mejor describe la distribución de fallas o cuando se producen muchas fallas y los tiempos correspondientes no se ajustan a una distribución más simple. Este modelo tiene una extensa gama de uso, desde previsiones meteorológicas hasta prevención de fallas de cojinetes y mecanismos transmisores de potencia ^[9].

El modelo propuesto por Weibull nos permite estudiar cuál es la distribución de fallas de cierto componente que se pretende controlar, que a través de un registro de fallas se observa que estos varían a lo largo del tiempo, dentro de lo que se considera el tiempo de vida de este. El método no determina las variables que afectan en la vida del elemento, pero facilitan la identificación de ellas y su consideración, aparte de disponer de una herramienta de predicción de comportamientos ^[9].

Los esfuerzos al que se someten los materiales pueden modelarse de manera adecuada mediante la Distribución de frecuencias de Weibull, así como también pueden modelar situaciones del tipo tiempo-falla, ó bien puede indicar la vida útil y la confiabilidad de un elemento gracias a la capacidad de cambiar de forma dependiendo de la variación del valor del parámetro de forma β ^[9].

1.3.7.1.- Características de la Distribución de Weibull

En el trabajo de investigación de Álvarez, P. y Hernández, R. ^[10]. Se realizó un estudio probabilístico en donde se desarrollaron las siguientes ecuaciones:

Partiendo de la escritura de la tasa de fallas en función de la fiabilidad de manera que:

$$\lambda(t) = \frac{d[R(t)]}{dt} \quad (\text{E.12})$$

$$\text{Ó} \quad R(t) = e^{-\int \lambda(t) dt} \quad (\text{E.13})$$

Siendo:

- $\lambda(t)$ = Tasa de Fallas.
- $R(t)$ = Fiabilidad.
- t = Tiempo en ciclos de Falla para el estudio de fatiga.

En 1951 Weibull propuso que la expresión empírica más simple que podía representar una gran variedad de datos reales podía obtenerse escribiendo:

$$\int \lambda(\tau) d\tau = \left(\frac{\tau-\delta}{\alpha}\right)^\beta \quad (\text{E.14})$$

Por lo que la fiabilidad será:

$$R(\tau) = e^{-\left(\frac{\tau-\delta}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{E.15})$$

Siendo:

- δ = parámetro inicial de localización, el cual se utiliza para desplazar una distribución hacia un lado u otro. Esto significa que, dada una distribución cuyo dominio habitual sea $[0, +\infty)$, la inclusión de un parámetro de δ localización cambiará el dominio a $[\delta, +\infty)$, este parámetro define el punto de partida u origen de la distribución.
- α = parámetro de escala o vida característica, Este es el parámetro que caracteriza a las distribuciones uniparamétricas. El parámetro de escala define cuán dispersa se encuentra la distribución.
- β = parámetro de forma o pendiente de Weibull. Este parámetro define la forma de la distribución, y representa la pendiente de la recta de $F(t)$ vs t , describiendo el grado de variación de la tasa de fallas.

Se ha podido demostrar que gran cantidad de representaciones de fiabilidades reales pueden ser obtenidas a través de ésta ecuación, que como se mostrará, es de muy fácil aplicación.

La distribución de Weibull se representa normalmente por la función acumulativa de distribución de fallas $F(t)$:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{E.16})$$

Ahora bien, definiendo la función densidad de probabilidad como la derivada de la función acumulativa de fallas $F(t)$, se tiene que

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{E.17})$$

En consecuencia la tasa de fallas para esta distribución es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (\text{E.18})$$

Las variaciones de la densidad de probabilidad, tasa de fallas y función acumulativa de fallos en función del tiempo para los distintos valores de β , están representados gráficamente en la Figura N° 14.

Es importante destacar que en función de las combinaciones de los parámetros de Weibull se pueden dar mecanismos de fallas particulares como son:

- a) $\delta = 0$: el mecanismo no tiene una duración de fiabilidad intrínseca
- b) $\delta > 0$: El mecanismo es intrínsecamente fiable desde el momento en que fue puesto en servicio hasta que $t = t_0$
- c) $\delta < 0$. Indica que el mecanismo fue utilizado o tuvo fallos antes de iniciar la toma de datos

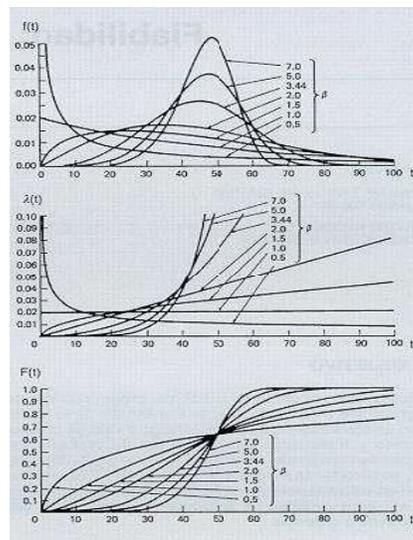


Figura N° 14, Variación de la densidad de probabilidad $f(t)$, tasa de fallas $\lambda(t)$ y la función acumulativa de fallos $F(t)$ en función del tiempo para distintos valores del parámetro de forma β

1.3.7.2.- Análisis de Weibull

Uno de los problemas fundamentales de la distribución de Weibull es la evaluación de los parámetros (δ , α , β) de esta distribución. Raif Sakin, Irfan Ay estudiaron el comportamiento a la fatiga sometida a flexión de dos compuestos de fibra de vidrio reforzado con un recubrimiento de poliéster, para siete niveles de esfuerzo diferentes y a ocho muestras distintas según la densidad de la fibra de vidrio, estos utilizaron la distribución de Weibull de dos parámetros para el análisis de la vida a la fatiga, su función de probabilidad de fallas (*pdf*) se muestra en la (E.19)

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{T}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{E.19})$$

Si la ecuación de probabilidad de fallas es integrada, se convierte en la función de densidad acumulativa en la (E.20), las ecuaciones (E.21), (E.22) y (E.23) se derivan de la (E.19)

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{E.20})$$

$$1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (\text{E.21})$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (\text{E.22})$$

$$R_t = 1 - F_t \quad (\text{E.23})$$

Donde R_t es la probabilidad de vida y F_t es la probabilidad de falla.

Si a la ecuación (E.12) le aplicamos logaritmo natural se obtiene la ecuación (E.24)

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right) = \beta \ln(t) - \beta \ln(\alpha) \quad (\text{E.24})$$

Cuando la ecuación (E.24) es reacomodada como un ecuación lineal

$$Y = mx + c \quad (\text{E.25})$$

Donde

$$Y = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1-F(t)} \right) \right) \quad (\text{E.26})$$

$$m = \beta \quad (\text{E.27})$$

$$c = -\beta \ln(\alpha) \quad (\text{E.28})$$

También se definen otras variables de la distribución de Weibull, las cuales son la vida media (Tiempo medio de falla = $MTTF = N_0$), desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV), estas se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$MTTF = N_0 = \alpha \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (\text{E.29})$$

$$SD = \alpha \cdot \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \quad (\text{E.30})$$

$$CV = \frac{SD}{N_0} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\beta} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)}}{\alpha \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right)} \quad (\text{E.31})$$

Donde Γ es la función gamma viene dada por la ecuación E.29

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (\text{E.32})$$

1.3.7.3.- Coeficiente de Correlación de Pearson ^[11]

Se realizó un análisis de correlación llamado Coeficiente de Correlación de Pearson ^[11], que es la medida del grado de relación entre dos variables, el cual se describe brevemente a continuación:

$$\rho = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_y \sigma_x} \quad (\text{E.33})$$

Donde:

ρ : Es el coeficiente de correlación de Pearson.

$cov(X,Y)$: Es la covarianza entre las variables X y Y.

σ_x : Es la desviación estándar de la variable X.

σ_y : Es la desviación estándar de la variable Y.

$$cov(X,Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (\text{E.34})$$

Donde:

\bar{y} : Es la media aritmética de los valores de la variable Y.

y_i : Representa cada uno de los valores de la variable Y.

\bar{x} : Es la media aritmética de los valores de la variable X.

x_i : Representa cada uno de los valores de la variable X.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{E.35})$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (\text{E.36})$$

$$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{E.37})$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{E.38})$$

En la Tabla I.3 es clasificada la correlación de Pearson según Salkin y Escalona ^[11] desde 0 hasta 1.

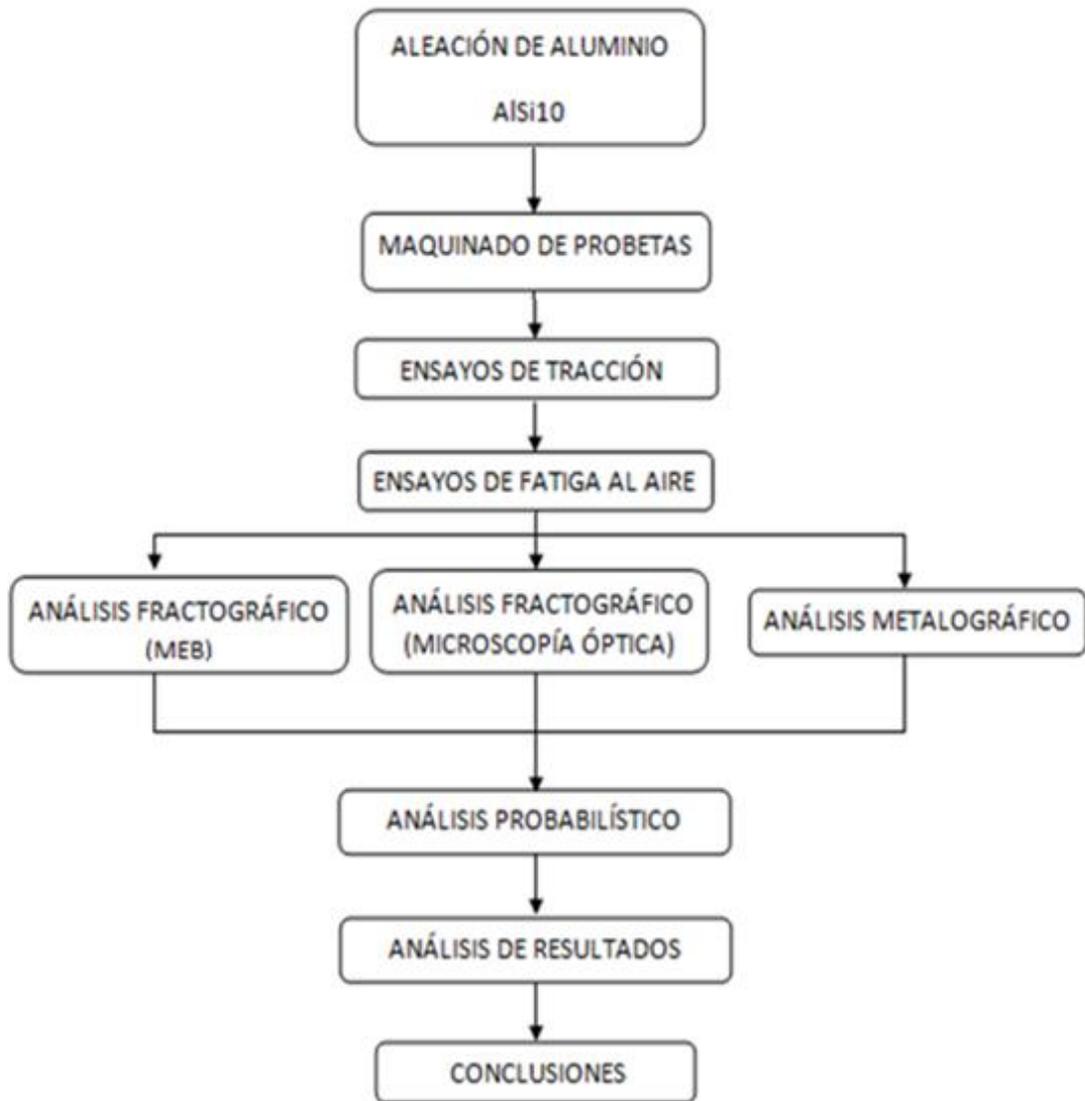
Tabla I.3: Clasificación de Pearson según su magnitud

Clasificación según la magnitud del Coeficiente.
Si $\rho = -1 \rightarrow$ Existe una perfecta relación lineal inversa.
Si $\rho \in (-1, -0,5] \rightarrow$ Existe una alta relación lineal inversa.
Si $\rho \in (-0,5, 0) \rightarrow$ Existe una baja relación lineal inversa.
Si $\rho = 0 \rightarrow$ No existe relación lineal.
Si $\rho \in (0, 0,5) \rightarrow$ Existe una baja relación lineal directa.
Si $\rho \in [0,5, 1) \rightarrow$ Existe una alta relación lineal directa.
Si $\rho = 1 \rightarrow$ Existe una perfecta relación lineal directa.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2. 1.- DIAGRAMA EXPERIMENTAL



2.2.- MATERIAL RECIBIDO

El material fue suministrado en piezas cilíndricas de aproximadamente 1,8 cm de diámetro y 22 cm de largo como se muestra en la Figura N°15, las cuales fueron realizadas por fundición por gravedad, fue vertida manualmente en molde de coquilla.



Figura N° 15. Material entregado

La aleación de aluminio según datos de la empresa, la composición química de la aleación es la que corresponde a la Tabla de composición Química suministrada por la empresa, Tabla II.1.

Tabla II.1: Tabla de Composición Química suministrada por la empresa

Silicio (Si)	Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganeso (Mn)	Magnesio (Mg)	Zinc (Zn)	Níquel (Ni)
10.0 – 10.75	0 - 0.22	0.50 – 0.60	0 - 0.03	0.07 – 0.09	0 - 0.01	0 - 0.014
Plomo (Pb)	Cromo (Cr)	Titanio (Ti)	Calcio (Ca)	Sodio (Na)	Estaño (Sn)	
0 - 0.02	0 - 0.01	0.05 – 0.07	0 - 0.002	0.002 – 0.02	0 - 0.02	

2.3.- MAQUINADO Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

El cilindrado y refrentado de las probetas de Fatiga y Tracción, se hizo en los tornos manuales ubicados en los Talleres de la Escuela de Ingeniería Mecánica, hasta llevar las muestras a un diámetro constante de 14mm aproximadamente para luego ser mecanizadas en el torno de control numérico marca EMCO, modelo Concept Turn 55 que se encuentra en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, según las normas ASTM A-370 ^[12], para las probetas de tracción y ASTM E-606 ^[13], para las probetas de fatiga. Una vez realizadas la probetas, se procedió a dar el acabado superficial por medio del lijado y pulido de la sección calibrada de las probetas de fatiga, el cual fue realizado en un torno a baja velocidad, en dirección longitudinal en relación al eje de la probeta, bajando el gramaje de las lijas progresivamente desde 300 hasta llegar a 2000, para evitar que cualquier tipo de imperfección causada por el mecanizado influyera en el ensayo.

2.3.1.- Dimensionamiento de las probetas de fatiga de radio continuo

El diámetro de los hombros de las probetas de fatiga de aluminio es comúnmente de 12,7 mm y la longitud de 101,6 mm. Esto a partir de la norma ASTM E-606.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga de radio continuo, estos son comúnmente los siguientes: diámetro menor de la sección de ensayo (d) igual a 6,35 mm, radio continuo de la sección de ensayo de la probeta R igual a 58,74 mm.

La Figura N°16 presenta esquemáticamente el dimensionamiento de las probetas antes mencionadas.

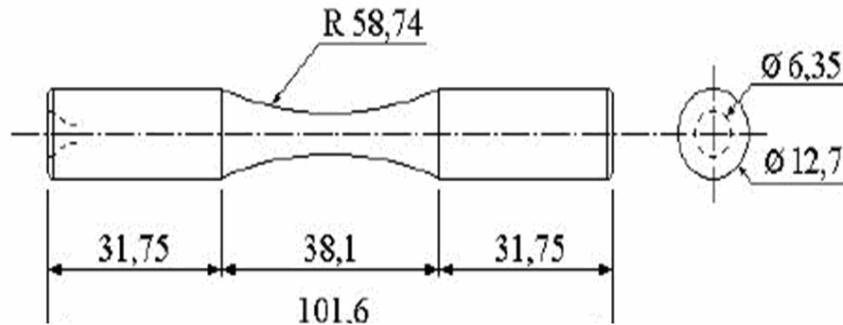


Figura N° 16. Esquema de las probetas de radio continuo para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 606

2.3.2.- Dimensionamiento de las probetas de fatiga de sección transversal constante

El diámetro de los hombros de las probetas fue de 12,7 mm y la longitud de 101,6 mm ya que el equipo a ser utilizado será el mismo.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de fatiga de sección transversal constante, son los siguientes: diámetro menor de la sección de ensayo (d) igual a 6,35 mm, siendo constante a lo largo de la sección de ensayo por 19,05 mm aproximadamente, luego la sección aumenta su diámetro hasta llegar al diámetro de los hombros con un radio r igual a 25,4 mm.

En la Figura N°17 se presenta esquemáticamente el dimensionamiento de las probetas antes mencionadas.

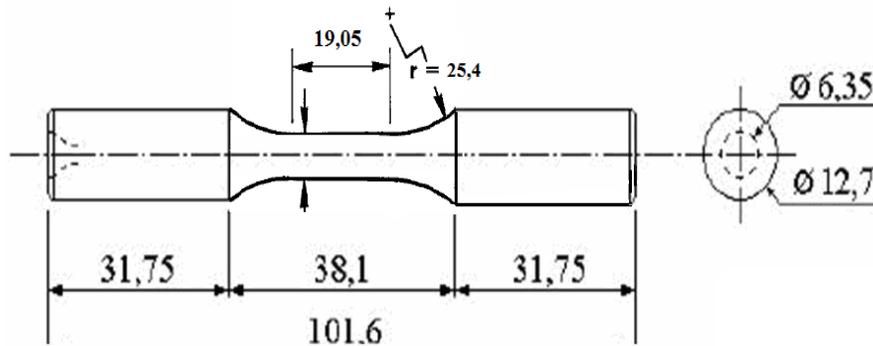


Figura N° 17, Esquema de las probetas de sección transversal constante para ensayos de fatiga en flexión rotativa según la norma ASTM E 606

2.3.3.- Dimensionamiento de las probetas de tracción

El diámetro de los hombros de las probetas de tracción fue de 12,7 mm. Además, la longitud de las probetas de tracción fue de 120 mm, ya que las mordazas de la máquina donde se realizarán los ensayos pueden alojar probetas de 120 mm de longitud mínima sin la utilización de barras o accesorios de extensión.

En lo referente a las dimensiones de la sección de ensayo de las probetas de tracción, éstas deben cumplir con las recomendaciones sugeridas por la norma ASTM A 370 ^[12]. Dichas dimensiones son: diámetro de la sección de ensayo (d) igual a 6,25 ±0,12 mm, longitud de la sección de ensayo de 32 mm y radio de filete entre la sección de ensayo y el hombro de la probeta R igual a 5 mm.

La Figura N° 18 presenta de manera esquemática lo antes mencionado.

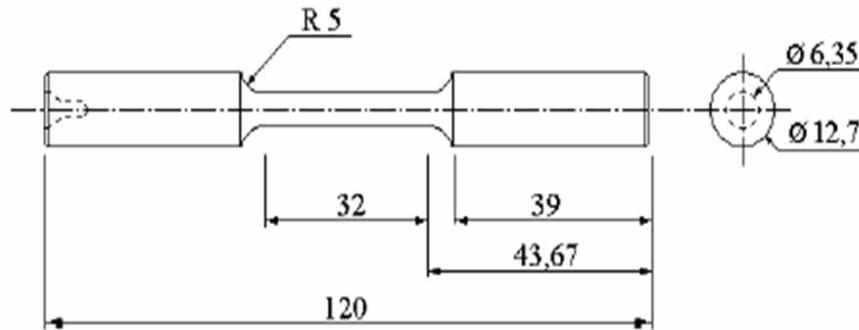


Figura N° 18, Esquema del dimensionamiento de las probetas de Tracción según la norma A 370

2.3.4.- Número mínimo de probetas

Se establece según las normas ASTM A 370 ^[12] que para poder reportar confiablemente las propiedades estáticas del aluminio obtenidas a partir de ensayos de tracción se necesita ensayar como mínimo 3 probetas. Además, se deben realizar todos los ensayos a una misma velocidad y ésta debe reportarse junto con dichas propiedades estáticas.

La determinación de la resistencia a la fatiga, se realizó de acuerdo a las recomendaciones sugeridas por la norma ASTM E 739 ^[14] la cual establece que, se necesita ensayar entre 12 a 24 probetas.

2.4.- ENSAYOS MECÁNICOS

2.4.1.- Ensayos de tracción

Los ensayos se llevaron a cabo en el Departamento de Mecánica de la Fundación Instituto de Ingeniería, usando la máquina de ensayos mecánicos marca SHIMADZU modelo AG-IS de 250 kN, donde el control y recolección de datos se realizó a través del software TRAPEZIUM II, el cual obtiene los datos de

alargamiento como de carga aplicada. Posee un cabezal móvil en la parte inferior y superior.

Antes de ser asegurada la probeta de manera vertical, fue medida con ayuda de un vernier digital la sección transversal, se aseguraron con las mordazas hidráulicas y con los cabezales cilíndricos. A medida que se llevó a cabo el ensayo la máquina fue proporcionando los datos de los valores obtenidos en carga/deformación, luego de ocurrida la fractura de la probeta se midió el diámetro final de la zona de falla.

Para metales como el aluminio y sus aleaciones, que presentan una transición elástico-plástica de forma gradual, el punto de fluencia debe ser determinado mediante la desviación inicial de la linealidad de la curva tensión-deformación; este punto se denomina límite proporcional, indicado en la Figura N° 19 como la letra P, esta posición no puede ser determinada de manera precisa. Por este motivo se ha establecido el método por la cual se traza una línea recta paralela a la línea de comportamiento elástico, desplazada por una deformación del 0,2%. La tensión correspondiente a la intersección de esta con el diagrama corresponde a la *resistencia a la fluencia del 0,2%* del metal como también se muestra en la curva de tracción típica de un metal que muestra una transición elástico-plástica de forma gradual ^[1], Figura N°19.

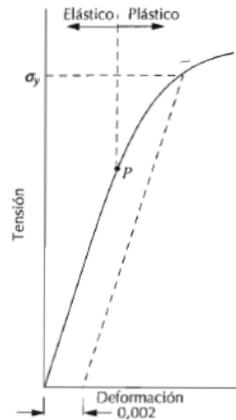


Figura N° 19, Curva de tracción típica de un metal que muestra una transición elástico-plástica de forma gradual

2.4.2.- Ensayos de fatiga al aire

Los ensayos de fatiga al aire se llevaron a cabo en la máquina de flexión rotativa Fatigue Dynamics, modelo RBF-200 que se puede observar en la Figura N° 20 las probetas fueron ensayadas a 50 Hz, donde los datos obtenidos fueron los números de ciclos de falla.

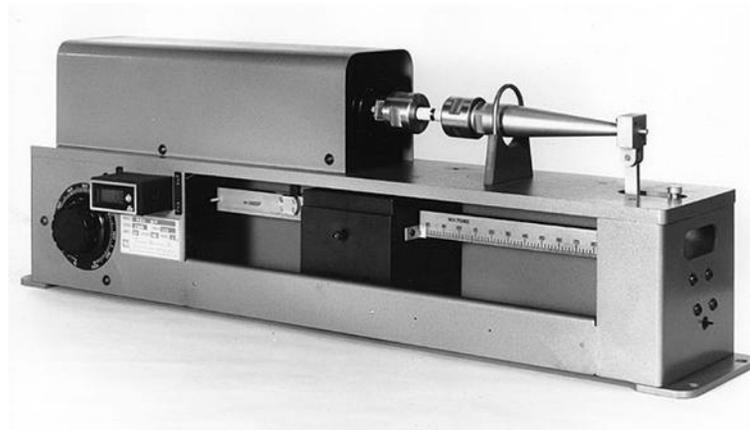


Figura N° 20, Máquina de fatiga; Fatigue Dynamics RBF-200

El montaje de las probetas se realizó acoplando la mordaza que está sujeta al eje del motor, una vez hecho esto a un lado de la máquina, se coloca la mordaza que

continúa con el eje cónico que se puede observar en la Figura N° 20, este eje se encuentra sujeto a la barra a la cual está el contrapeso móvil, que genera una fuerza en el extremo de este eje cónico, por lo tanto el sistema se encuentra en condiciones de flexión en voladizo sometida a ciclos de inversión completa. Esta máquina utiliza probetas de sección transversal cilíndrica que contiene una barra donde se coloca una masa que dependiendo de su ubicación ejerce un momento flector sobre toda la superficie de la probeta, aumentando a medida que aumenta el brazo desde el punto donde se ejerce la carga, en el caso de las probetas de radio continuo el esfuerzo mayor se concentra en el punto de menor radio como se muestra en la Figura N° 23, a diferencia de las probetas de sección transversal constante donde el esfuerzo aumenta linealmente como se muestra en la Figura N° 24, de manera similar ocurre con el momento flector, representándose en las Figuras N° 21 y N° 22 respectivamente.

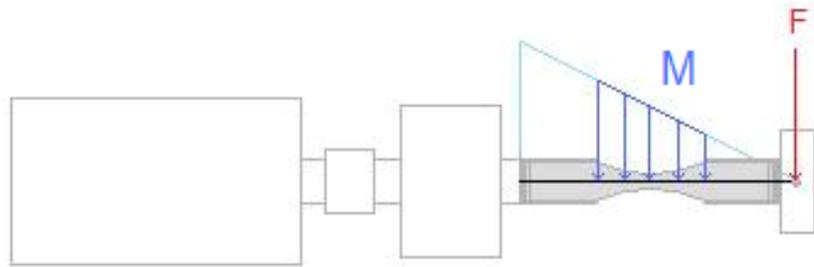


Figura N° 21. Representación Gráfica del Momento Flector ejercido en una Probeta de radio continuo

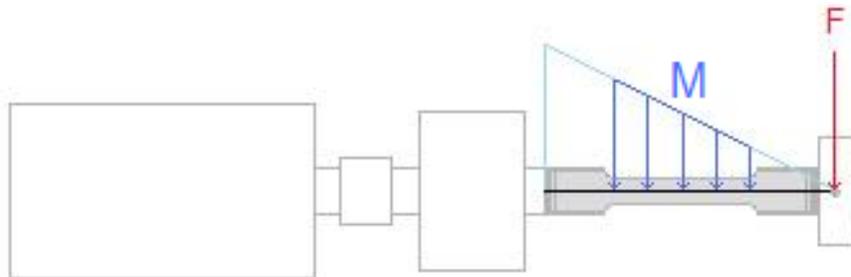


Figura N° 22. Representación Gráfica del Momento Flector ejercido en una Probeta de sección transversal constante

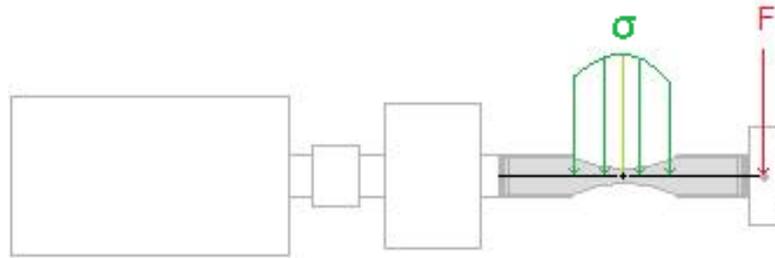


Figura N° 23. Representación Gráfica de la distribución de esfuerzo ejercida en una Probeta de radio continuo

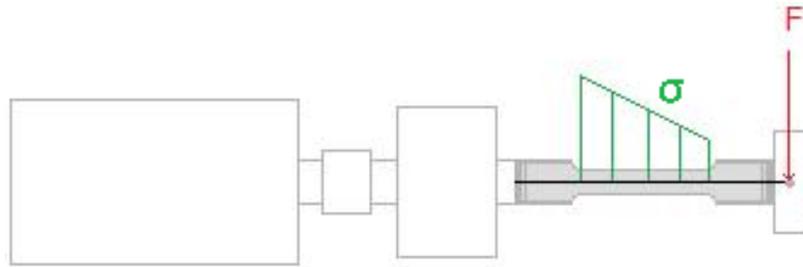


Figura N° 24. Representación Gráfica de la distribución de esfuerzo ejercida en una Probeta de sección transversal constante.

Para aplicar el momento flector responsable sobre las probetas de radio continuo, se debe calcular el momento por la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Mx C}{I} \quad (\text{E.39})$$

$$M = \frac{Sx I}{C} \quad (\text{E.40})$$

Donde:

M: Momento flector [Nm].

S: Esfuerzo aplicado [MPa].

I: Momento Polar del Inercia [mm^4].

C: Distancia entre el eje neutro de la carga hasta la superficie de la probeta en [mm].

Para una barra circular se tiene que:

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64} \quad (\text{E.41})$$

$$C = \frac{D}{2} \quad (\text{E.42})$$

Donde:

D: Diámetro de la probeta [mm].

Sustituyendo la ecuación N° 41 y la ecuación N° 42 en la ecuación N° 40, se obtiene la siguiente ecuación:

$$M = \left(\frac{Sx \left(\pi x \frac{D^4}{64} \right)}{\frac{D}{2}} \right) = \frac{Sx \pi x D^3}{32} \quad (\text{E.43})$$

Por lo tanto la ecuación para el momento flector será:

$$M = 11,0955 x S x D^3 \text{ [MPa} \times \text{mm}^3] \quad (\text{E.44})$$

Para estimar el valor de Esfuerzo Real en la zona calibrada de las probetas con defectos de colada de sección transversal constante, se realizó una relación de triángulos semejantes, según el porcentaje de esfuerzo que se haya en la zona media de la probeta de radio continuo como se mostró en la Figura N° 23, donde el esfuerzo mayor se concentra en el medio de probeta de radio continuo, a continuación se explica cómo se obtuvo el valor del esfuerzo real:

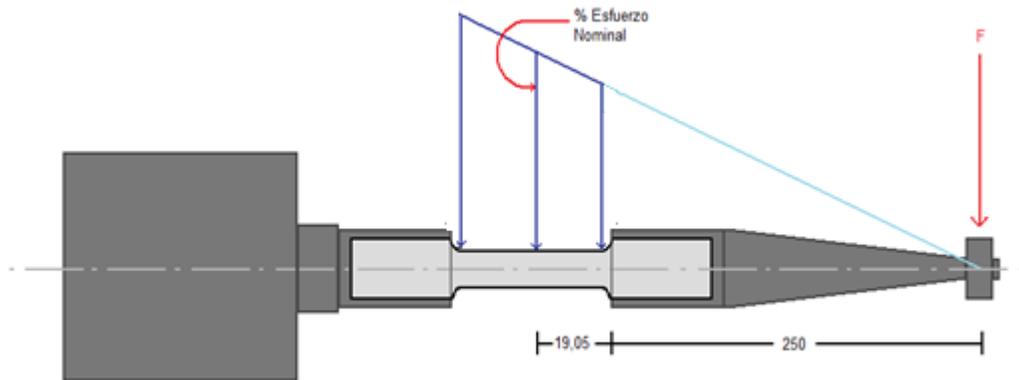


Figura N° 25. Representación gráfica del esfuerzo nominal de la probeta sección transversal constante

En el punto medio de la zona calibrada como se observa en la figura N° 25, es el punto donde se ejerce el Esfuerzo Nominal, que es para el punto el que se calcula el esfuerzo de la probetas utilizando los métodos aplicados en las probetas de radio continuo, a 19,05 mm desde el inicio de la zona calibrada el punto medio.

Por lo tanto según donde sea el lugar de la falla a lo largo de la zona calibrada de la probeta se obtendrá mayor o menor porcentaje de esfuerzo, como se muestra en la Figura N° 26.

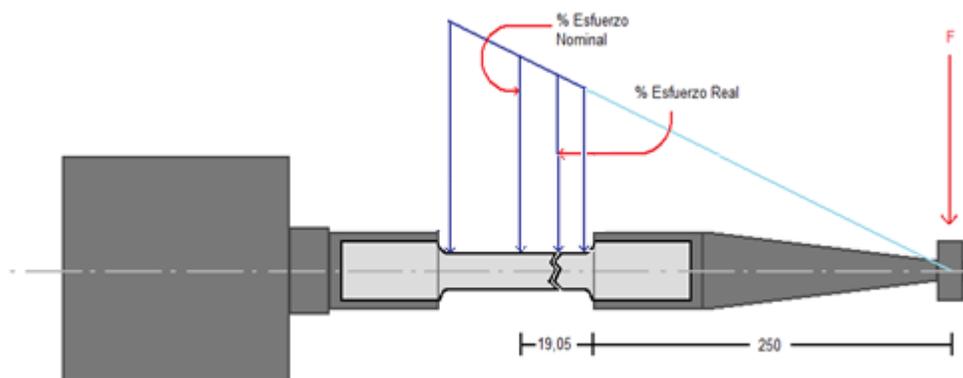


Figura N° 26, Representación gráfica del Esfuerzo Real y el Esfuerzo Nominal, en la probeta de sección transversal constante

El cálculo del Esfuerzo Real se lleva a cabo utilizando la relación de triángulos, uno de los catetos del triángulo es porcentaje (%) de Esfuerzo Nominal, que es la distancia vertical del triángulo, y la distancia horizontal es la Distancia Media, y se relaciona con la Distancia Real horizontal.

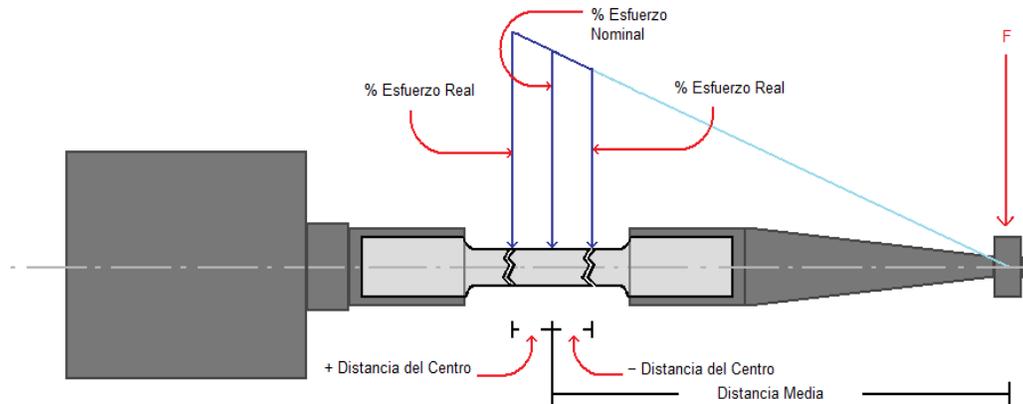


Figura N° 27. Representación gráfica de la relación de triángulos.

Para el cálculo del de la Distancia Real se sumaron los valores de la Distancia Media y Distancia del Centro, siendo este último valor negativo o positivo según su ubicación en la parte derecha o izquierda de la probeta evaluada.

Determinación de la Distancia Real:

$$Distancia Real = Distancia Media + (Distancia del Centro) \quad (E.45)$$

En la ecuación 46 se muestran los denominadores que son los catetos horizontales de la relación de triángulos, que son las Distancias las cuales se obtienen como se mostró anteriormente.

$$\frac{\% Esfuerzo Nominal}{Distancia Media} = \frac{\% Esfuerzo Real}{Distancia Real} \quad (E.46)$$

Donde la variable a hallar será en % Esfuerzo Real, entonces:

$$\% \text{ Esfuerzo Real} = \frac{\% \text{ Esfuerzo Nominal} \times \text{Distancia Real}}{\text{Distancia Media}} \quad (\text{E.47})$$

En la Tabla II.2 se muestran los rangos de porcentajes (%) de Esfuerzo Real en relación a los porcentajes (%) de Esfuerzo Nominal para los cuales fueron realizados los ensayos.

Tabla II. 2. *Rango de variación de porcentaje de esfuerzo*

% Esfuerzo Nominal	Rango de Valores de % de Esfuerzo Real
76,5	Desde 71,07%, hasta 81,92%
78,5	Desde 72,9%, hasta 84,1%
80	Desde 74,44%, hasta 85,66%
82,5	Desde 76,66%, hasta 88,34%

Se estudiaron 24 probetas de sección transversal constante bajo la sollicitud de esfuerzos los cuales impidieron obtener en escalones de esfuerzo debido a que fallaron en diferentes puntos de la zona calibrada, por esta condición para la generación de la curva *S-N* los valores se evaluaron en rangos de Esfuerzos Reales desde 75,86 MPa hasta 100,7 MPa estos se representaron a través de una nube de puntos y llevados a una recta a través del método mínimos cuadrados.

Fueron ensayadas 17 probetas con defecto de colada de radio continuo, en 4 escalones de esfuerzo, a los porcentajes de esfuerzo, a los cuales fueron evaluadas las muestras se realizaron en relación al esfuerzo de fluencia, es decir 100% es el esfuerzo de fluencia (σ_y). Los porcentajes de los escalones de esfuerzo son los siguientes 76,5%, 78,5%, 80% y 82,5%.

Para la curva de Fatiga Control del material sin defectos de colada se aplicó la distribución de Weibull con un porcentaje de confiabilidad de 90% para luego representar gráficamente mediante una curva *S-N* aplicando el modelo de Basquin.

Los datos serán representados en escala doble logarítmica, del esfuerzo logarítmico ($\log S$) contra el número de ciclos a la falla logarítmico ($\log N$), para el modelo de Basquin.

2.5.- ESTUDIO FRACTOGRÁFICO

2.5.1.- Estudio fractográfico: Microscopia Electrónica de Barrido

El estudio fractográfico fue realizado para observar la superficie de fractura de las probetas sometidas a fatiga y caracterizar los mecanismos de fallas que actuaron en las probetas escogidas, el estudio se llevo a cabo en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela (UCV), haciendo uso de la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).



Figura N° 28, Microscopia Electrónica de Barrido

Las muestras seleccionadas fueron cortadas con la máquina marca Buehler, modelo Isomet, la misma posee un disco de diamante para cortar con precisión las

muestras en la zona de fractura las cuales fueron utilizadas para colocarlas en el microscopio, luego fueron limpiadas con ultrasonido sumergiéndose en acetona, con el equipo marca Buehler, modelo Ultramte II, para ser colocadas en el MEB MARCA Hitachi, modelo S-2400 Figura N° 28. Fueron analizadas 5 muestras, de las cuales dos de ellas fueron ensayadas bajo el mismo esfuerzo, donde los valores de ciclaje fueron muy diferentes, otras dos muestras fueron seleccionadas bajo las mismas características, pero a otro nivel de esfuerzo y la quinta muestra fue observada debido a que presentó una zona de fractura peculiar.

2.5.2.- Estudio fractográfico: Macrografía a través Imágenes Estereográficas

Este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (UCV), la macrografía se realizó en las zonas de fractura con un lente de aumento y una cámara fotográfica digital marca Canon modelo Powershot A570 IS, con un aumento de 4x +12x, con un lente marca Opteka de aumento 4x y un lente 0.45x high definition, donde se observaron 24 de las 25 probetas de radio continuo y 17 de las 24 probetas de sección transversal constante con defectos de colada que fueron ensayadas, para evaluar la superficie de fractura en búsqueda de evidencias de algún defecto, o característica particular para analizar el comportamiento aleatorio de la fatiga de este material con defectos de colada.

2.5.3.- Microestructura de la aleación

La evaluación de la microestructura de la aleación AlSi10 se realiza en el laboratorio de control de calidad de la empresa Sermamet, Mariara. Las muestras son producidas por la empresa, usando los métodos de manufactura con los que producen la aleación que será usada en rines, se realiza un corte transversal, luego las muestras son desbastadas, pulidas, posteriormente atacadas con ácido fluorhídrico, con el fin de evidenciar si la modificación de la microestructura se está llevando a cabo, de

estructuras angulares de Silicio (Si) luego de la adición de Sodio (Na), a estructuras globulares. A continuación se muestra la Figura N° 24, en donde se ve claramente la modificación de la microestructura del material.

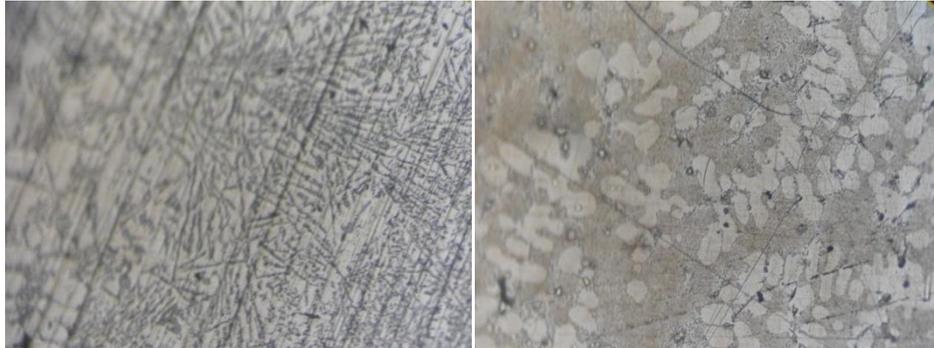


Figura N° 29.a) Del lado izquierdo se observa la microestructura de la aleación AlSi10 sin modificación, b) Del lado derecho se observa la microestructura de la aleación AlSi10 modificado

2.6.- ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

Luego de ser observadas las probetas serán divididas en tres grupos “A”, “B”, “C”, según el tamaño del defecto que pudo revelar el método de imágenes estereográficas, según la evidencia dejada en la zona de fractura, las probetas clasificadas en el grupo “A” incluirán aquellas en las que no se observaron defectos hasta probetas que evidenciaron un defecto de hasta un 0,05%, las probetas clasificadas en el grupo “B” serán aquellas en las que se observaron defectos mayores de 0,05% hasta un porcentaje de 0,45%, las probetas clasificadas como grupo “C” se tomarán las que poseen un porcentaje de defecto mayor de 0,45%, de la superficie de fractura. El porcentaje que se menciona anteriormente está relacionado con el área transversal total de la probeta en la zona de fractura; de manera análoga se realizó la clasificación para las probetas con defectos de colada de sección transversal constante.

En la Tabla Comparativa de Clasificación mediante imágenes estereográficas, Tabla II.3, se presentan los porcentajes de las áreas y los radios de la semicircunferencia considerando el defecto como una muesca.

Tabla II. 3. Tabla comparativa de Clasificación mediante imágenes estereográficas

Tipo de Clasificación.	Porcentaje (%) con respecto al área total.	Área [mm ²], aprox.	Radio aproximado, semiesfera [mm].
A	[0 , 0,05]	[0 , 0,06334.]	[0 , 0,2008]
B	(0,05 , 0,45]	(0,06334 , 0,57]	(0,2008 , 0,6024]
C	(0,45 , +∞)	(0,57 , +∞)	(0,6024 , +∞)

Haciendo uso de la clasificación anterior, se graficarán las curvas *S-N* en escala doble logarítmica.

La clasificación que se realizará en este trabajo solo utilizará como parámetros el área del poro y su ubicación, los defectos tomarán en cuenta son los que se encontrarán cerca de la superficie de las muestras, por lo general ubicadas cerca o en el área de la nucleación de las probetas, ya que estos dos factores son importantes aceleradores de la nucleación de la grieta ^[15]. Mientras que otros factores que afectan la vida a la fatiga no serán tomados en cuenta como por ejemplo; la morfología del defecto o amplitud de esfuerzo.

En el estudio de YI, J.M y colaboradores tampoco se tomó en cuenta la forma del defecto que propició en inicio de la grieta, pero fue simulado el posible efecto de la forma en los esfuerzos efectivos, como se muestra en la Figura N° 30, donde el esfuerzo es multiplicado por varias veces su valor nominal lo que podría generar según sea la forma, una deformación plástica, que como consecuencia tendrá el inicio de la grieta en etapas tempranas de las cargas cíclicas, donde la vida a la fatiga será dominada por la propagación de la grieta.

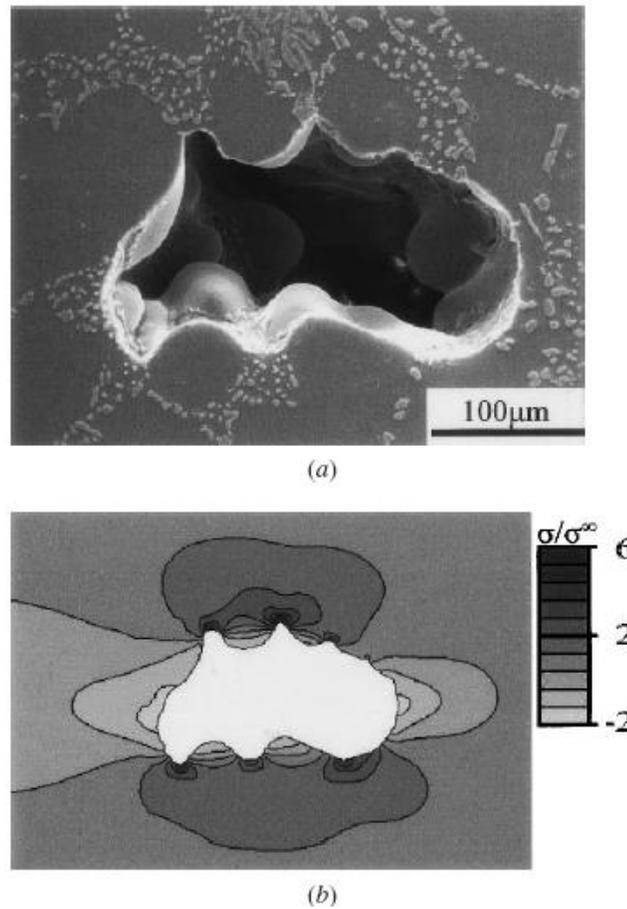


Figura N° 30, Esfuerzo efectivo, según el área de la probeta ^[15]

2.6.1.- Coeficiente de Correlación de Pearson

De cada una de las muestras de sección transversal constante observadas en la Macrografía, se evaluó el número de ciclos a la falla, el área aproximada del defecto en la superficie de fractura, y el esfuerzo real al cual estuvieron sometidas las probetas. Con estos valores se procedió, a realizar el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. Donde se calculó la media, la varianza, para poder hacer la correlación.

Este coeficiente de correlación de Pearson fue estimado para comparar la correlación lineal que tienen las variables de Esfuerzo contra Ciclos a la falla, y área

del Defecto contra Ciclos a la falla, para evaluar la influencia del esfuerzo y el tamaño del defecto en la vida a la fatiga del material de estudio.

CAPÍTULO III**ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS****3.1.- COMPOSICIÓN QUÍMICA**

En principio se procedió a estimar la composición química del material partiendo del método conocido como Espectrometría de Absorción Atómica de llama^[16], según la norma ASTM E663. Este ensayo se llevó a cabo con el equipo “Espectrofotómetro de absorción atómica de llama” marca Perkin Elmer, Modelo AAnalyst 300.

Se muestra en la tabla de Análisis Químico de la Aleación AlSi10, Tabla III.1, especificando el elemento presente, el método de ensayo utilizado y el porcentaje en peso en que está contenido dicho elemento en la aleación.

Tabla III. 1, Análisis Químico de la Aleación AlSi10

Elementos	Método de ensayo	Porcentaje en peso (%W) ± S
Si	I	10,79 ± 0,39
Mg	I	0,08 ± 0,01
Ti	II	0,08 ± 0,01
Cu	I	0,46 ± 0,01
Na	I	0,17 ± 0,00

En comparación con la Composición Química entregada por la empresa que suministró el material mostrada en la tabla de Composición Química suministrada por la empresa, Tabla II.1, se observaron discrepancias fuera de la desviación estándar en cuanto al Sodio. Esto podría atribuirse al tiempo de exposición del sodio en la aleación antes de realizarse la colada. La aleación Aluminio-Silicio contiene un porcentaje en peso de 10,79% ± 0,39, por lo que se clasificó como una aleación de tipo Eutéctica, utilizada mundialmente para la elaboración de rines.

3.2.- ENSAYOS DE TRACCIÓN

Se realizaron los ensayos de tracción de tres muestras, sin saber si estas contenían defectos, según la norma ASTM A370 ^[12] para hallar las propiedades estáticas de la aleación. Estos ensayos son representados gráficamente en la figura de Ensayos de Tracción, Figura N° 31.

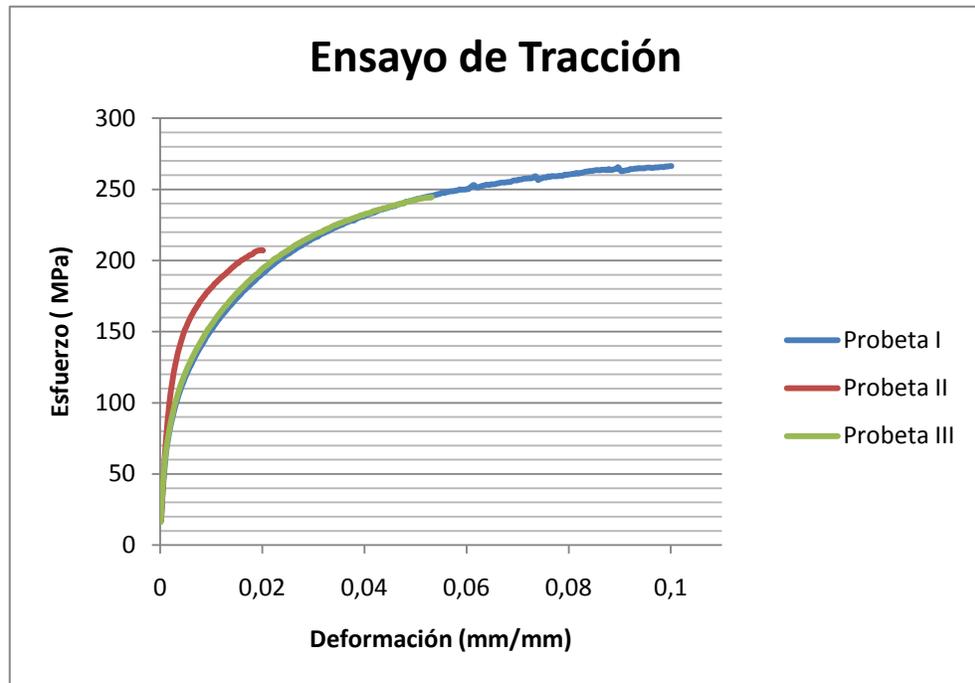


Figura N° 31, Ensayos de Tracción

Los resultados de estos ensayos se muestran en la Tabla III. 2, junto con el valor promedio obtenidos del esfuerzo de fluencia, así como el valor de la reducción de área.

Tabla III. 2, Resultados de los ensayos de tracción

	Esfuerzo de Fluencia (σ_y)	Esfuerzo Último Ut	Porcentaje de reducción de área	Porcentaje de elongación.
Aleación Al-10%Si	117,67MPa	239,43 MPa	7,54%	5,84%

El promedio de los Esfuerzos de Fluencia σ_y fue de 117,67 MPa, obteniendo dos resultados muy similares de 107 MPa y 105 MPa, a diferencia del tercer resultado que fue de 141MPa. Esta es la práctica común, pero en este caso no es un resultado muy alentador ya que la presencia de defectos podría modificar la curva de tracción de manera que el mismo material se comporte de manera diferente para cada muestra ensayada.

El aumento de la dispersión en los valores de Esfuerzos de Fluencia puede atribuirse a la presencia de defectos de colada, los que ocasionan concentradores de esfuerzos. Como se explicó en el Capítulo I, toda grieta o imperfección limita la capacidad de un material para resistir un esfuerzo a la tensión, ya que esta amplifica y concentra el esfuerzo aplicado. El esfuerzo real (σ_{real}) ejercido en la punta de una grieta se ve incrementado y cuando este se hace mayor a la resistencia a la cedencia, la grieta crece hasta causar la falla.

Como era de esperarse, los defectos de colada podrían producir diferencias notables en cuanto al porcentaje de elongación, donde para la probeta II el porcentaje de elongación fue aproximadamente 2%, mientras que para las otras dos muestras fue de 5,5 % y 10 % respectivamente.

Los valores de Esfuerzo Último a la Tracción de los especímenes ensayados arrojaron resultados diferentes, siendo de 206,3 MPa; 245 MPa y 267 MPa. Esto puede atribuirse a que si “existen fallas o inclusiones nocivas, la barra no alcanzará el mismo esfuerzo máximo de un material de alta calidad”^[19]. Por lo tanto se ratificó la presencia de defectos en el material.

3.3.- OBTENCIÓN DE LAS CURVAS S-N DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO 10% SILICIO

A continuación se presentaran las curvas S-N generadas a partir de probetas de diferentes geometrías de la aleación de aluminio 10% Silicio, comercialmente conocida como AlSi10.

3.3.1.- Curva S-N generada a partir de probetas de radio continuo

En la Tabla de Ensayos de fatiga al aire de la Aleación de Aluminio al 10% de Silicio, Tabla III.3, se presentan los resultados experimentales obtenidos de Fatiga al aire, ensayando probetas de geometría de radio continuo. En estas tablas se especifica el diámetro de cada espécimen, momento flector, esfuerzo al cual fueron solicitadas, ciclos a falla, promedio de dichos ciclos a la falla y por último también se incluye la desviación estándar en cada nivel de esfuerzo

Tabla III. 3, Ensayos de Fatiga al Aire de la Aleación de Aluminio al 10 % de Silicio

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA AL AIRE DE LA ALEACIÓN AISI10 CON PROBETAS DE RADIO CONTINUO									
Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa) 76,5%	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa) 78,5%	Ciclos a falla (Nf)
1	6.70	23.5	90	328,900	4	6.53	22.2	92	1,030,700
2	6.38	20.3		94,200	5	6.18	18.9		1,441,500
3	6.78	24.3		484600	6	6.46	21.5		882,100
					7	6.05	17.7		256,000
					8	6.53	22.2		1,432,900
Promedio				302,567	Promedio				1,008,640
Desviación estándar				196,528	Desviación estándar				487,424
Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa) 80%	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa) 82,5%	Ciclos a falla (Nf)
9	6.49	22.3	94	107,000	14	6.24	20.5	97	361,100
10	6.32	20.6		392,300	15	6.51	23.3		383,000
11	6.09	18.5		490,000	16	6.68	25.2		167,800
12	6.42	21.6		1222600	17	6.39	22.1		80,100
13	6.5	22.4	410,400	18	6.36	21.8	719,000		
Promedio				524,460	Promedio				342,200
Desviación estándar				416,334	Desviación estándar				246,532
Nº de Probeta	Diámetro	Momento	Esfuerzo (MPa) 91%	Ciclos a falla (Nf)					
8	6.13	21.5	107.2	141,200					
9	6.48	25.4		692400					
10	6.45	25.0		209500					
11	6.35	23.9		226600					
12	6.29	23.2	519,800						
Promedio				357,900					
Desviación estándar				236,814					

Se observó una amplia y no congruente desviación estandar que se obtuvieron en todos y cada uno los niveles de esfuerzos a los que fueron solicitados los especímenes, como era de esperarse en estas muestras con defectos de colada, ya que lo esperado en los ensayos de fatiga al aire es obtener una desviación estandar que aumenta a medida de que el esfuerzo solicitado disminuye. Esto se debe a la porosidades existentes en las muestras, ya que la variabilidad en los tamaños de los poros responsables de la nucleación de la grieta tendrá inevitablemente influencia significativa en la dispersión^[15].

A pesar de que los datos obtenidos son los que se encuentran en la Tabla III.3, Ensayos de Fatiga al Aire de la Aleación de Aluminio al 10 % de Silicio, debemos tomar en cuenta que 17 especímenes no fallaron, por lo que no pudieron ser considerados para la construcción de la curva pero de igual manera fueron tomados en cuenta para sustentar la diferencia de comportamiento a la fatiga de las probetas bajo la solicitud de un mismo esfuerzo. Es por ello que al solicitar los especímenes a 90 MPa, no se pudo concretar los 5 valores de ciclaje.

Para construir la Curva *S-N* de radio continuo no discretizada, Figura N°33, fue necesario realizar una regresión lineal, luego de haber analizado cada nivel de esfuerzo mediante el método estadístico propuesto por Weibull, tomando en cuenta los parámetros de alfa (α), beta (β) y gamma (γ).

A continuación se presenta la tabla de Resultados de la Distribución de Weibull para los ensayos de fatiga al aire de probetas de radio continuo de la aleación de Aluminio al 10% de Silicio, Tabla III. 4, que especifica la vida media con un 90% de confiabilidad, el tipo de distribución utilizado y los valores de los parámetros α , β y γ para cada nivel de esfuerzo.

Tabla III. 4, Resultados de la Distribución de Weibull para los ensayos de fatiga al aire de probetas de radio continuo de la aleación de Aluminio al 10% de Silicio.

Esfuerzo [MPa]	Vida Media	Distribución Empleada	α	β	γ
90	349310	Weibull 2 Parámetros	367240	1.1522	-
92	1062100	Weibull 2 Parámetros	1182100	1.5656	-
94	552070	Weibull 2 Parámetros	593020	1.2526	-
97	368690	Weibull 2 Parámetros	395300	1.2424	-
107.2	433760	Weibull 3 Parámetros	246430	0.71	125960

A partir de tabla de Resultados de la Distribución de Weibull para los ensayos de fatiga al aire de probetas de radio continuo de la aleación de Aluminio al 10% de Silicio, Tabla III. 4, se graficó la Función de Densidad de Probabilidad de los cinco (5) niveles de Esfuerzos solapados, quedando de la siguiente manera:

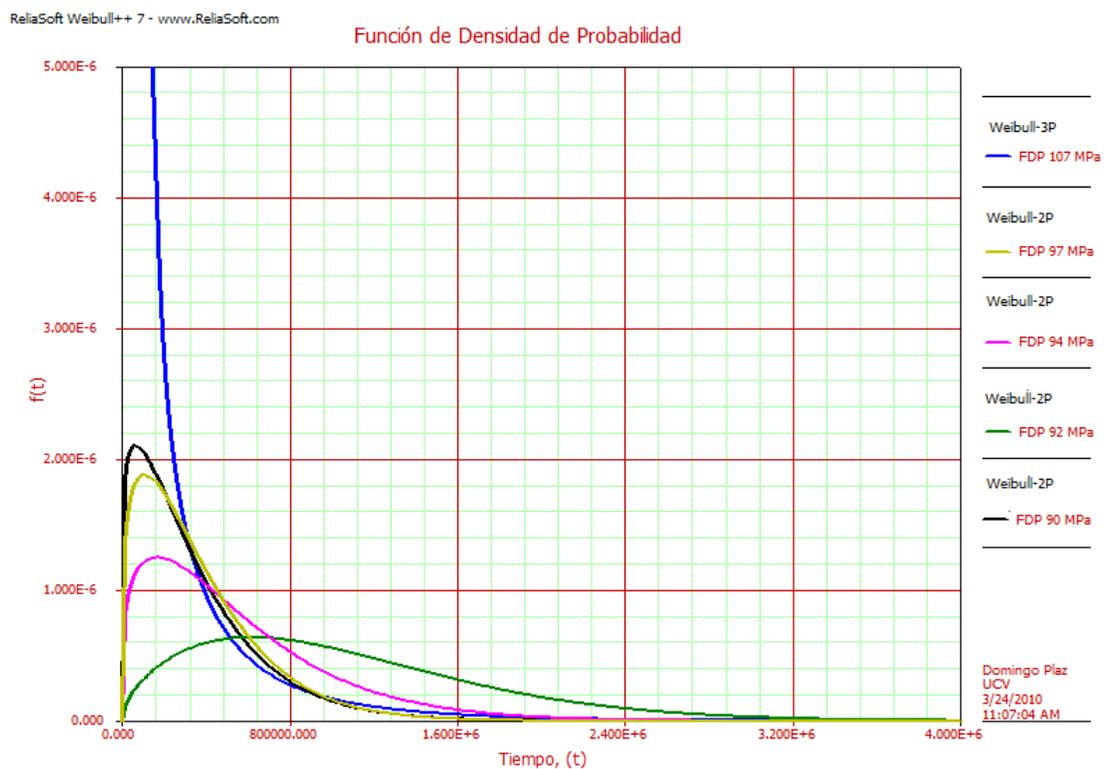


Figura N° 32, Gráfico de la Función de Densidad de Probabilidad

Teniendo en cuenta los valores de vida media de cada nivel de esfuerzo, se construyó la curva $S-N$ a través del modelo propuesto por Weibull que se muestra en la Figura N° 33.

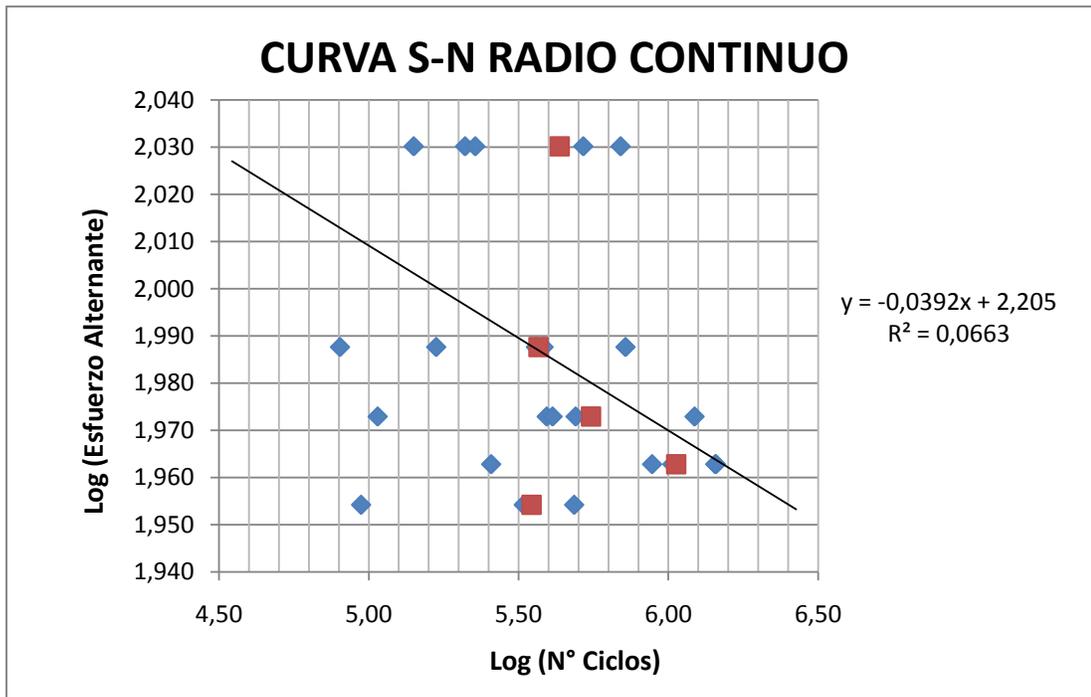


Figura N° 33, Curva S-N de radio continuo no discretizada

La influencia de los defectos de colada en las muestras de radio continuo (RC) puede ser tal que los resultados obtenidos contienen una dispersión para un mismo nivel de esfuerzo muy amplia; por ejemplo, algunas probetas nunca fallaron luego de $1 \cdot 10^7$ ciclos de ensayo, cuando las mismas eran ensayadas al 80% del S_Y , a sí mismo, algunas probetas fallaron luego de $1 \cdot 10^4$ ciclos de ensayos, cuando las mismas eran ensayadas al 76,5% del S_Y .

El factor de correlación R^2 expresa el ajuste de la curva respecto a los datos obtenidos, es decir, mientras este resultado sea cercano a la unidad, existe un buen ajuste de la curva. Para este caso este factor es 0,0663; lo que indica que la curva no se ajusta a los datos dando a conocer que los datos no se comportan de manera lineal, como es de esperarse en la práctica común de un ensayo de fatiga.

3.3.2.- Curva *S-N* generada a partir de probetas de sección transversal constante

A continuación se procedió a estimar una curva *S-N* del material suministrado, cambiando la geometría de las probetas a unas de sección transversal constante, ya que con éstas se aumentó la probabilidad de existencia de defectos aumentando la zona de ensayo. Con ésta se pudo obtener una mayor cantidad de probetas ensayadas exitosamente a esfuerzos bajos.

Estos resultados siguen arrojando una alta dispersión entre los datos debido a la magnitud del defecto y la probabilidad de existencia de los mismos en cada muestra.

Por la naturaleza de la variación de momento según el punto donde fracturó cada espécimen, el modelo utilizado para la generación de la curva *S-N* fue un gráfico de dispersión, obteniendo así una nube de puntos, que por el método de mínimos cuadrados se arrojó la mejor recta de tendencia.

A continuación se muestra una tabla que contiene el porcentaje de esfuerzo real al cual falló cada probeta, incluyendo el diámetro y ciclos a falla:

Tabla III. 5, Resultados de los Ensayos de Fatiga al Aire de la Aleación AlSi10 con probetas de sección transversal constante

Nº de Probeta	Diámetro	Esfuerzo Nominal (Mpa)	Esfuerzo Real (MPa)	Ciclos a falla (Nf)	Nº de Probeta	Diámetro	Esfuerzo Nominal (Mpa)	Esfuerzo Real (MPa)	Ciclos a falla (Nf)
1	6.25	78.84	75.8	2048800	13	6.17	86.4	90.6	75500
2	6.42	86.4	80.3	166100	14	6.20	86.4	91.5	1455100
3	6.12	86.4	80.8	130900	15	6.22	91.8	91.8	490100
4	6.25	84.24	84.2	824400	16	6.48	89.64	92.2	613400
5	6.37	84.24	84.2	18800	17	6.22	91.8	93.6	448700
6	6.30	84.24	84.2	955900	18	6.25	91.8	93.8	392700
7	6.49	86.4	86.4	689500	19	6.06	93.96	94.0	484600
8	6.50	89.64	89.6	280700	20	6.20	91.8	95.0	456400
9	6.18	89.64	89.6	675300	21	6.25	97.2	97.2	912700
10	6.18	89.64	89.6	726800	22	6.27	97.2	97.2	146000
11	6.20	84.24	90.2	308300	23	6.17	91.8	98.2	389900
12	6.19	91.8	90.4	78900	24	6.20	93.96	100.6	1176200

Partiendo de los datos obtenidos en la tabla de resultados de los ensayos de fatiga al aire de la aleación AlSi10 con probetas de sección transversal constante, se procedió a generar la curva *S-N* a partir de probetas de geometría de la zona calibrada de sección transversal constante.

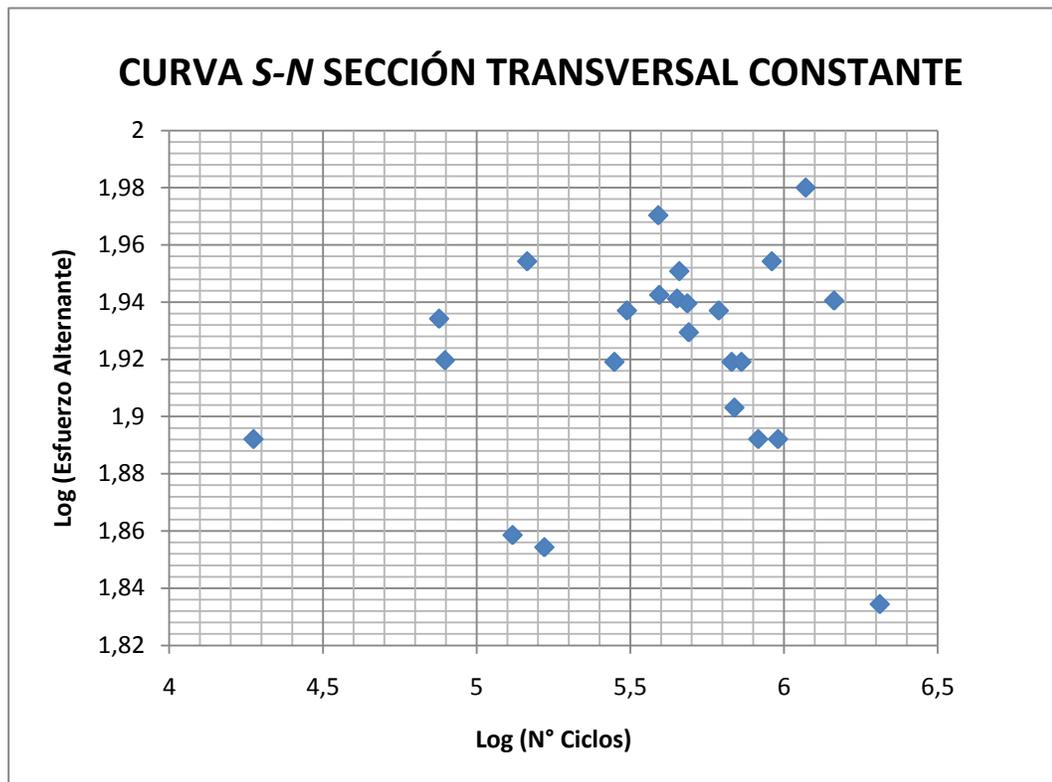


Figura N° 34, curva S-N a partir de probetas de geometría de la zona calibrada de sección transversal constante.

Por las características geométricas de las probetas de sección transversal constante, la probabilidad de existencia de defectos de colada aumenta significativamente, por lo tanto no se obtuvo una curva S-N característica de la vida a la fatiga con los valores encontrados. Esta aleatoriedad aumentó más aún con valores críticos como fue la probeta N° 5 que falló a 18.800 ciclos.

En ocasiones las probetas fracturaron en la zona de menor momento aplicado, lo que dejó en evidencia que el defecto prevalece sobre el momento flector como por ejemplo en la probeta de sección transversal constante N° 2 fue evaluada bajo la sollicitud de una carga nominal de 86,4 MPa, y como se explicó en el capítulo anterior, la parte izquierda de la probeta se encontraba bajo la acción de un esfuerzo de 92,5 MPa, sin embargo, esta falló en donde el esfuerzo se hace menor, en este caso

de 80,3 MPa. Es notable la diferencia de ciclaje a la fractura de esta con respecto a las de solicitadas a mayor esfuerzo. Este fenómeno ocurrió con las probetas N° 1, 3 y 12.

3.4.- ANÁLISIS FRACTOGRÁFICO DE LOS ESPECÍMENES ENSAYADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos del estudio fractográfico, realizado partiendo de dos técnicas fundamentales:

- a) Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) a cinco (5) muestras de radio continuo
- b) Macrografía a través del estudio de imágenes Estereográficas que se realizó a veinticuatro (24) muestras de radio continuo y diecisiete (17) de sección transversal constante.

3.4.1.- Análisis fractográfico mediante Microscopía Electrónica de Barrido

Las probetas fueron seleccionadas en virtud de atender la necesidad de conocer la existencia de una causa estructural en el material a nivel de micro-escala y meso-escala que fuese responsable del aumento de la dispersión de los datos para un mismo nivel de esfuerzo.

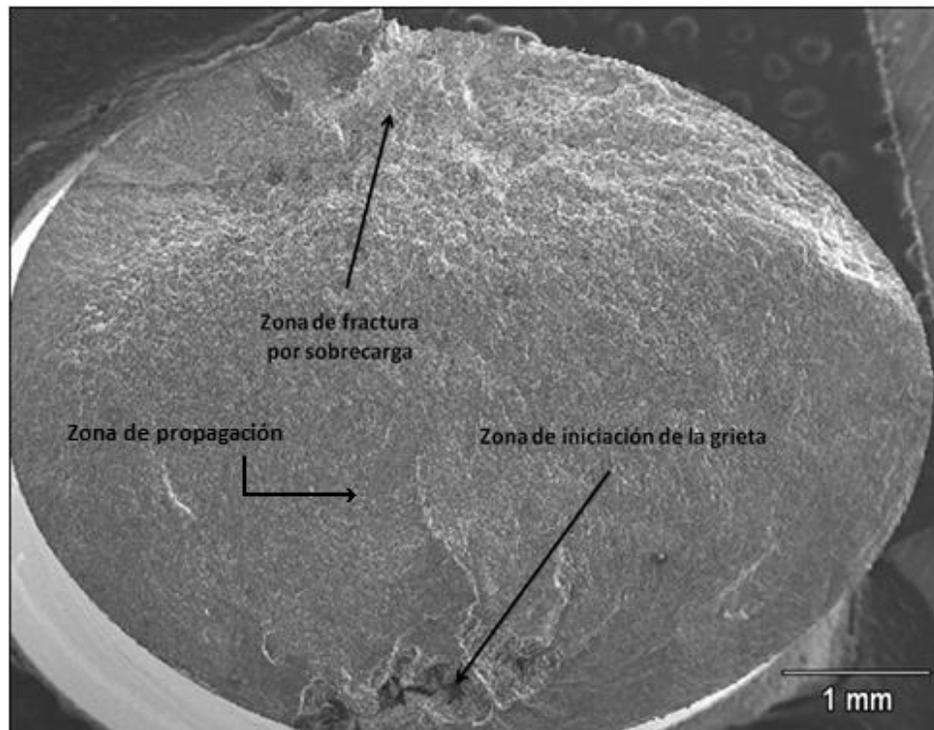


Figura N° 35, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, sometida a un esfuerzo alternante de 92 MPa la cual falló a 256.000 ciclos.

En la Figura N°35, se muestra una superficie típica de fatiga, en donde existe una zona de inicio en donde se muestran marcas radiales que convergen en un punto, lo que sugiere un posible punto de nucleación de la grieta. Luego se observa una zona de propagación estable de la grieta, de superficie relativamente liza para luego alcanzar la zona de despegue, caracterizada por tener una superficie rugosa causada por las microcavidades o microhoyuelos por efecto del fenómeno de inestabilidad plástica.

En la Figura N° 36, se evidencia que el punto de nucleación está asociado a la presencia de una estructura segregada, característica de un proceso inadecuado de solidificación. Esta estructura puede concentrar esfuerzos de manera importante al ser una heterogeneidad química muy grande, se encuentran interfases incoherentes entre la zona segregada y la matriz lo que sugiere una zona muy débil en la cual rápidamente se va a nuclear una grieta y se va a propagar, lo que trae como resultado

un evento de falla prematuro, que no corresponde a los resultados que se esperarían para ese nivel de esfuerzo en esta aleación.

Cuando dos frentes de crecimiento de solidificación avanzan, en las intercaras el sólido segrega soluto al líquido que no ha solidificado, incrementando la concentración de soluto en este. Cuando estos frentes se acercan, la última porción de líquido que solidifica será una solución sólida sobresaturada y este exceso de soluto tiende a precipitar fases secundarias de manera muy densa en esa región, generando interfases incoherentes entre estos precipitados segregados y la matriz que ha solidificado inicialmente.

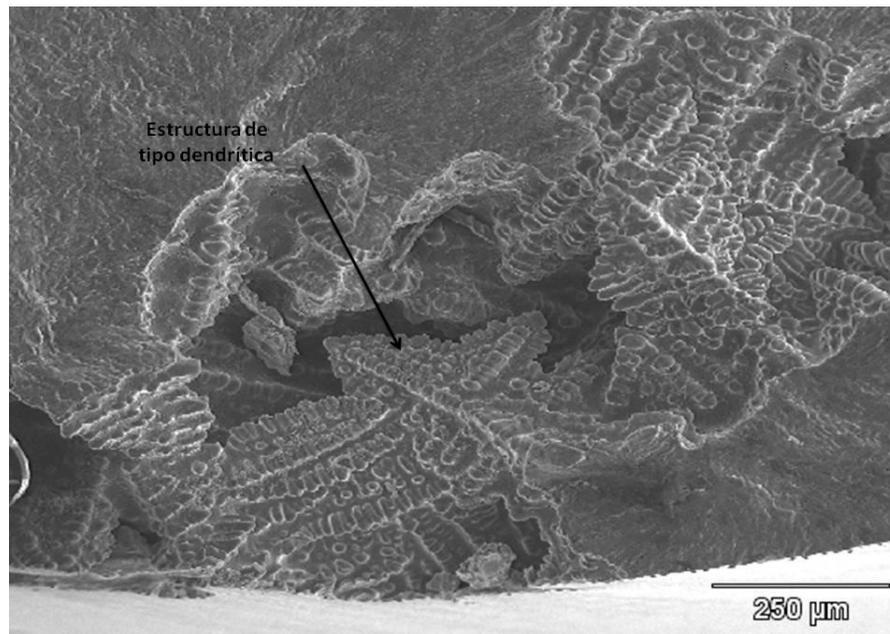


Figura N° 36, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 92 MPa, la cual falló a 256.000 ciclos donde se puede observar una estructura segregada o de tipo dendrítica

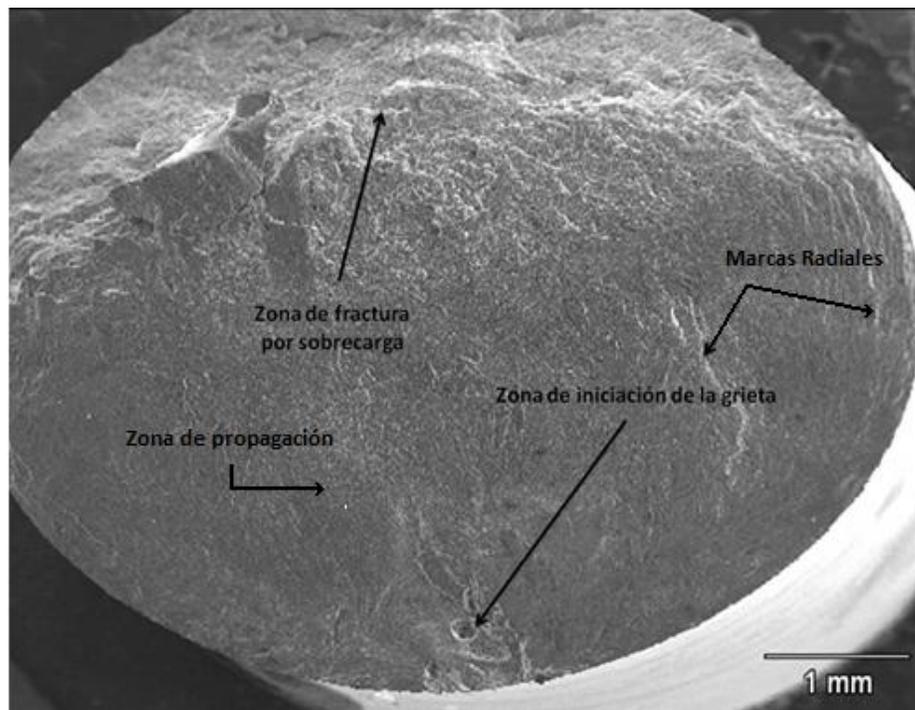


Figura N° 37, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 92 MPa, la cual falló a 1.432.900 ciclos

En la superficie de fractura de la Figura N° 37, se apreció una morfología característica, tal como se discutió en el espécimen anterior. Sin embargo, al observar la zona de iniciación de la grieta con un mayor aumento, como se muestra en la Figura N° 38, se evidencia la presencia de porosidades, haciendo que esta se vuelva una superficie irregular, lo que puede tener como consecuencia una disminución en el tiempo de nucleación de la grieta, debido al incremento del esfuerzo efectivo localizado. Por las características de este poro se constituye en un importante concentrador de esfuerzo.

Realizando una comparación entre esta y la muestra de la Figura N° 35, las cuales fueron ensayadas bajo el mismo nivel de esfuerzo, se evidencia una diferencia bastante importante entre el número de ciclos a la falla. Esto podría ser debido a la reducción de las propiedades mecánicas del material cuando éste presenta una zona de estructura segregada o dendrítica, lo que podría concentrar el esfuerzo de forma

más severa, siendo mucho mayor la etapa de propagación de la grieta respecto de la etapa de nucleación de la misma.

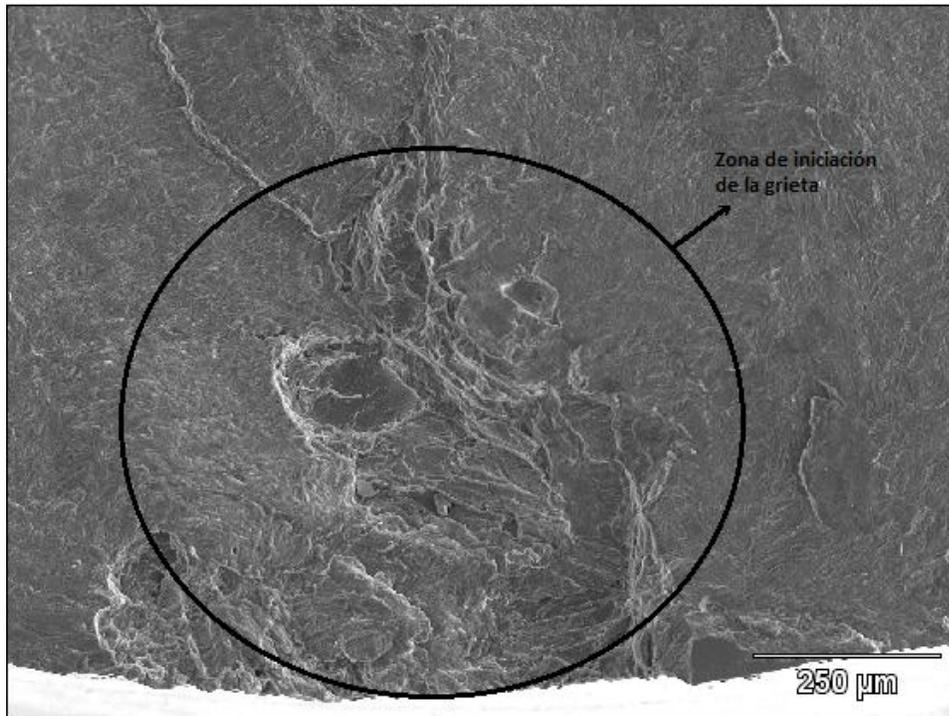


Figura N° 38, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 92 MPa, la cual falló a 1.432.900 ciclos

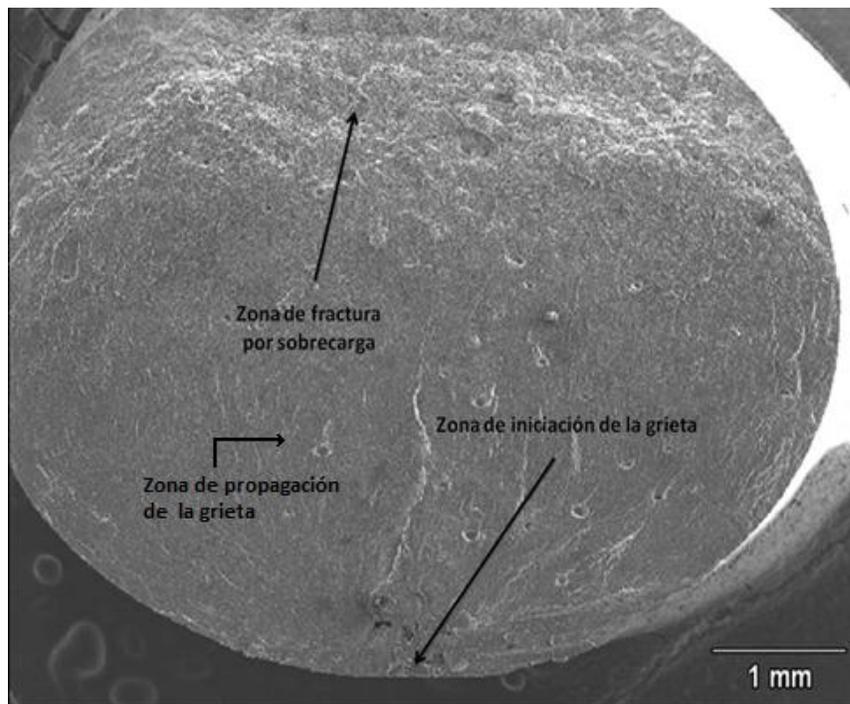


Figura N° 39, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 719.000 ciclos

En la foto-micrografía de la Figura N° 39, se observa de manera análoga a las superficies de fractura analizadas anteriormente, que existe una zona de iniciación, una de propagación y por último una zona de despegue. También se observaron “porosidades” a lo largo de toda la superficie.

Cuando se magnifica la imagen de la zona en la cual pareciera haber iniciado la grieta por fatiga, Figura N° 40, se encontraron varias regiones de tipo porosas, lo cual apunta que la grieta se nucleó en las interfases de estos poros y luego se propagó hasta fracturar por completo.

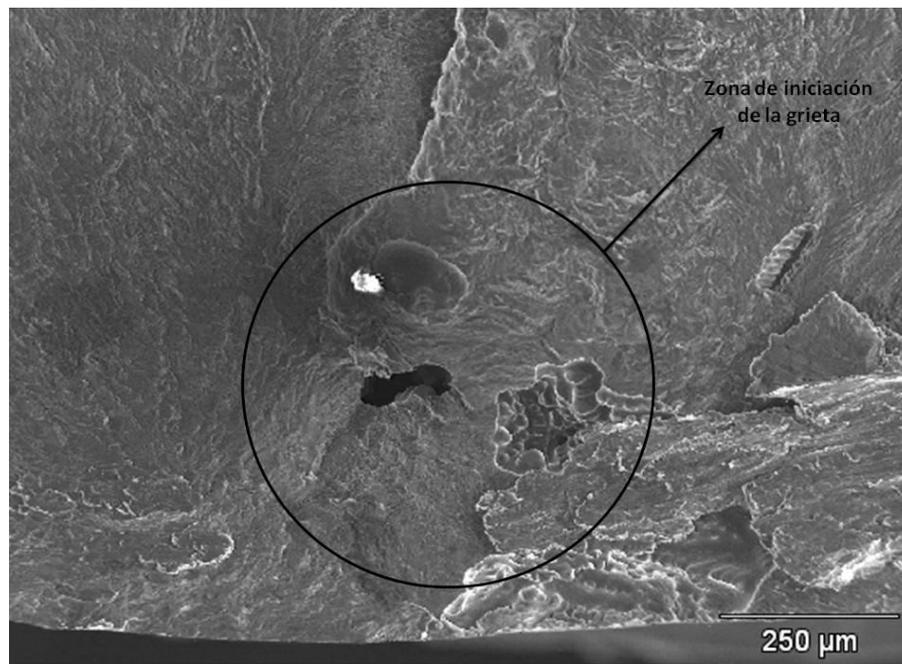


Figura N° 40, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 719.000 ciclos, donde se observan burbujas

Si se realiza un aumento de las “porosidades” existentes en toda la superficie de fractura, como se muestra en la Figura N° 41, se evidencian pequeñas burbujas que podrían atribuirse a una desgasificación defectuosa del material. Además observa que algunas grietas atraviesan dichas burbujas que, aunque pareciera que no son las causantes de la nucleación de grietas por fatiga, si pudiesen influir en la propagación de las mismas, así como un aumento en la magnitud del esfuerzo debido a la disminución del área del material en presencia de estas burbujas.

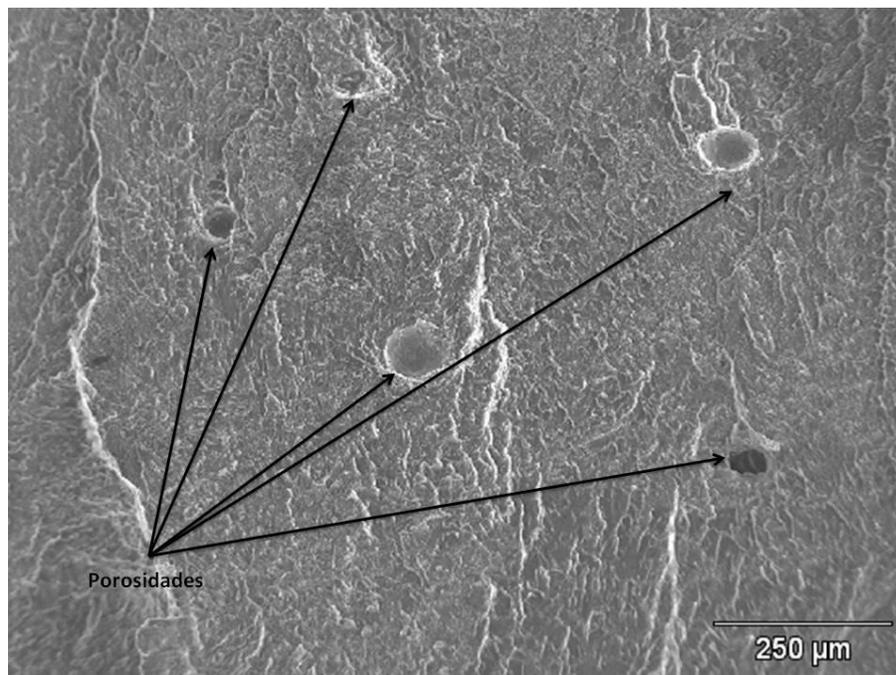


Figura N° 41, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 719.000 ciclos, donde se observan burbujas

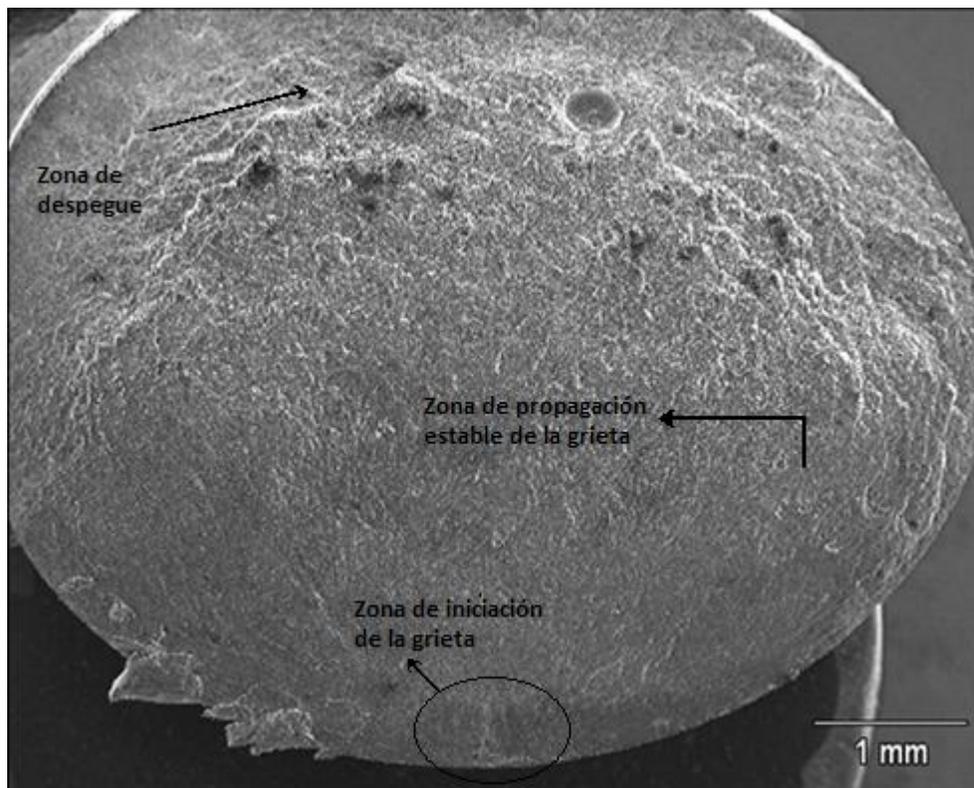


Figura N° 42, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 383.000 ciclos

La micro-fotografía de la Figura N° 41 representa una superficie de fractura característica de la falla por fatiga que contiene sus tres etapas bien definidas al igual que las anteriores. La posible zona de iniciación de la grieta se muestra por las marcas radiales que convergen en el punto inferior de la fotografía y para este acercamiento no se observó ningún defecto en dicha zona.

Haciendo un aumento a la zona de la posible nucleación de la grieta, como se muestra en la Figura N° 43, se observa una porosidad muy cercana a la superficie del espécimen, a lo que pudiera atribuirse la corta vida a la fatiga de este respecto de la muestra analizada en la Figura N° 39. Ambas fueron ensayadas bajo una misma solitud de carga.

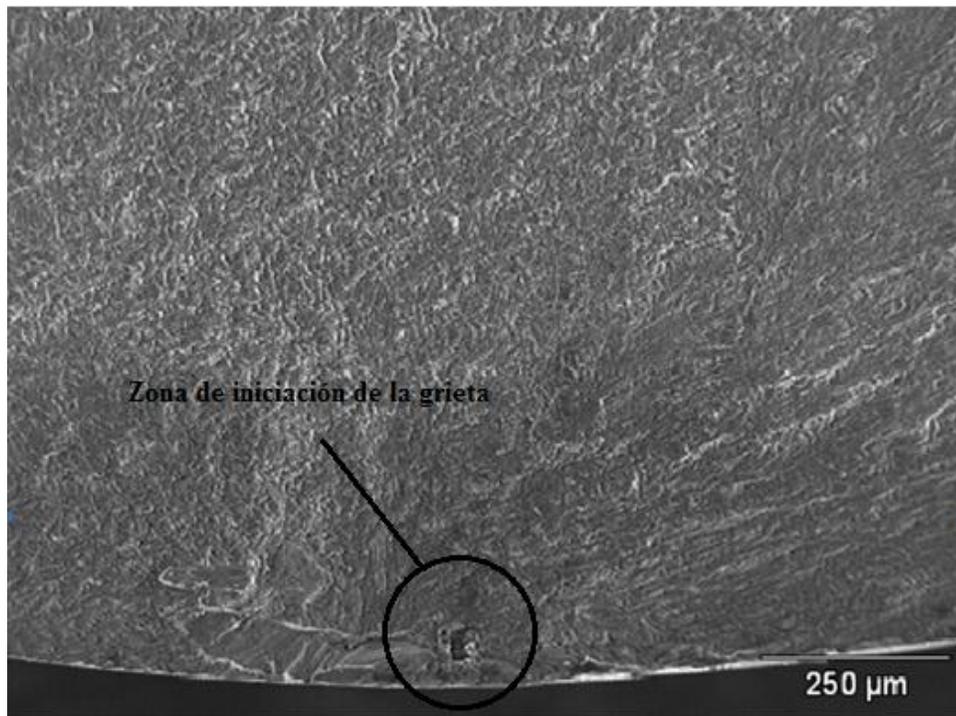


Figura N° 43, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 97 MPa, la cual falló a 383.000 ciclos

Por último se observó la superficie de fractura de una probeta ensayada al nivel más bajo de esfuerzo al que se sometieron las muestras, obteniendo un número de ciclos mucho menor en comparación con el resto de las muestras ensayadas. La micro-fotografía de este espécimen se muestra en la Figura N° 44, donde se vislumbran múltiples iniciadores de grieta y grandes porosidades que se observan a simple vista en esta fotografía.

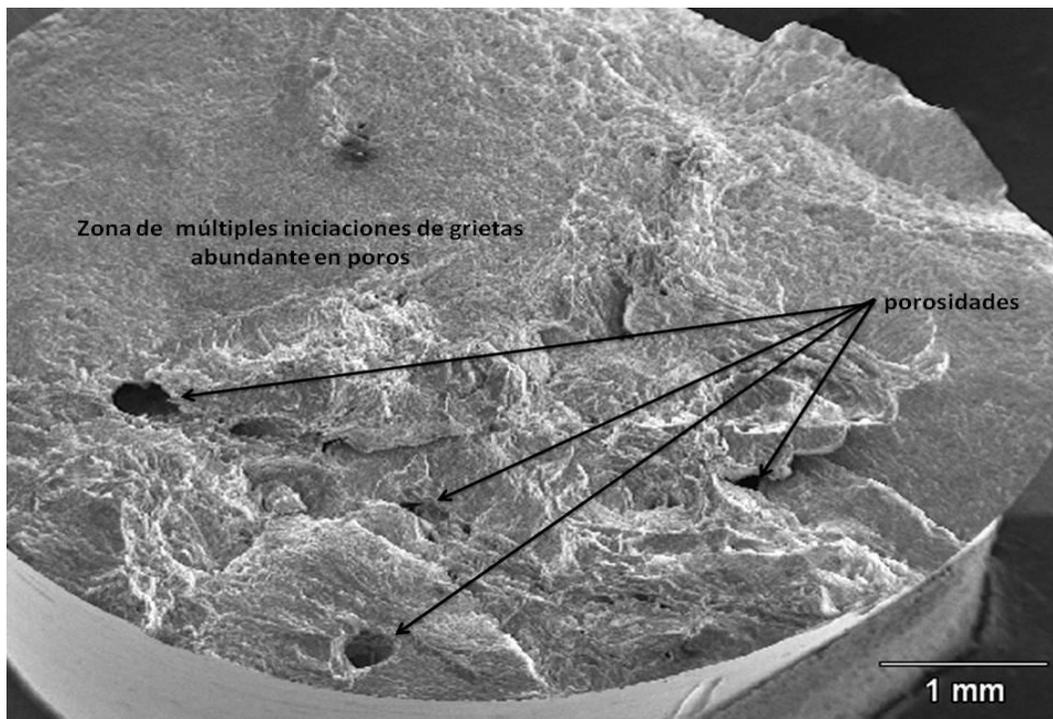


Figura N° 44, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 90 MPa, la cual falló a 328.900 ciclos

Es por estos poros que se forma esta superficie tan irregular en la zona de fractura, ya que esta enorme cantidad de agujeros produce una propagación de las grietas por fatiga en varios planos, así como en distintas direcciones. Debido a esto se supone que el material fracturó más rápidamente que un espécimen con menor número de poros.

Ahora bien, si ampliamos la superficie de fractura como se muestra en la Figura N° 45, específicamente en un poro, se nota la textura típica de la fractura dúctil, y estos poros pudieron no generar la nucleación de grieta, sino que pudieron formar parte de la fractura final o catastrófica.

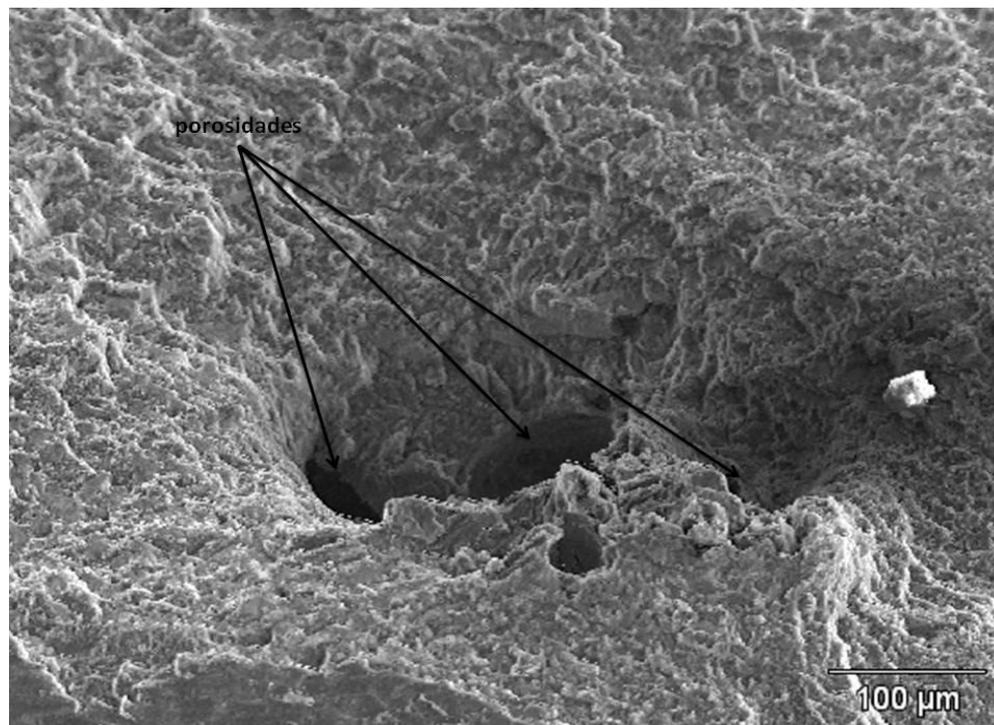


Figura N° 45, Superficie de fractura de una muestra de la aleación de Aluminio 10% Silicio, ensayada a un esfuerzo alternante de 90 MPa, la cual falló a 328.900 ciclos

3.4.2.- Análisis fractográfico: Macrografía a través de imágenes Estereográficas

Se realizó el estudio mediante Macrográfico, donde lo primero que se definió fue la clasificación según la medida del área de la posible porosidad revelada en el estudio fractográfico, que se mostró en la Tabla II. 3, donde se dividen los tres Tipos de clasificación (“A”, “B”, “C”).

A continuación se muestran tres probetas analizadas por los métodos de Microscopia Electrónica de Barrido y por Macrografía, cada una de las probetas está en una de las clasificaciones (“A”, “B”, “C”), de esta manera se pueden observar algunas diferencias entre los dos métodos además de las severidades de los defectos en la Figura N° 46.

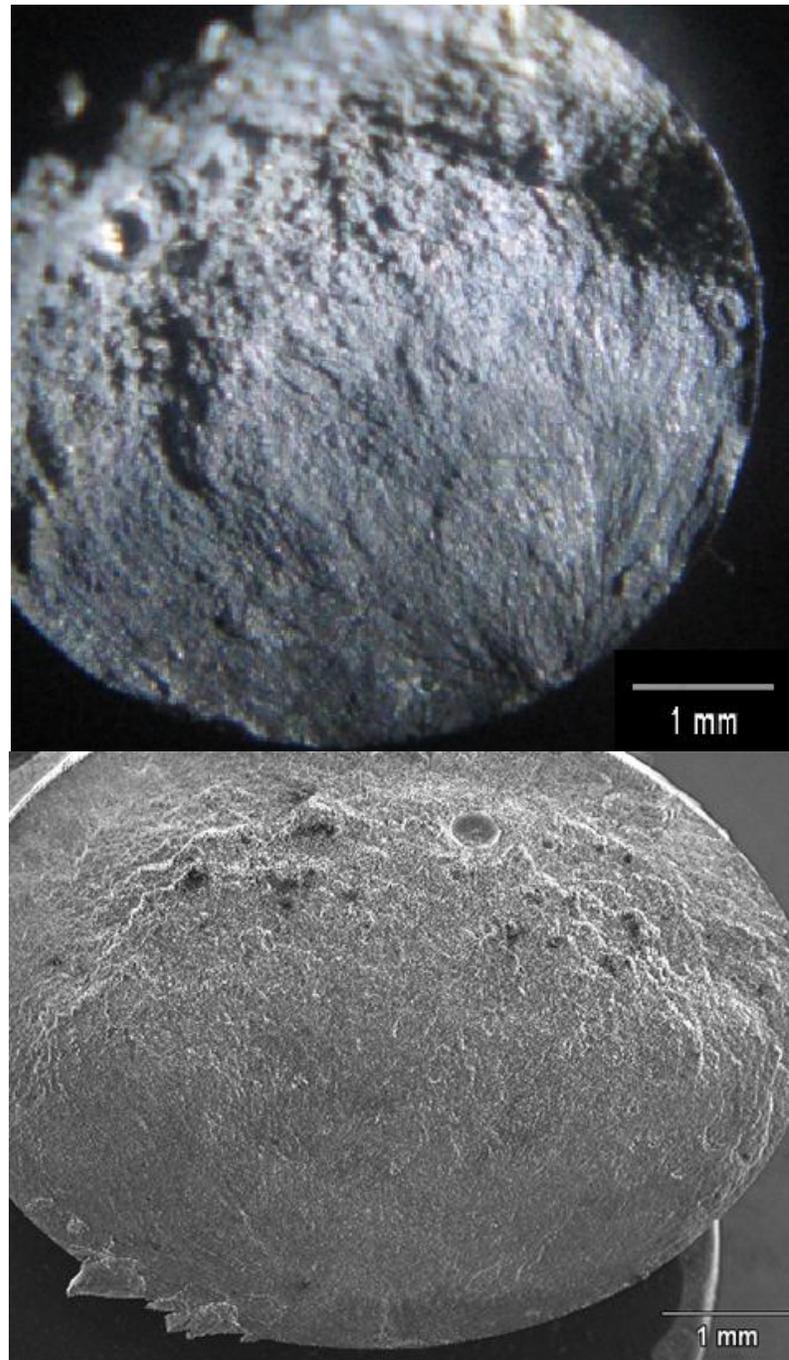


Figura N° 46, Probeta de radio continuo clasificada como Tipo A. Arriba Imagen estereográfica, abajo MEB

Fue clasificada como Tipo A debido a su baja o en ausencia de porosidad en la zona de nucleación de la grieta, pero para las probetas de esta clasificación que

poseen defectos pequeños es difícil para el lente capturar los detalles, como si pueden ser revelados con el método MEB, como se muestra en la Figura N°47, pero con un acercamiento mayor.

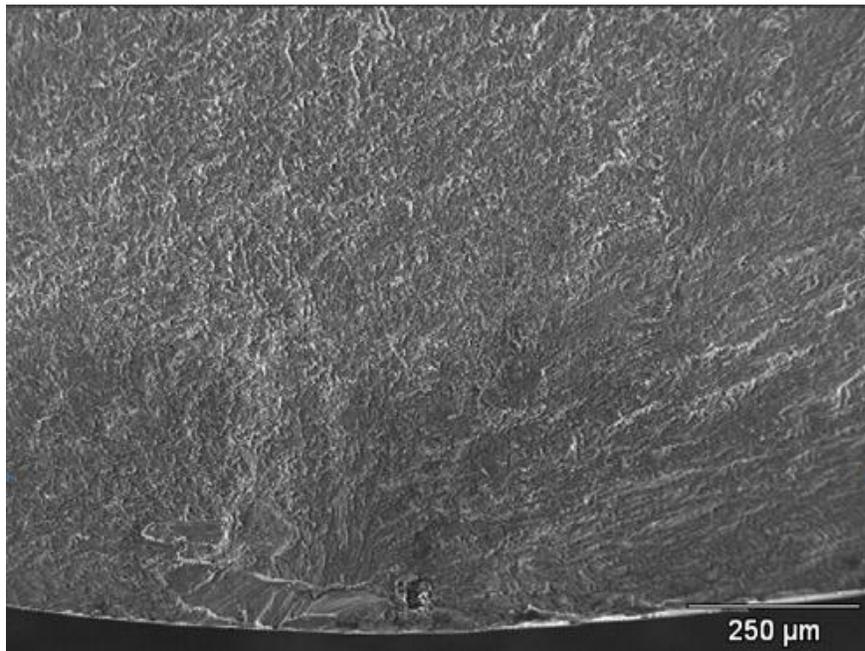


Figura N° 47, Acercamiento con el MEB, que muestra un defecto, donde se nucleó la grieta

Obtener un acercamiento de estas características con el método de Macrografía a través de imágenes estereográficas no fue posible, ya que los lentes no permitían obtener una imagen con mayor acercamiento, por lo tanto los defectos muy pequeños como el que se muestran en la Figura N° 47, no fueron observados por el método Macrografía, mientras que para las probetas clasificadas Tipo B y Tipo C si se pueden observar con mayor claridad, como se muestra en la figura N° 48, clasificada Tipo B.

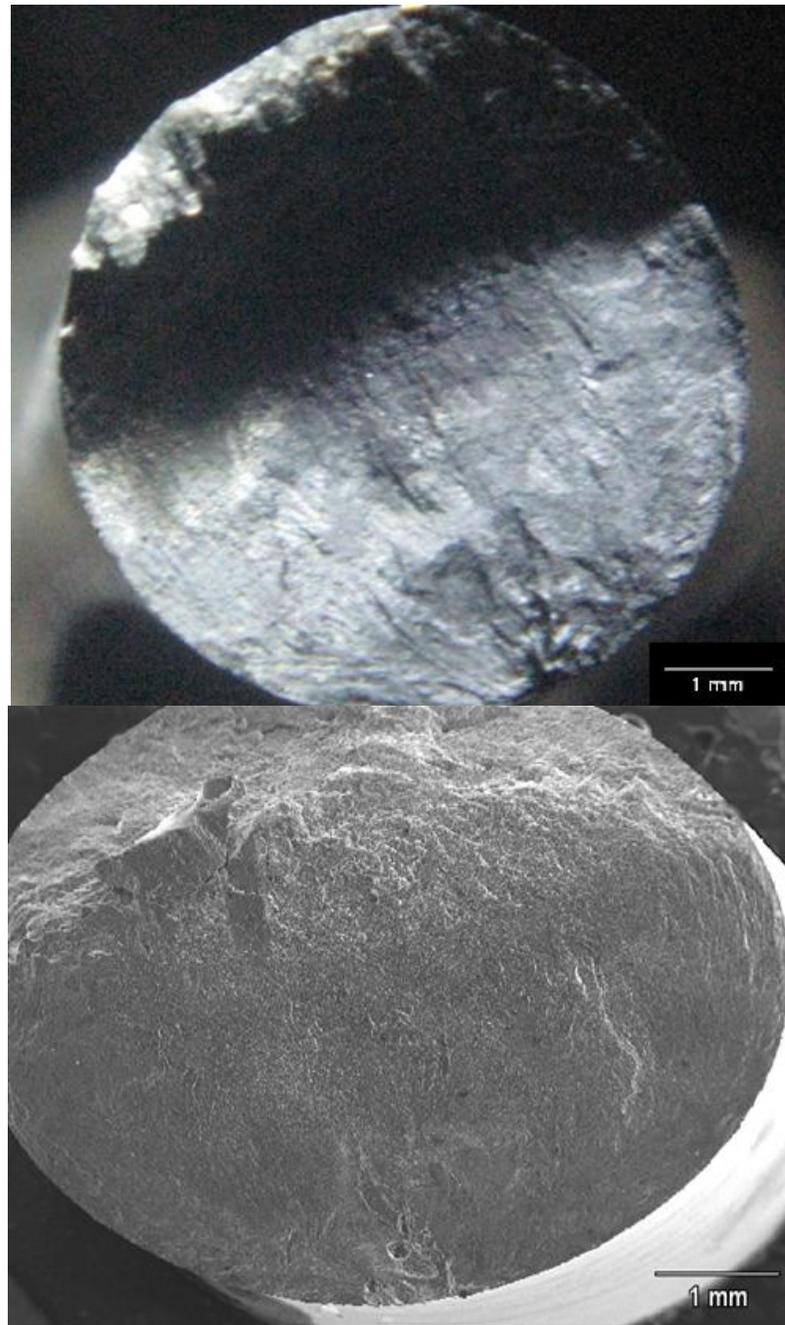


Figura N° 48, Probeta de radio continuo clasificada como Tipo B. Arriba imagen estereográfica, abajo MEB

Por último y la más evidente de todas las clasificaciones, la clasificación Tipo C, donde se puede observar la probeta que fue capturada por ambos métodos, y se muestra en la Figura N° 49 abajo mostrada.

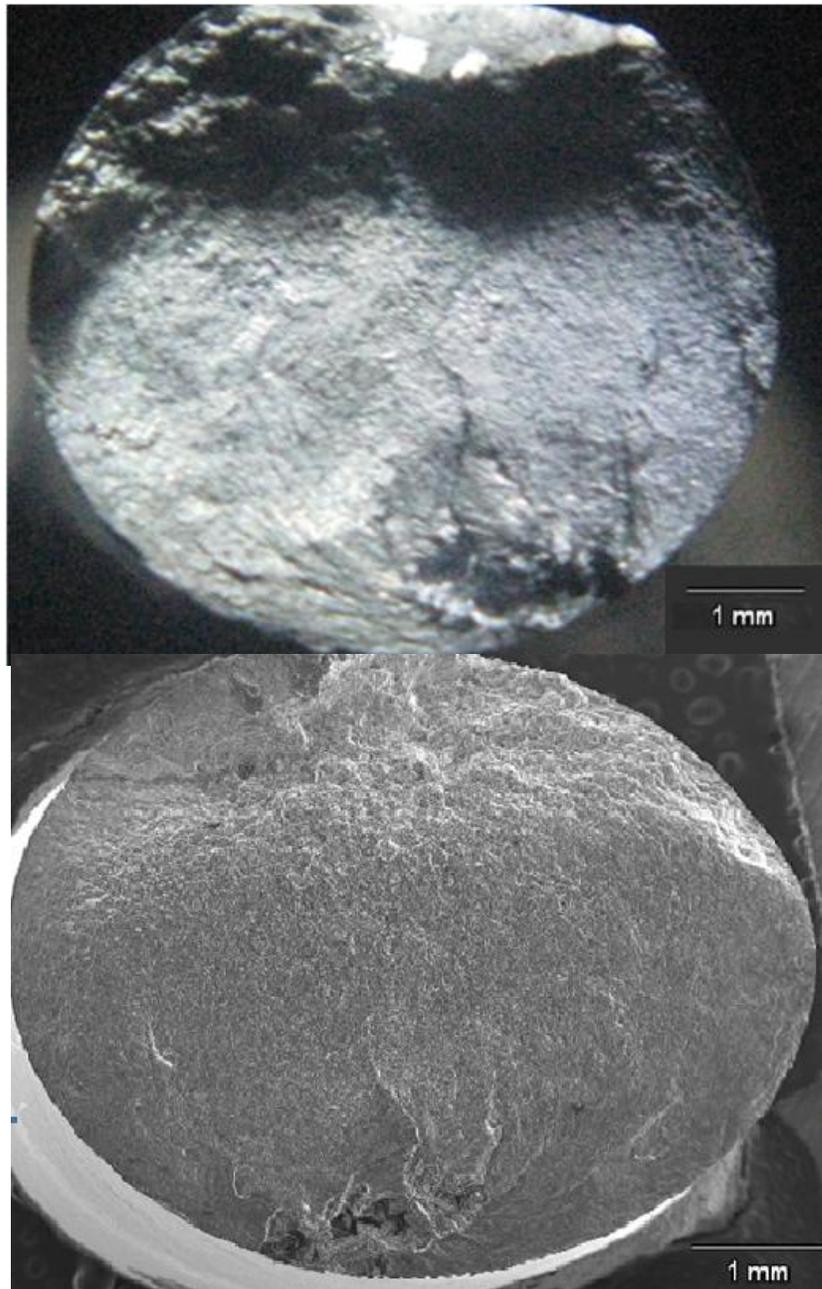


Figura N° 49, Probeta de radio continuo clasificada como Tipo C. Arriba imagen estereográfica, abajo MEB

3.5.- ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

3.5.1.- Análisis probabilístico para muestras de sección transversal constante

Una vez hecha la discretización de los tipos de defectos “A”, “B” y “C”, según el área aproximada de estos, se procedió a graficar para así observar la influencia de defectos en el material.

Se estudió en primera instancia las probetas con geometría de sección transversal constante y posteriormente el estudio de las probetas de radio continuo.

A continuación se muestran los resultados de las clasificaciones de las probetas de sección transversal constante, mostrando el área aproximada de la evidencia del defecto que se encontró en el área de iniciación de la grieta.

Tabla III. 6, Clasificación de las probetas de sección transversal constante

N° Probeta	Área aprox. (mm ²)	Tipo.
1	2,47	C
2	2,47	C
4	0,49	B
5	24,69	C
7	0,74	C
9	3,29	C
10	1,65	C
12	4,94	C
11	0,45	B
19	0,49	B
17	0,40	B
18	0,82	C
20	0,49	B
21	0,58	C
22	8,23	C
23	0,66	C
24	0,00	A

Tabla III. 7, Resultados de Fatiga agrupados según la clasificación

N° Probeta.	LOG (S) [MPa]	LOG (Nf) Tipo A	LOG (Nf) Tipo B	LOG(Nf) Tipo C
1	1,880			6,311
2	1,905			5,220
4	1,926		5,916	
5	1,926			4,274
7	1,937			5,839
9	1,953			5,829
10	1,953			5,861
12	1,956			4,897
11	1,955		5,489	
19	1,973		5,685	
17	1,971		5,652	
18	1,972			5,594
20	1,978		5,659	
21	1,988		5,960	
22	1,988			5,164
23	1,992			5,591
24	2,003	6,070		

Partiendo de la Tabla III.8 se graficaron los valores como se muestra en la Figura N°50.

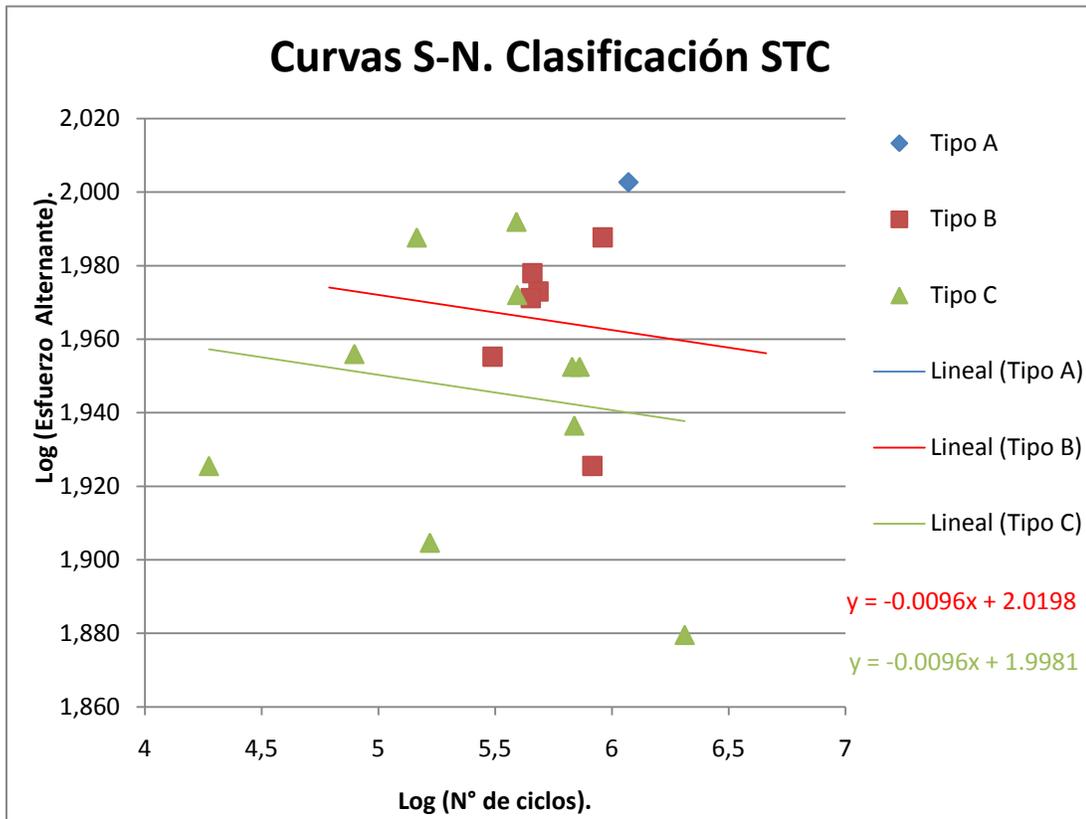


Figura N° 50, Gráfico de sección transversal constante, según la calificación “A”, “B” y “C”

En la Figura N° 50 se puede observar que en la clasificación Tipo “C”, considerada como la clasificación de probetas con defectos de mayor tamaño que ocupan 0,45% del área de la sección de fractura o más, existe una desviación mayor a la de la clasificación Tipo “B”, que poseen defectos cuyas áreas tienen un rango de valores de 0,05% a 0,45% del total del área de fractura, también se puede observar que sólo una de las probetas fue clasificada como Tipo “A”, la cual fue sometida a un esfuerzo real de 100,61 MPa, y obtuvo 1.172.200 ciclos a la falla.

Además con el análisis de las Ecuaciones de Basquin de las Tablas III.9 y III.10 de las clasificaciones “B” y “C”, se comparó la reducción de la vida a la fatiga de “C” con respecto de “B” arrojando los siguientes resultados:

Tabla III. 8, *Parámetros de Basquin para probetas de sección transversal constante de clasificación B*

Obtención de la Ec. De Basquin de probetas de Sección Transversal Constante de Tipo B			
Datos de la curva		Parámetros de la Ecuación de Basquin	
Pendiente=	-0.0096	b=	-0.0096
Intersección (eje y)	2.0198	Sf=	104.6646439
		Ecuación de Basquin	
R ² =	0.006	$S_a = 104,66N^{-0.0096}$	

Tabla III. 9, *Parámetros de Basquin para probetas de sección transversal constante de clasificación C*

Obtención de la Ec. De Basquin de probetas de Sección Transversal Constante de Tipo C			
Datos de la curva		Parámetros de la Ecuación de Basquin	
Pendiente=	-0.0096	b=	-0.0096
Intersección (eje y)	1.9981	Sf=	99.56346443
		Ecuación de Basquin	
R ² =	0.0248	$S_a = 99.56N^{-0.0096}$	

A un nivel de esfuerzo de 91,2 MPa, la vida a la fatiga de la curva *S-N* de las probetas de sección transversal constante de clasificación C se reduce en un 99,45%. Esta gran reducción de la vida a la fatiga es atribuida a la horizontalidad de las dos curvas *S-N*.

3.5.1.- Coeficiente de Correlación de Pearson:

Tabla III. 10, *Tabla de resultados para la obtención de Correlación de Pearson*

Tipo de Cálculo	Esfuerzo [MPa]	Área [mm ²]
Media	91,00485	1,76125
Covarianza	-1109559,93	-261526,789
Varianza	45,19337911	4,755185

Tabla III. 11, *Tabla para la obtención de la Varianza en los ciclos*

Varianza N° de Ciclos	2,32999E+11	2,32999E+11
--------------------------	-------------	-------------

$$\rho_{SN} = -0,36472$$

$$\rho_{AN} = -0,26502$$

Donde:

ρ_{SN} : Representa el coeficiente de correlación de Pearson, para los Esfuerzos vs Ciclos a la Falla.

ρ_{AN} : Representa el coeficiente de correlación de Pearson, para el Área del defecto vs Ciclos a la Falla.

El resultado de la correlación de Pearson $\rho_{SN} = -0,36472$, siendo evaluadas las variables Esfuerzos y el Número de Ciclos a la Falla, donde existe una baja relación lineal inversa, el signo negativo significa que a medida que los esfuerzos aumentan el número de ciclos disminuye, está clasificada como débil debido a que se encuentra en el rango $(-0,5; 0)$ ^[21].

Cuando se analizó la estimación de la correlación de Pearson tomando en cuenta las variables de Área del defecto y Número de Ciclos a la Falla, $\rho_{AN} = -0,26502$, descartando valores críticos, de igual manera existe una baja relación lineal inversa, por estar en el mismo rango, donde la correlación lineal es moderada pero el resultado indica que según aumente el área del defecto la vida a la fatiga disminuirá. Observando que para nuestro estudio el área del defecto tiene una correlación lineal menor que para el esfuerzo, si se correlacionan las anteriores con respecto al Número de Ciclos a la falla, pero de igual manera, el resultado deja en evidencia que el área de los defectos tiene influencia sobre las muestras y puede causar dispersión en el estudio esfuerzo contra ciclos a la falla.

3.5.2.- Análisis probabilístico para muestras de radio continuo

A Continuación se estudió la clasificación de los defectos contenidos en la superficie de fractura del material a probetas de radio continuo.

La Tabla III. 13, muestra los resultados de las clasificaciones de las probetas de radio continuo, mostrando el área aproximada de la evidencia del defecto que se encontró en el área de iniciación de la grieta.

Tabla III. 12, Clasificación de las probetas de radio continuo

N° Probeta	Area [mm ²]	Tipo
24	0.82	C
25	0.10	B
2	0.82	C
1	0.99	C
4	0.21	B
5	0.06	A
6	0.31	A
7	8.64	C
8	0.00	A
9	0.74	C
10	4.11	C
11	0.41	B
12	0.00	A
13	4.94	C
14	0.31	B
15	0.35	B
16	0.58	C
17	1.23	C
18	0.21	A
19	0.12	C
20	1.23	C
21	0.20	B
22	0.66	B
23	0.00	A

Tabla III. 13, Resultados de Fatiga agrupados según la clasificación

N° Probeta	Log (S) [Mpa]	log (Nf) Tipo A	log(Nf) Tipo B	log(Nf) Tipo C
24	1.937			5.706
25	1.937		5.941	
2	1.953			4.974
1	1.953			5.517
4	1.963		6.013	
5	1.963	6.159		
6	1.963	5.946		
7	1.963			5.408
8	1.963	6.156		
9	1.973			5.029
10	1.973			5.594
11	1.973		5.690	
12	1.973	6.087		
13	1.973			5.613
14	1.988		5.558	
15	1.988		5.583	
16	1.988			5.225
17	1.988			4.904
18	1.988	5.857		
19	2.030			5.150
20	2.030			5.321
21	2.030		5.355	
22	2.030		5.840	
23	2.030	5.716		

Partiendo de la tabla de resultados de fatiga agrupados según la clasificación, se generó el gráfico $S-N$ de sección transversal constante, según la calificación “A”, “B” y “C” como se muestra en la Figura N°51.

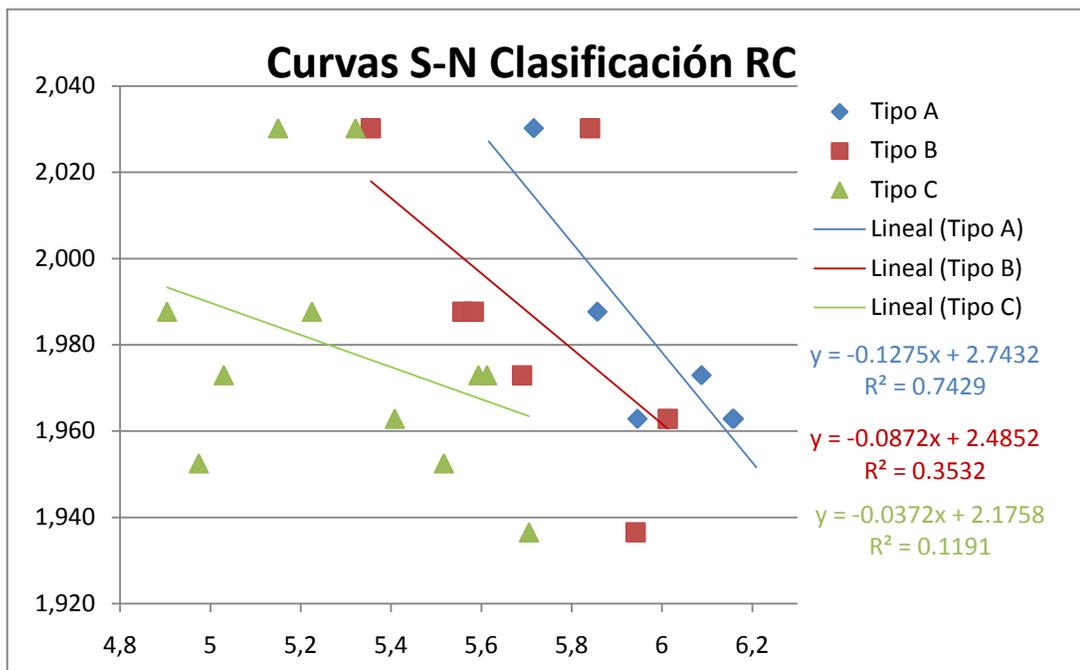


Figura N° 51, Gráfico S-N de sección transversal constante, según la calificación A, B y C

Se realizó una comparación entre las Tabla III.7 y Tabla III.13 se pudo observar la existencia de una mayor cantidad probetas de clasificación Tipo A, siendo seis (6) probetas de radio continuo contra una (1) sola de sección transversal constante, lo que puede atribuirse a que la probabilidad de existencia de defectos en la zona de fractura de cada probeta aumenta de manera significativa cuando la zona en que el esfuerzo es más crítico, se hace mayor.

Se evidenció que la clasificación Tipo “C” contiene la mayor cantidad de probetas tanto en las de RC como en las de STC, lo que generó en las curvas una alta dispersión obteniendo una pendiente en la curva S-N de radio continuo sin discretizar de -0,0392, alejándose de las pendientes características de aleaciones similares obtenidas en las revisiones bibliográficas, como fue el estudio realizado por C. Bosi y colaboradores^[17], que analizaron el comportamiento a la fatiga de una aleación de aluminio al 10% de Silicio, obteniendo una pendiente de -0.1058. de manera análoga, los estudios de una aleación Al-Si eutéctica, llevados a cabo por González M. G.

Llorens F. E. ^[4], arrojaron una curva *S-N* con una pendiente de -0,1085, que al ser comparadas con nuestros estudios, los valores discrepan en más del doble en magnitud.

Luego de graficar los valores clasificados de acuerdo al área del defecto, se observó que la magnitud de la pendiente aumentaba a medida que el área del poro era menor. Para la clasificación “C”, la pendiente fue de -0,0372, un poco más horizontal que la pendiente de la curva *S-N* que contiene toda la data. Para la clasificación tipo “B”, la pendiente fue de -0,0872, siendo mayor a las anteriores en más del 100%. Por último, la clasificación “A”, correspondiente a las muestras con ausencia de defectos en la superficie de fractura, arrojó una pendiente de -0,1275, acercándose a un resultado característico de aleaciones de aluminio similares.

Al observar este comportamiento, se procedió a relacionar el comportamiento de la vida a la fatiga con respecto al área del defecto contenido en la superficie de fractura de cada espécimen, para poder predecir tanto el comportamiento de la aleación en presencia de defectos como en ausencia de los mismos, lo que permite observar las condiciones más desfavorables del material y las ideales.

Se promediaron las áreas de los defectos en cada clasificación para obtener una relación directa con la pendiente de la curva *S-N* correspondiente a cada una de ellas, como se puede observar gráficamente en la Figura N° 52, la curva que se ajustó mejor a los resultados obtenidos fue de comportamiento logarítmico, luego de evaluar el coeficiente de correlación R^2 .

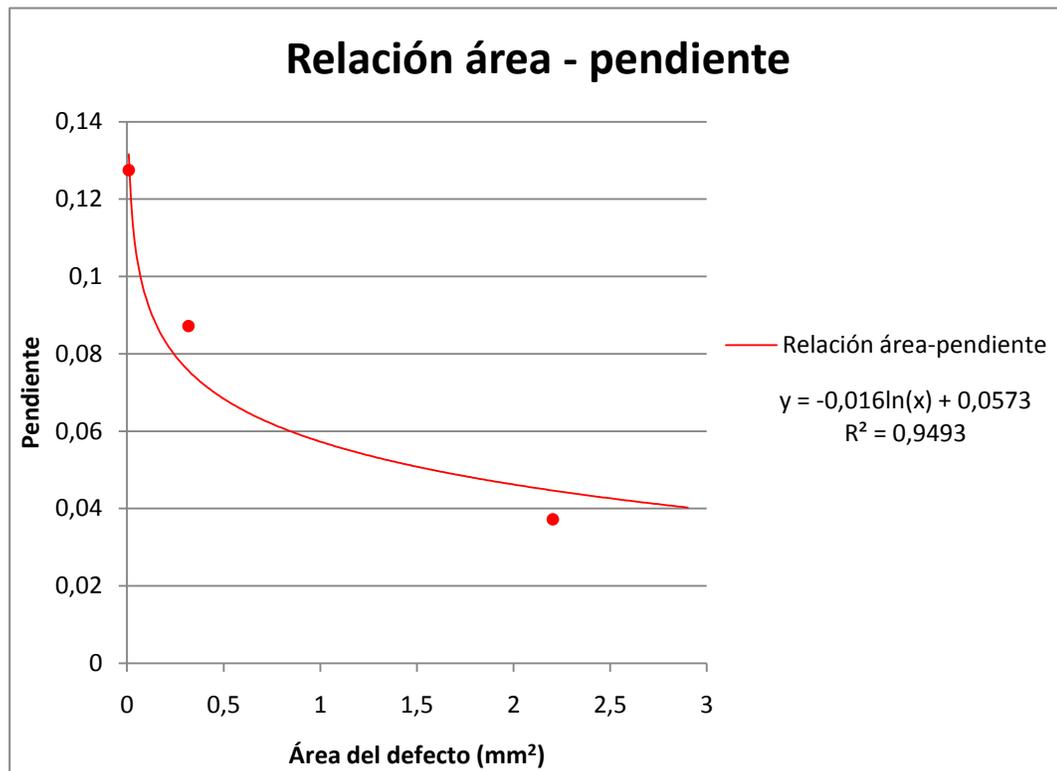


Figura N° 52, Regresión lineal de la curva área vs pendiente

Este comportamiento define la pendiente de la curva $S-N$ del material en presencia de un poro de un área determinada, definida por la Ecuación N° 48.

$$m = -0,016\ln(A) + 0,0573 \quad (\text{E.48})$$

En donde

m , es la pendiente de la curva $S-N$ en escala doble logarítmica.

A , es el área del poro en la superficie de fractura, en mm^2 .

Es importante recalcar que esta ecuación sólo rige el comportamiento de la magnitud de la pendiente, lo que hace pertinente cambiarla de signo ya que se caracteriza por ser negativa.

Una vez definida la variación de la pendiente respecto al área del defecto, se procedió a evaluar el parámetro de desplazamiento de la recta $S-N$ que relaciona término independiente de esta con el área del defecto. Arrojando la curva de relación área - término independiente, Figura N° 53.

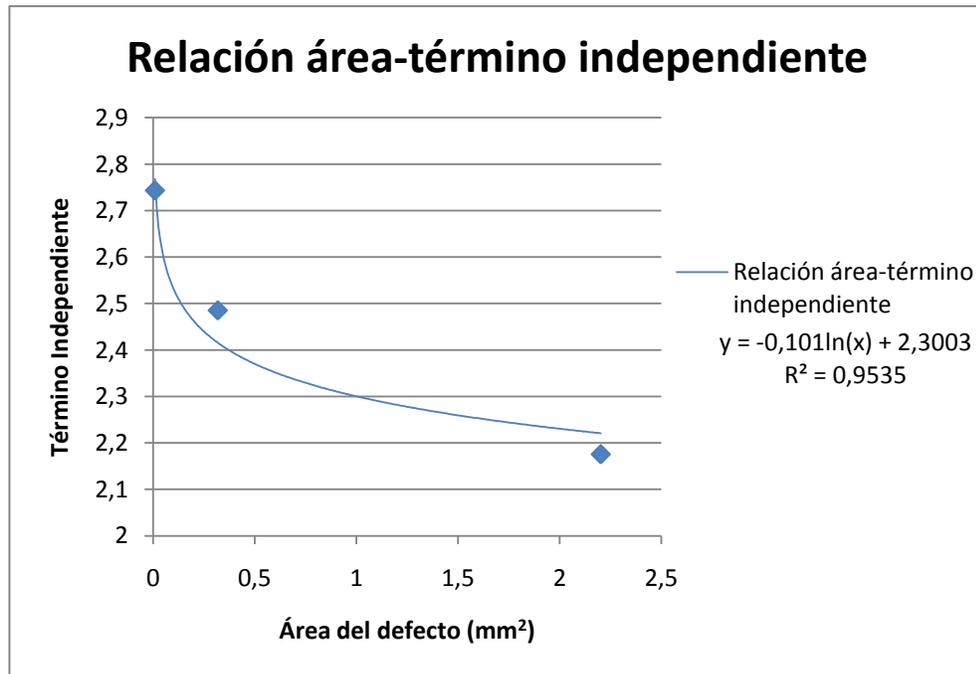


Figura N° 53, Curva de Relación Área – Término Independiente

Este segundo comportamiento describe la curva que mejor se ajusta a la data de manera logarítmica. Evaluando el parámetro de correlación R^2 resultó la Ecuación N° 49.

$$i = -0,101\ln(A) + 2,3003 \quad (\text{E.49})$$

En donde

i , es el término independiente de la ecuación que rige la curva $S-N$.

A , es el área del poro en la superficie de fractura, en mm^2 .

Para aproximar el comportamiento que describe la familia de curvas $S-N$ para el material a medida que el área de los poros aumentan, fue necesario unir las Ecuaciones N°48 y N°49, proponiendo un modelo representado por la Ecuación N° 50.

$$y(x) = [0,016Ln(A) - 0,0573]x - 0,101Ln(A) + 2,3003 \quad (\text{E.50})$$

Partiendo de la Ecuación N° 50, se obtuvieron los valores de diferentes curvas $S-N$, evaluando dos (2) puntos para definir cada una de ellas.

Tabla III. 14, Evaluación del modelo propuesto para ciertos valores de áreas de defectos

Curva $S-N$	A [mm ²]	x (Log ciclos)	y (log Mpa)	m	i
Tipo A	0.0096	0	2.77	-0.1316	2.7695
	0.0096	6.2	1.95	-0.1316	2.7695
Tipo B	0.31859	0	2.42	-0.0756	2.4158
	0.31859	6.2	1.95	-0.0756	2.4158
Tipo C	2.2031	0	2.22	-0.0447	2.2205
	2.2031	6.2	1.94	-0.0447	2.2205
Recta 1	0.0576	0	2.59	-0.1030	2.5886
	0.0576	6.2	1.95	-0.1030	2.5886
Recta 2	0.28	0	2.43	-0.0777	2.4289
	0.28	6.2	1.95	-0.0777	2.4289
Recta 3	0.56	0	2.36	-0.0666	2.3589
	0.56	6.2	1.95	-0.0666	2.3589
Recta 4	0.83	0	2.32	-0.0603	2.3191
	0.83	6.2	1.95	-0.0603	2.3191
Recta 5	1.11	0	2.29	-0.0556	2.2898
	1.11	6.2	1.94	-0.0556	2.2898
Recta 6	1.39	0	2.27	-0.0520	2.2670
	1.39	6.2	1.94	-0.0520	2.2670
Recta 7	1.67	0	2.25	-0.0491	2.2485
	1.67	6.2	1.94	-0.0491	2.2485
Recta 8	1.94	0	2.23	-0.0467	2.2334
	1.94	6.2	1.94	-0.0467	2.2334
Recta 9	2.22	0	2.22	-0.0445	2.2198
	2.22	6.2	1.94	-0.0445	2.2198

Como la naturaleza del modelo es logarítmica, fue pertinente realizar una excepción cuando el material se encuentre en ausencia de defectos, es decir, cuando el área es igual a cero (0) ya que al evaluar este dato resulta una indeterminación. Para ello se tomó el valor de 0,0096, debido a que el promedio del área del poro para la clasificación “A” fue este valor.

En el gráfico de Curvas *S-N* de predicción según el área del poro, Figura N° 54, se representa gráficamente la familia de rectas *S-N* generadas a partir del modelo, en un rango de áreas de [0,0096; 2,22], que permitió ejemplificar el comportamiento de este modelo.

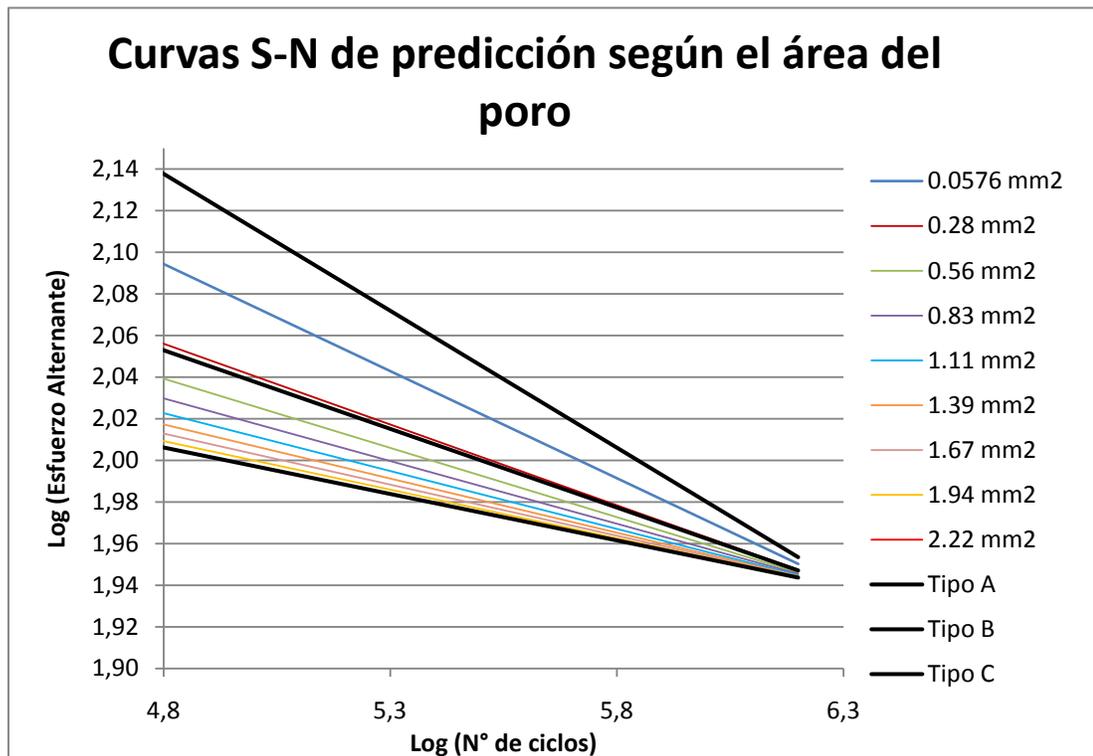


Figura N° 54, Curvas S-N de predicción según el área del poro

Donde las curvas más relevantes son las de las clasificaciones “A”, “B” y “C”, evaluadas a partir del modelo anteriormente mencionado.

Para culminar, se procedió a validar el modelo, realizando una comparación como se muestra en el gráfico comparación del modelo, Figura N° 55, entre la curva *S-N* de fatiga de clasificación “A” con curvas obtenidas en estudios anteriores, obtenidas de la revisión bibliográfica.

Las curvas *S-N* con las que se comparó la de clasificación “A” fueron:

- a) Curva obtenida del estudio de Gonzalez y Llorens^[4], de una aleación Al-10%Si eutéctica, partiendo de especímenes de fundición, con moldes de coquilla, de manera análoga a los especímenes de este estudio.
- b) Curva obtenida del estudio realizado por C. Bosi, G.L. Garagnani, R. Tovo, llevando como título “Fatigue properties of a cast aluminium alloy for rims of car wheels”^[17], que analizaron el comportamiento a la fatiga de una aleación de aluminio al 10% de Silicio.
- c) Curva de Fatiga de la aleación A356, de Aluminio al 7% de Silicio extraída del Handbook de Fatiga^[18].

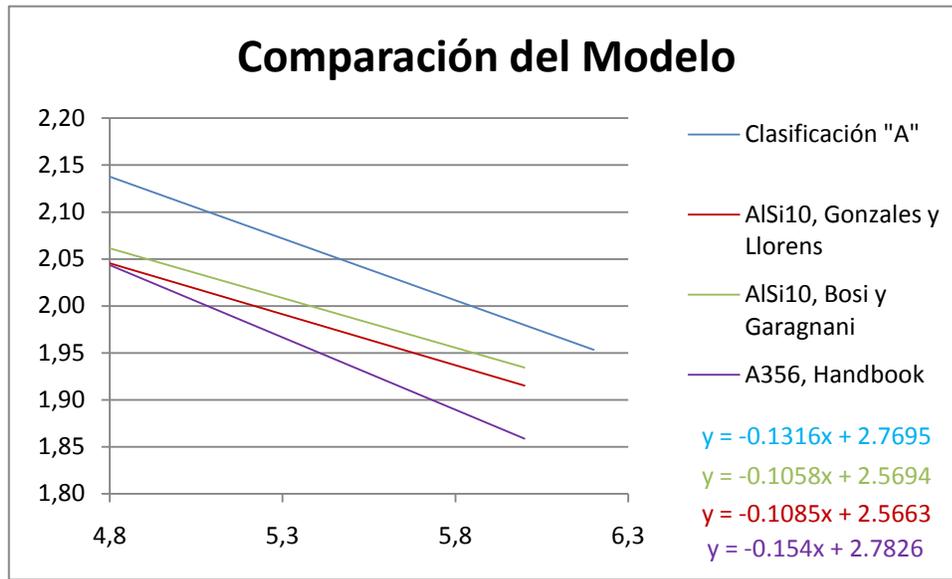


Figura N° 55, Comparación de la Curva S-N de clasificación "A" con respecto a la bibliografía y otras investigaciones

Comparativamente la curva estimada como ideal, presenta una pendiente representativa de una aleación Aluminio – Silicio, que se asemeja a todas las anteriores. Por supuesto, presenta pequeñas diferencias en pendiente e intersección con el eje "y" ya que en cada material existen variables en sus componentes aleantes secundarios, así como también diferentes variables en los procesos de colada.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.- CONCLUSIONES

1.- No es posible la estimación de la vida a la fatiga por los métodos convencionales cuando los defectos del material tienen influencia sobre los resultados obtenidos.

2.- El estudio de la morfología de fractura evaluada mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido, reveló diferentes magnitudes de defectos que pudieron afectar la vida a la fatiga al aire de la aleación AlSi10 y guardaron relación con la reducción de la vida a la fatiga, en los especímenes observados.

3.- En las muestras de sección transversal constante los defectos causan una mayor dispersión en cuanto al número de ciclos a la fractura del material que las de radio continuo, esto podría ser consecuencia de no concentrar el esfuerzo mayor en una zona puntual sino a lo largo de toda la superficie calibrada, aumentando la probabilidad de existencia de defectos.

4.- El Coeficiente Correlación de Pearson, según este estudio, tiene una baja relación lineal inversa entre área del defecto con respecto a la vida a la fatiga, lo que significa que a medida que el área del defecto aumenta, se reduce la vida a la fatiga.

5.- Con el análisis de la superficie de fractura mediante la Macrografía y la posterior discretización de las variables en relación al área de los defectos en la curva de radio continuo, se obtuvieron nuevas curvas *S-N*, en donde la curva de los especímenes de clasificación “A” es realmente característica de una curva *S-N* de una aleación de Aluminio-Silicio.

6.- El comportamiento de la aleación estudiada con respecto del área del defecto observado en la superficie de fractura del material, está regido mediante el modelo propuesto por este trabajo de investigación, representado por la ecuación:

$$y(x) = [0,016Ln(A) - 0,0573]x - 0,101Ln(A) + 2,3003$$

Esta influye tanto en la inclinación, como en el desplazamiento sobre el eje N de la curva $S-N$ doble logarítmica de alto ciclaje.

7.- En la estimación de la composición química realizada mediante la Espectrofotometría de Absorción Atómica de Llama, sólo existió discrepancia en el sodio, con respecto a la composición química entregada por la empresa. Esto puede atribuirse al tiempo de exposición del elemento en la aleación para modificar la microestructura del Silicio antes de la colada o por la metodología empleada en la adición del mismo. Además, se ratificó que el material estudiado es una aleación de aluminio Eutéctica.

4.2.- RECOMENDACIONES

1.- Debido a los resultados obtenidos en el presente estudio se sugiere la realización de nuevas investigaciones enfocadas en la discretización de variables que afecten la vida a la fatiga del material con diferentes materiales, que permitan la validación del modelo propuesto en este trabajo de investigación.

2.- Para estudios posteriores que sigan la línea de investigación empleada en este trabajo se aconseja tomar variables como la geometría del defecto para la obtención de un análisis más amplio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Callister Jr., W. D. (1999) **Materials science and engineering an Introduction**. 5ta edición. Editorial Reverter, S.A. Barcelona, España.
- [2] ASM Handbook, (1990) **Metals Handbooks, Properties and selection: Nonferrous Alloys and Special-purpose materials** (2). 10ma edición. Editorial ASM International. Cincinnati.
- [3] Murphy, A. J. (1985) **Fundición de los metales no ferrosos**, 2da Edición, Editorial Tecnos, Madrid.
- [4] GONZÁLEZ M. G. LLORENS F. E. (1991) **Influencia de la velocidad de enfriamiento sobre la resistencia a la fatiga y a la tracción de una aleación eutéctica Aluminio-Silicio modificada con antimonio**. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- [5] Kalpakjian, S. Schmid, D. (2002) **Manufactura, Ingeniería y Tecnología**. 4ta edición. PEARSON EDUCACIÓN. México
- [6] Askeland, D. (2004) **Ciencia e Ingeniería de los materiales**. 4ta edición, Editorial Thomsom, Mexico.
- [7] ASM Handbook (1986) **Failure analysis and prevention**. 9na edición. ASM International. Cincinnati.
- [8] Forrest, P. (1972) **Fatiga de los Metales**. 2da Edición. Ediciones Urmo. Bilbao.
- [9] Weibull, W. (1961) **Fatiga Testing and Analisis of results**.
- [10] Alvarez, P. Hernandez, R. **Estudio del comportamiento a la fatiga y a la fatiga corrosión de un acero estructural AISI 4340 recubierto por una**

- película de diamante policristalino sintético.** Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Pp 34-54.
- [11] Escalona, R. Salkind, N. (1999) **Métodos de investigación**, 3ra edición. Editorial PRENTICE HALL. México.
- [12] ASTM A 370-03a (2003) **Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.** Editorial ASTM International.
- [13] ASTM A E 606-04 (2005) **Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing.** Editorial ASTM International. Cincinnati.
- [14] ASTM E 739-91(2004) **E1 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Data.** Editorial ASTM International. Cincinnati.
- [15] YI, J.Z., GAO, Y.X., LEE, P.D., FLOWER, H.M, LINDLEY, T.C. (2003) **Scatter in fatigue life due to effects of porosity in Cast A356-T6 Aluminum-Silicon Alloys.** Pp 3-11
- [16] Perkin, E. (1996) **Atomic Absorption Spectroscopy “Analytical Methods”.** USA.
- [17] Bosi, C. Garagnani, G.L. Tovo, R. (2001) **Fatigue properties of a cast aluminium alloy for rims of car wheels.** Pp 1-6.
- [18] ASM Handbook (1996) **Fatigue and Fracture** (19). 9na edición. Editorial ASM International. Cincinnati,
- [19] Flinn, R. Trojan, P. (1991) **Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones.** 3ra Edición. McGRAW-HILL. México.

- [20] Shackelford, J. (2009) **Introducción a la ciencia de los materiales**. 7ma edición. Editorial PRENTICE HALL. USA
- [21] Chou, Y. (1991) **Análisis Estadístico**. Editorial McGRAW-HILL. México.
- [22] Amigó Borrás, V. (1991) **Tecnología de los materiales**. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. 2da edición. España.