

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Tema:

---

**“ESTUDIO A FATIGA MECÁNICA DE FUNDICIONES DE ALUMINIO  
OBTENIDA DE CHATARRA DE PISTONES DE BUSES HINO FG PARA  
DETERMINAR EL DIAGRAMA ESFUERZO-NÚMERO DE CICLOS”**

---

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniera Mecánica.

**AUTOR:** León Guerrero Tainy Elizabeth

**TUTOR:** Ing. Jorge Guamanquispe Toasa, Mg

Ambato - Ecuador

2016

## **CERTIFICACIÓN**

En mi calidad de Tutor de la presente Tesis de grado, con el tema: “ESTUDIO A FATIGA MECÁNICA DE FUNDICIONES DE ALUMINIO OBTENIDA DE CHATARRA DE PISTONES DE BUSES HINO FG PARA DETERMINAR EL DIAGRAMA ESFUERZO-NÚMERO DE CICLOS”, desarrollado por la señorita egresada de la Facultad de Ingeniería Mecánica, certifico que el presente trabajo de investigación es original de su autor y cumple con todos los requerimientos tanto científicos como técnicos establecidos en el reglamento interno de la Universidad.

---

Ing. Jorge Patricio Guamanquispe Toasa, Mg

TUTOR DE TESIS

## **AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Yo, Tainy Elizabeth León Guerrero, portadora de la cédula de ciudadanía N° 180424522-1, tengo a bien indicar que el trabajo de investigación con el tema: “ESTUDIO A FATIGA MECÁNICA DE FUNDICIONES DE ALUMINIO OBTENIDA DE CHATARRA DE PISTONES DE BUSES HINO FG PARA DETERMINAR EL DIAGRAMA ESFUERZO-NÚMERO DE CICLOS”, así como los conceptos, ideas y resultados son de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor de este trabajo investigativo.

Tainy Elizabeth León Guerrero

EL AUTOR

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que se haga de ésta tesis o parte de ella un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi tesis, con líneas de difusión pública, además apruebo la reproducción de ésta tesis, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando ésta reproducción o suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Autora

Tainy Elizabeth León Guerrero

## **DEDICATORIA**

A mis padres Vicente y Sonia que me apoyaron en este logro, a mis hermanos Henry, Maricela, en especial a mi hijo Alexis Proaño que día a día me llena de alegría con su sonrisa, a mi amiga Adriana y a Klever mi compañero de vida.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por darme el conocimiento y la inteligencia, a la Universidad Técnica de Ambato por abrirme las puertas y darme la oportunidad de ser alguien mejor, a mis padres, y en especial a los profesores que con su sabiduría me dieron los conocimientos necesarios en las aulas para culminar mi carrera, y en especial quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Jorge Guamanquispe a todos ellos muchas gracias.

# CONTENIDO

Portada.....	i
Aprobación del tutor .....	ii
Autoría.....	iii
Dedicatoria .....	v
Agradecimiento .....	vi
Contenido .....	vii
Indice de figuras .....	xii
Indice de tablas.....	xvi
Resumen ejecutivo .....	xvi
CAPITULO I.....	1
El problema .....	1
1.1 Tema:.....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	1
1.2.1 Contextualización.....	1
1.2.2 Análisis crítico .....	2
1.2.3 Prognosis.....	2
1.2.4 Formulación del problema.....	3
1.2.5 Pregunta directrices .....	3
1.2.6 Delimitación del problema .....	3
1.3 Justificación.....	4
1.4. Objetivos .....	5
1.4.1 Objetivo General: .....	5
1.4.2 Objetivos Específicos: .....	5

CAPÍTULO II .....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes Investigativos.....	6
2.1.1 Antecedentes .....	6
2.1.2 Fundamento Teórico .....	7
2.2 Fundamentación Filosófica .....	36
2.3 Fundamentación Legal.....	36
2.4 Categorías Fundamentales .....	37
2.5 Hipótesis .....	37
2.6 Señalamiento de variables.....	37
2.6.1 Variable Independiente:.....	37
2.6.2 Variable Dependiente: .....	37
CAPÍTULO III.....	38
Metodología .....	38
3.1 Enfoque .....	38
3.2 Modalidad Básica de la investigación.....	38
3.2.1 Bibliográfica.....	38
3.2.2 De Campo .....	39
3.2.3 Experimental .....	39
3.2 Nivel o tipo de Investigación .....	39
3.2.1 Exploratoria.....	39
3.2.3 Descriptiva .....	39
3.3.3 Asociación de Variables.....	38
3.3 Población y Muestra .....	38
3.4 Operacionalización de Variables .....	39



3.5 Plan de recolección de la información.....	42
3.2 Plan de Procesamiento de la Información .....	42
3.6.1 Plan de análisis e interpretación de resultados.....	42
CAPÍTULO IV.....	44
Análisis e Interpretación de resultados.....	44
4.1 Determinación de parámetros de investigación .....	44
4.1.1. Determinación del tamaño de la muestra.....	44
4.2 Ensayo metalográfico.....	46
4.3 Cálculo de la Densidad.....	66
4.3.1 Primer Ensayo .....	66
4.3.2 Segundo Ensayo .....	69
4.3.2 Tercer Ensayo.....	71
4.4 Análisis de espectrometría .....	73
4.5 Proceso de Fundición .....	83
4.1.4 Obtención de las probetas .....	85
4.6 Obtención de la curva s-n.....	86
4.1.4.1 Verificación de la frecuencia de aplicación del esfuerzo.....	86
4.1.4.2 Relación de esfuerzos.....	88
4.1.4.3 Análisis de Deflexión.....	88
4.1.4.3 Regresión Lineal para Aluminio-Silicio de pistones de buses Hino FG...	93
4.7 Demostración de la Hipótesis .....	97
4.7.1 Demostración de la hipótesis para el aluminio .....	97
Hipótesis Alterna.....	98
Hipótesis Nula.....	98
Regla de decisión .....	100

CAPITULO V .....	102
Conclusiones y Recomendaciones .....	102
5.1 Conclusiones .....	102
5.2 Recomendaciones.....	104
CAPITULO VI.....	105
Propuesta .....	105
6.1 Datos Informativos .....	105
6.2 Antecedentes de la Propuesta.....	106
6.3 Justificación.....	106
6.4 Objetivos .....	107
6.4.1 Objetivo General .....	107
6.4.2 Objetivos Específicos.....	107
6.5 Análisis de Factibilidad.....	107
6.6 Fundamentación .....	108
6.6.1 Obtención de la probeta sin poros .....	108
6.6.2 Determinación de Parámetros de Diseño .....	113
6.7 Metalografía .....	129
6.7 Equipo Utilizado .....	133
6.8 Administración.....	133
6.8.1 Costos Directos .....	134
6.9 Previsión de la Evaluación.....	134
Bibliografía.....	135
Anexos .....	136
Anexo A .....	136
ANEXO B1 .....	142

ANEXO B2.....	143
Anexo C.....	144
Anexo D.....	145
Anexo E.....	146
Anexo F.....	147
Anexo G.....	149
Anexo H.....	150
Anexo I.....	151

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema de propagación de grieta en un material dúctil.....	8
Figura 2-2 Resistencia a la fatiga representativas .....	12
Figura 2-3 Probabilidad de densidad FDP log-normal de la relación de fatiga $\Phi_b$ de Gough.....	12
Figura 2-4 Diagrama S-N para las aleaciones de aluminio 2014-T6.....	13
Figura 2-5 Esfuerzo y deformación uniaxial.....	20
Figura 2-6 Esfuerzo y deformación combinados .....	21
Figura 2-7 Esfuerzo y deformación por flexión.....	21
Figura 2-8 Esfuerzo Cortante .....	22
Figura 2-9 Máquina de R.R. Moore .....	23
Figura 2-10 Viga en flexión .....	23
Figura 2-11 Amplitud de Esfuerzos .....	24
Figura 2-12 Esfuerzo repetido e invertido.....	27
Figura 2-13 Pruebas de fatiga de R. R Moore.....	28
Figura 2-14 Diagrama de esfuerzo variable preparado para evaluar el daño acumulado .....	30
Figura 2-15 Uso de la regla de Miner para predecir el límite de resistencia a la fatiga de un material que se ha sobreesforzado durante un número finito de ciclos.....	32
Figura 2-16 Regímenes de fatiga .....	33
Figura 2-17 Ensayo Metalográfico de la aleación 390 Al-Si-Fe con aumento de 100x.....	35
Figura 2-18 Dimensiones de las probetas para ensayos de vida a fatiga .....	35
Figura 2-19 Red de Categorías Fundamentales.....	37
Figura 4-1 Lijado de la probeta.....	47
Figura 4-2 Pulido de la probeta.....	48

Figura 4-3 Lavado de la probeta .....	48
Figura 4-4 Secado de la probeta.....	49
Figura 4-5 Ataque químico de la probeta.....	49
Figura 4-6 Probeta atacada quimicamente .....	50
Figura 4-7 Análisis de metalografía en el microscopio .....	50
Figura 4-8 Metalografía de la cabeza del piston tomada a 40x.....	52
Figura 4-9 Metalografía de la cabeza del pistón tomada a 100x.....	53
Figura 4-10 Metalografía de la cabeza del pistón tomada a 200x.....	54
Figura 4-11 Metalografía de el faldón del piston tomada a 40x .....	57
Figura 4-12Metalografía de el faldón del piston tomado a 100x.....	58
Figura 4-13 Metalografía de el faldón del pistón a 200x .....	59
Figura 4-14 Metalografía de la fundición del pistón a 40x.....	62
Figura 4-15Metalografía de la fundición del piston a 100x.....	63
Figura 4-16 Metalografía de la fundición del piston a 200x.....	64
Figura 4-17 Masa de la fundición .....	67
Figura 4-18 Altura de la fundición.....	67
Figura 4-19 Diámetro de la fundición.....	68
Figura 4-20Masa de la fundición .....	69
Figura 4-21 Altura de la fundición.....	70
Figura 4-22 Diámetro de la fundición.....	70
Figura 4-23 Masa de la fundición .....	71
Figura 4-24 Altura de la fundición.....	72
Figura 4-25 Diámetro de la fundición.....	72
Figura 4-26 Espectrómetro Burkner.....	73
Figura 4-27 Cabeza del pistón una vez realizado el análisis de espectrometría ...	75

Figura 4-28 Faldón del pistón una vez realizado el análisis de espectrometría....	75
Figura 4-29 Fundición del pistón una vez realizado el análisis de espectrometría	76
Figura 4-30 Análisis Espectrométrico de la composición de la cabeza del pistón	77
Figura 4-31 Análisis Espectrométrico de la composición de la cabeza del pistón	78
Figura 4-32 Análisis Espectrométrico de la composición de la faldón del pistón	79
Figura 4-33 Análisis Espectrométrico de la composición de la cabeza del pistón	80
Figura 4-34 Análisis Espectrométrico de la composición de la faldón del pistón	81
Figura 4-35 Análisis Espectrométrico de la composición de la fundición del pistón.....	82
Figura 4-36 Horno de Inducción para fundir materiales.....	83
Figura 4-37 Diagrama de flujo del proceso de fundición. ....	84
Figura 4-38 Platinas Fundidas puestas en la máquina CNC para el corte. ....	85
Figura 4-39 Router CNC.....	85
Figura 4-40 Corte de la pieza en la máquina Router CNC .....	86
Figura 4-41 Probeta.....	89
Figura 4-42 Curva esfuerzo Número de ciclos .....	91
Figura 4-43 Relación Esfuerzo vs Log Número de ciclos .....	92
Figura 4-44 Relación Log Esfuerzo vs Log Número de ciclos.....	92
Figura 4-45 Relación Esfuerzo corregido – Log N.....	97
Figura 4-46 Curva de probabilidad .....	101
Figura 5-1 Tipo de falla en probeta de aluminio.....	103
Figura 6-1 Inserción del descoriador.....	109
Figura 6-2 Inserción del desgasificador .....	109
Figura 6-3 Eliminación de escorias.....	110
Figura 6-4 Calentamiento del tubo.....	110

Figura 6-5 Medición de la temperatura en la colada.....	111
Figura 6-6 Medición de la temperatura dentro del tubo.....	111
Figura 6-7 Retirar el crisol .....	112
Figura 6-8 Vertir la colada en el tubo .....	112
Figura 6-9 Compresión de la probeta.....	113
Figura 6-10 Cilindro de pared gruesa.....	113
Figura 6-11 Planteamiento de equilibrio del cilindro de pared gruesa .....	114
Figura 6-12 Deformación del cilindro de pared gruesa .....	116
Figura 6-13 Cilindro de pared gruesa internamente presurizado, que muestra los esfuerzos circunferencial ( en el aro) y radial para diferentes valores del radio. 121	121
Figura 6-14 Rosca Acme.....	128
Figura 6-15 Fotografía de la probeta compactada a 100x.....	130
Figura 6-16 Fotografía de la probeta compactada a 200x.....	131
Figura 6-17 Diagrama de fase del aluminio silicio .....	132

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin.....	16
Tabla 2-2 Factor de Tamaño <b><i>K<sub>b</sub></i></b> .....	16
Tabla 2-3 Composición química de la aleación base .....	19
Tabla 3-1 Operacionalización de Variable Independiente .....	40
Tabla 3-2 Variable Dependiente: Determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos. ....	41
Tabla 4-1 Parámetros utilizados en el horno de inducción. ....	83
Tabla 4-2 Determinación de la frecuencia de aplicación de cargas .....	87
Tabla 4-3 Datos Estadísticos para las revoluciones del motor.....	87
Tabla 4-4 Datos Estadísticos para la frecuencia .....	88
Tabla 4-5 Datos del ensayo de aluminio .....	90
Tabla 4-6 Tabla para el cálculo de regresión .....	95
Tabla 4-7 Datos para la realización de demostración de la hipótesis .....	100
Tabla 6-1 Costos del material para ensayos .....	134



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO A FATIGA MECÁNICA DE FUNDICIONES DE ALUMINIO  
OBTENIDA DE CHATARRA DE PISTONES DE BUSES HINO FG PARA  
DETERMINAR EL DIAGRAMA ESFUERZO-NÚMERO DE CICLOS**

**Autor:** Egda. Tainy León Guerrero

**Tutor:** Ing. Mg. Jorge Guamanquispe T

**Fecha:** Enero del 2016

**RESUMEN EJECUTIVO**

El presente trabajo de investigación fue realizado con el afán de aprovechar la gran cantidad de chatarra de aluminio que se desperdicia producto de la reparación de motores de vehículos Hino FG. En la parte investigativa se determinó la relación que existe entre el esfuerzo a flexión y el número de ciclos.

Durante el desarrollo de las pruebas se pudo determinar que el ensayo a flexión de viga rotatoria no es posible debido a la falta de exactitud de la máquina de ensayo disponible, por lo que para determinar las curvas de Wohler, se utilizó el método de ensayo con viga en cantiléver con esfuerzos totalmente invertidos con una frecuencia de 30hz, de la misma manera se realizaron ensayos de espectrometría en la cual se puede observar que los valores de los elementos químicos coinciden con los que encontramos en fuentes, igualmente se realizaron ensayos de metalografía tanto para la fundición como para el pistón y mediante el método del t de student se pudo determinar la hipótesis.

Se determinó que el número de ciclos hasta la falla es muy bajo se analizó los parámetros que influían en el estudio y se llegó a determinar que el más importante es la calidad de material, por lo que en el capítulo 6 se propone analizar el proceso para obtener un mejor material.

Descriptores: Fatiga, esfuerzo, deformación, cargas, límite de fatiga, ciclos.

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 TEMA:**

“ESTUDIO A FATIGA MECÁNICA DE FUNDICIONES DE ALUMINIO OBTENIDA DE CHATARRA DE PISTONES DE BUSES HINO FG PARA DETERMINAR EL DIAGRAMA ESFUERZO-NÚMERO DE CICLOS”

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

##### **1.2.1 Contextualización**

Medina Párraga, J. A. (2010) en su Tesis de maestría, menciona que a nivel mundial las reservas de metales son limitadas y especialmente en China e India su consumo ha aumentado, por lo que es de prioritaria importancia la recuperación de chatarra, para lo cual se creyó conveniente obtener datos experimentalmente de las fundiciones de aluminio, los mismos que servirán para reducir las fallas mecánicas que se producen en elementos de máquinas producidas por un diseño inadecuado por falta de datos.

En 1910, Bairstow verificó mediante experimentos la teoría de Baushinger de que los límites elásticos del hierro y el acero pueden cambiar, hacia arriba o hacia abajo, mediante las variaciones cíclicas del esfuerzo. (Bairstow, 1910)

R.W. Landgraf investigó el comportamiento de la fatiga con bajos ciclos de un gran número de aceros de alta resistencia. Durante la investigación hizo muchas gráficas

de esfuerzo-número de ciclos cíclicos. (R.W.Landgraf, 1968)

Palas, M. A. (2012) de la universidad de Piura, sostiene que el reciclaje de aluminio en Norte América y Europa es una actividad económica bien desarrollada.

A nivel nacional se genera una gran cantidad de chatarra de pistones de vehículos pesados producto de la reparación de los motores, cuyos pistones por lo general son botados a la basura.

En el Ecuador no existen estudios realizados sobre fatiga mecánica de las fundiciones de chatarra de aluminio, sin embargo a nivel mundial existen estudios similares para otros materiales, los que nos servirán como base para nuestro estudio.

### **1.2.2 Análisis crítico**

Hoy en día en nuestro país existe un limitado estudio sobre ensayos de fatiga en el aluminio que se puede recuperar de chatarra ya que la industria metalmecánica no se ha preocupado por explorar datos de la resistencia que pueda tener dicho material. Es importante tener dicha información ya que a diario se desecha este material, lo cual puede ser utilizado en otras áreas ayudando así a reducir costos por importación del mismo. Otro de los problemas que abarca es que se lo puede utilizar aplicando elevadas cargas oscilantes a grandes esfuerzos para así reemplazarlos por piezas mecánicas y en estructuras ya que ha producido grandes desastres por grietas y fracturas y resulta de gran importancia conocer fundamentos de esfuerzo-número de ciclos. (Shigley, 2008)

### **1.2.3 Prognosis**

Con los resultados obtenidos de este estudio se pretende disminuir el volumen de pistones desechados y botados a la basura, ya que al conocer la relación entre esfuerzo y número de ciclos este material se podrá utilizar en el diseño de estructuras y en el diseño de piezas mecánicas. La presente investigación se ha realizado con bajos costos ya que el aluminio de chatarra es desechado a diario.

Fue factible realizar ya que en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la UTA se dispone de los equipos necesarios, tales como la máquina para ensayos a fatiga de Moore, horno de inducción, microscopio de barrido óptico, espectrómetro, otros necesarios para la presente investigación y máquina de fatiga para viga en cantiléver.

Fue de mucha importancia profundizar y desarrollar la presente investigación ya que los ingenieros podrán diseñar máquinas más seguras y de vida útil larga, ya que actualmente es necesario obtener datos más precisos y confiables en los ensayos.

#### **1.2.4 Formulación del problema**

Mediante un estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de buses Hino FG se determinará el diagrama esfuerzo-número de ciclos?

#### **1.2.5 Pregunta directrices**

¿Se podrá determinar el esfuerzo necesario para producir fatiga en las probetas de fundición de chatarra de pistones de buses Hino FG?

¿Se podrá comparar la composición metalográfica de la chatarra y de la fundición de aluminio?

¿Se podrá determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos?

¿Se puede determinar la densidad de la chatarra y de la fundición?

#### **1.2.6 Delimitación del problema**

##### **1.2.6.1 Delimitación Temporal**

La presente investigación fue desarrollado durante el período comprendido entre

Enero 2015-Enero 2016.

### **1.2.6.2 Delimitación Espacial**

La investigación del estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de aluminio de buses Hino FG para determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos será desarrollada en la Universidad Técnica de Ambato en la Facultad de Ingeniería Mecánica Provincia de Tungurahua Cantón Ambato Campus Huachi Chico.

### **1.2.6.3 Delimitación de Contenido**

El presente trabajo de investigación sobre fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra para determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos está enmarcada dentro del campo de la Ingeniería Mecánica, área de Diseño Mecánico y específicamente Materiales.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El presente proyecto fue justificado por muchas razones, la primera es que se pudo determinar el comportamiento a fatiga mecánica de la chatarra de aluminio obtenida de pistones de buses Hino FG, los mismos que nos sirvieron para realizar la curva esfuerzo número de ciclos (S-N) lo cual es de vital importancia en la industria tanto metalmecánica como automotriz, los mismos que serán utilizados para realizar mejores diseños de piezas sometidas a esfuerzos cíclicos.

La información fue obtenida con un bajo costo por dos razones fundamentales, en nuestro medio la chatarra es desecha y la segunda es que en la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la UTA se dispone de la máquina de ensayos con viga empotrada, además de que el proceso para obtener las probetas es por demás sencillo, sólo se requiere un horno de crisol con refractario y máquinas herramientas elementales para el maquinado de las probetas.

El tiempo invertido en el estudio también es compensado grandemente ya que los conocimientos obtenidos pueden aportar en futuras investigaciones, ya sea con los mismos materiales como con otros, además de que los datos obtenidos no existían anteriormente.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General:**

Realizar un estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio de chatarra de pistones de buses Hino FG para determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos.

### **1.4.2 Objetivos Específicos:**

Determinar el esfuerzo a fatiga por flexión generado en las probetas de fundición de chatarra de pistones de buses Hino FG.

Comparar la composición metalográfica de la chatarra y la fundición de aluminio

Determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos.

Determinar la densidad de la chatarra y de la fundición.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

##### **2.1.1 Antecedentes**

Los estudios de fatiga en el mundo se realizaban con algunos elementos de máquina de ferrocarriles para realizar la ruptura en dichos ensayos. Las distintas pruebas efectuadas con diversas teorías y la creación de máquinas.

En la Universidad Técnica de Ambato en el año 2013 el Señor Carlos Simbaña en su trabajo de grado titulada “Estudio de fatiga en ciclos altos en el acero 1045 para determinar la ocurrencia de falla cumpliendo normas ASTM E-606” realizó estudios para la determinación de fallas en fatiga en forma rotativa aplicando definiciones de resistencia, con carga variable aplicada a la probeta concluyendo que mientras la carga aumenta el número de ciclos disminuye y mientras la carga disminuye, el número de ciclos aumenta. En este caso en los ensayos que se realizarán en las fundiciones de aluminio determinará el número de ciclos que tendrá que girar la probeta hasta la rotura, medida necesaria para determinar la curva esfuerzo-número de ciclos.

Chango Moreta David Misael y Sisa Simbaña Roberto Marcelo de la Escuela Politécnica del Ejército han desarrollado como base de investigación el “Diseño y construcción de una máquina para realizar ensayo de fatiga por flexión rotativa utilizando PC”, en dicho estudio se comprobó que en la máquina de Moore se logra

visualizar los diagramas S-N (Resistencia a la Fatiga - Número de Ciclos) y se obtuvo el límite de resistencia a la fatiga en el acero ensayado ayudando a entender el fenómeno de fatiga que se dan en elementos de máquinas.

## **2.1.2 Fundamento Teórico**

### **2.1.2.1 Fatiga de los materiales**

Se denomina fatiga a una fractura frágil, dado que las superficies de la fractura son planas y perpendiculares al eje de esfuerzos con la ausencia de generación de cuellos. Las características de la fractura de una falla por fatiga son diferentes a la fractura frágil estática. (Shigley, 2008)

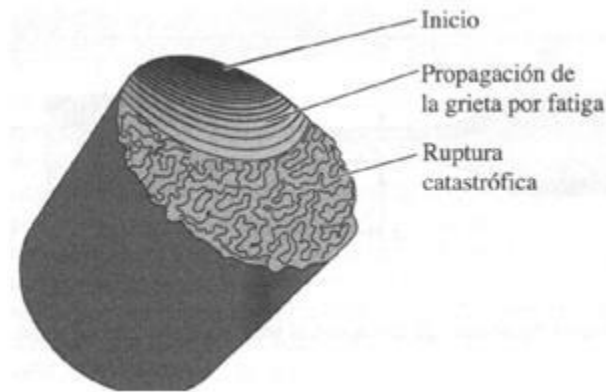
El material se degenera bajo cargas cíclicas induciendo a la rotura del mismo. El número de ciclos que se requerirá depende de la carga que se aplica, presencia de entallas. Poco a poco se va dañando la pieza con cada ciclo aplicado.

A medida que se va aumentando el número de ciclos aparece una fisura provocando la rotura por fatiga. Surgen a partir de tres etapas de desarrollo. (Callister, 2002)

**2.1.2.1.1 Etapa I.** Inicio de una o más microgrietas debido a la deformación plástica cíclica seguida de propagación cristalográfica que se extiende de dos a cinco granos alrededor del origen. Normalmente las grietas de la etapa I no pueden verse a simple vista.

**2.1.2.1.2 Etapa II.** Las microgrietas se convierten en macrogrietas y forman superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas longitudinales. Por lo general las mesetas son suaves y normales a la dirección del esfuerzo máximo en tensión. Estas superficies pueden tener marcas oscuras y claras conocidas como marcas de playa o marcas de concha como se puede ver en la figura 2.1. Durante las cargas cíclicas, estas superficies con grietas se abren y cierran, frotándose entre sí y la aparición de las marcas de playa dependen de los cambios en el nivel de la frecuencia de carga y la naturaleza corrosiva del entorno.





*Figura 2-1 Esquema de propagación de grieta en un material dúctil.*

*Fuente: Askeland (2013).*

**2.1.2.1.3 Etapa III.** Ocurre durante el ciclo del esfuerzo final cuando el material restante no puede soportar las cargas, lo que resulta en una fractura súbita y rápida, puede ser frágil, dúctil o una combinación de ambas. Con mucha frecuencia las marcas de playa, si existen, y los patrones posibles de fractura en la etapa III llamadas líneas de chevron, apuntan hacia los orígenes de las grietas iniciales.

La vida a fatiga se puede definir como el “fallo debido a cargas repetitivas que incluye la iniciación y propagación de una grieta y conjunto de grietas hasta el fallo final por fractura” (Fuchs, 1980).

## **2.1.2.2 Tipos de fatiga**

### **2.1.2.2.1 Fatiga estática**

La fatiga estática se da cuando un esfuerzo cíclico y ataque químico se da simultáneamente. El medio corrosivo tiene una influencia negativa y disminuyen la vida a fatiga, también la atmósfera normal daña a distintos elementos. Gracias a ello se producen grietas y fisuras que actuarán como concentradoras de tensiones originando grietas.

### **2.1.2.3 Proceso de fatiga**

#### **2.1.2.3.1 Inicio**

Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre se dan sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión.

Los esfuerzos repetidos pueden producir discontinuidades superficiales a partir de avances que se dan por causa de deslizamiento, los mismos que actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como los sitios donde aparecen las grietas.

#### **2.1.2.4 Propagación de la grieta**

**2.1.2.4.1 Etapa I:** una vez que aparezca la grieta, esta se propaga muy paulatinamente.

**2.1.2.4.2 Etapa II:** la velocidad de la grieta se extiende de manera acelerada y en este sitio la grieta deja de seguir en el eje del esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta aumenta a causa de los ciclos de tensión.

#### **2.1.2.5 Velocidad de Propagación**

La vida de un componente estructural puede relacionarse con la velocidad de crecimiento de la grieta. La velocidad de propagación de la grieta es una función del nivel de tensión y de la amplitud de la misma.

$$\frac{d_a}{d_N} = A(\Delta K)^m$$

Ecuación 2. 1

En donde:

A, m constantes del material

K Factor de intensidad de tensiones

$\frac{da}{dN}$  Pendiente de la curva del aumento de crecimiento de la grieta.

El valor de  $m$  está entre 1 y 6, depende del material.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

Ecuación 2. 2

También:

Desarrollando las anteriores ecuaciones a partir de gráficas originadas por las mismas, se llega a la siguiente ecuación:

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

Ecuación 2. 3

En donde:

$N_f$  : Número de ciclos hasta la rotura

$Y$  : Medida independiente de la longitud de la grieta

$m, A$ : Medida definida por el material

$a$  : Longitud crítica de la grieta

$a_0$  : Longitud inicial de la grieta

$a_c$  :se calcula de la siguiente manera:

$$a_c = \left( \frac{K_I C}{\sigma Y \sqrt{\pi}} \right)^2$$

Ecuación 2. 4

En dónde:

$K_I C$  Tenacidad de fractura de deformaciones planas

Paúl C. Paris creó estas ecuaciones matemáticas en 1961 con una gráfica logarítmica log-log de la velocidad de crecimiento de grieta vs. el factor de intensidad de tensiones exponiendo una relación lineal en la gráfica. Con la gráfica se pueden efectuar predicciones cuantitativas sobre la duración que tendrá la probeta en un tamaño de grieta particular.

#### 2.1.2.6 Rotura

La probeta llega a un parámetro crítico de la grieta y se produce la rotura. Ocurre muy rápidamente.

La vida a fatiga del material está dada por la siguiente ecuación:

$$N_f = N_i + N_p$$

Ecuación 2. 5

En donde:

$N_f$  = Número total de ciclos hasta la fractura

$N_i$  = Número de ciclos de iniciación de la grieta

$N_p$  = Número de ciclos para la propagación de la grieta

La etapa final es insignificante por lo que se da muy rápido. Los valores de  $N_i$   $N_p$  dependen del material y de las condiciones de ensayo. (CALLISTER, 2002)

### 2.1.2.7 Límite de resistencia a la fatiga

La relación  $\Phi = \frac{S_e}{S_{ut}}$  se denomina relación de fatiga. (Shigley, 2008).

Es la capacidad de resistir cargas de fatiga, si la cantidad de ciclos es infinita, el valor de esfuerzo se llama límite de fatiga. (MOOT, 2006)

Por lo general está dado por el diagrama S-N (Esfuerzo- Número de ciclos).

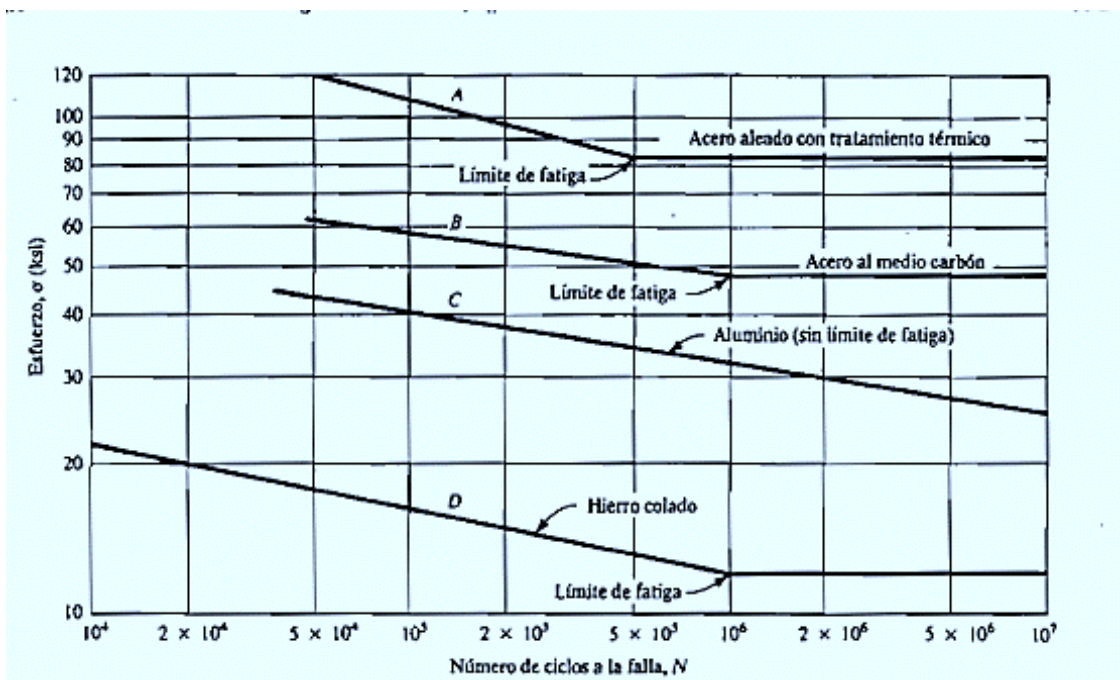
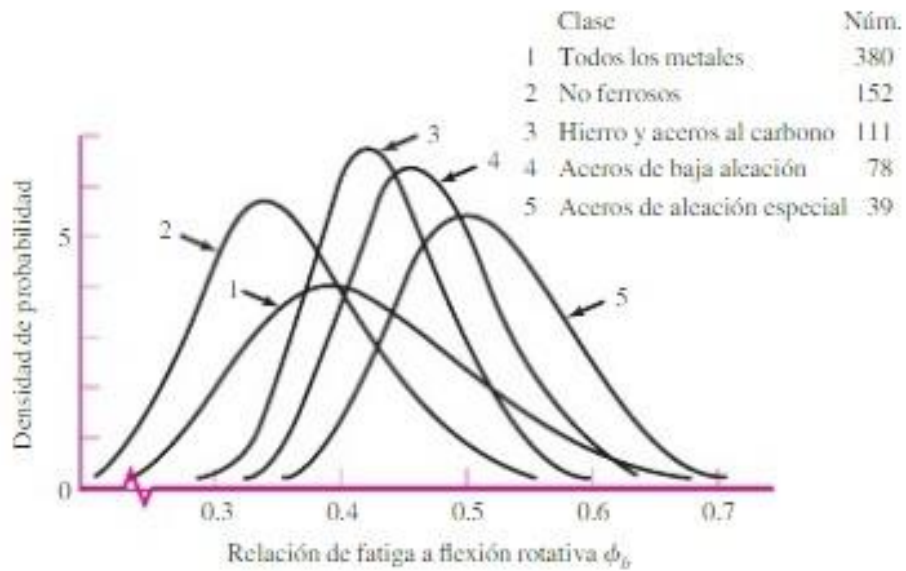


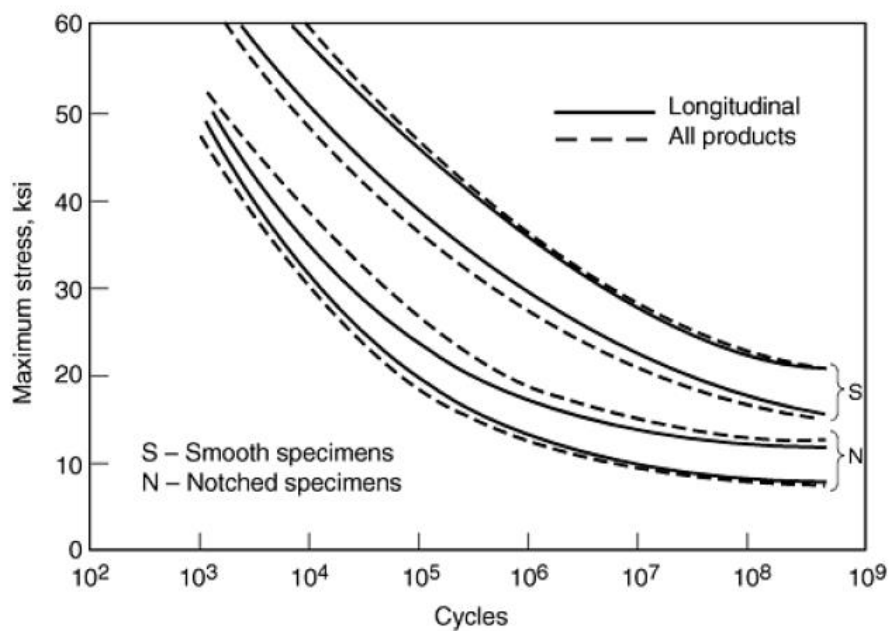
Figura 2-2 Resistencias a la fatiga representativas

Fuente: Diseño de Elementos de Máquinas de Moot



**Figura 2-3** Probabilidad de densidad FDP log-normal de la relación de fatiga  $\Phi_b$  de Gough

**Fuente:** Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley



**Figura 2-4** Diagrama S-N para las aleaciones de aluminio 2014-T6

**Fuente:** MetalHandbook Volumen 19

Para el caso de viga rotativa se presentan los siguientes datos:

$$S'_e = 0.506 S_{ut} LN(1,0,138) \text{ kpsi o Mpa} \quad S_{ut} \leq 212 \text{ kpsi (1460 MPa)}$$

$$S'_e = 107LN(1,0,139)kpsi \quad S_{ut} > 212 kpsi$$

$$S'_e = 740 LN (1,0,139)MPa \quad S_{ut} > 1460 MPa$$

### 2.1.2.8 Factores que reducen el límite de fatiga

Se ha visto que la muestra para el ensayo en máquina rotativa en el laboratorio para determinar los límites de resistencia a la fatiga se prepara con mucho cuidado y se ensaya bajo condiciones muy controladas. No es posible esperar que el límite de resistencia a la fatiga de un elemento mecánico o estructural iguale los valores que se obtuvieron en el laboratorio. (Shigley, 2008)

Algunas diferencias incluyen:

- Material: composición, base de falla, variabilidad.
- Manufactura: método, tratamiento térmico, corrosión superficial por frotamiento, acabado superficial, concentración de esfuerzo.
- Entorno: corrosión, temperatura, estado de esfuerzos, tiempos de relajación.
- Diseño: tamaño, forma, vida, estado de esfuerzos, concentración de esfuerzo, velocidad, rozamiento, excoiación.

Marín identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, el tamaño, la carga, la temperatura y varios otros puntos. (MARIN, 1962). La cuestión respecto de ajustar el límite de resistencia a la fatiga por medio de correcciones sustractivas o multiplicativas se resolvió mediante un extenso análisis estadístico del acero 4340 (horno eléctrico, calidad de aeronave), en el que se determinó un coeficiente de correlación de 0.85 para la forma multiplicativa, y 0.40 para la forma aditiva. Por lo tanto, la ecuación de Marín se escribe:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e$$

Ecuación 2. 6

Donde:

- $K_a$  = factor de modificación de la condición superficial
- $K_b$  = factor de modificación del tamaño
- $K_c$  = factor de modificación de la carga
- $K_d$  = factor de modificación de la temperatura
- $K_e$  = factor de confiabilidad
- $K_f$  = Factor de modificación de efectos varios
- $S'_e$  = Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria
- $S_e$  = Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

#### **2.1.2.9 Factor de superficie $K_a$**

La superficie de una muestra de viga rotativa está muy pulida y además se le da un pulido final en la dirección axial para eliminar cualquier rayadura circunferencial. El factor de modificación depende de la calidad del acabado de la superficie de la parte y de la resistencia a la tensión. A fin de determinar expresiones cuantitativas para acabados comunes de parte de máquinas (esmerilada, maquinada o estirada en frío, laminada en caliente y forjada), las coordenadas de los puntos de datos se recopilaron nuevamente de una gráfica del límite de resistencia a la fatiga contra la resistencia última a la tensión a partir de datos recolectados por



Nipson y reproducidos por Horguer. (NOLL, 1953)

$$k_a = aS_{ut}^b$$

Ecuación 2. 7

Donde  $S_{ut}$  es la resistencia mínima a la tensión y los valores de a y b se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2-1 Parámetros en el factor de la condición superficial de Marín

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	$S_{ut}$ (Kpsi)	$S_{ut}$ (MPa)	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272	-0.995

Fuente: (NOLL, 1953)

### 2.1.2.10 Factor de tamaño $k_b$

Para torsión y flexión se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2-2 Factor de Tamaño  $K_b$

$k_b = \left(\frac{d}{0.3}\right)^{-0.107} - 0.879d^{-0.107}$	$0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg}$
$k_b = 0.91d^{-0.157}$	$2 < d \leq 10 \text{ pulg}$
$k_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} - 1.24d^{-0.107}$	$2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$
$k_b = 1.51d^{-0.157}$	$51 < d \leq 254 \text{ mm}$

Fuente: (MISHKE, 1 de enero 1987)

Para cargas axiales no existe efecto de tamaño por lo que:

$$k_b = 1$$

#### 2.1.2.11 Factor de confiabilidad $k_c$

Los valores de  $k_c$  para diferentes tipos de carga son:

*1 flexión*

*0,85 axial*

*0,59 torsión*

#### 2.1.2.12 Factor de temperatura $k_d$

Si conocemos el límite de resistencia a la fatiga y trabajamos a condiciones en temperatura ambiente tenemos que:

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad \text{Ecuación 2. 8}$$

#### 2.1.2.13 Factor de confiabilidad $k_e$

Los datos que presentaron Haugen y Wirching muestran desviaciones estándar de la resistencia a la fatiga de menos de 8%. El factor de confiabilidad se escribe como: (Haugen, 1975)

$$k_e = 1 - 0.08Z_a \quad \text{Ecuación 2. 9}$$

#### 2.1.2.14 Factor de efectos varios $k_f$

- Para este factor se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Recubrimiento electrolítico
- Metalizado por aspersion
- Corrosión
- Corrosión por frotamiento
- Frecuencia cíclica
- Depende del material y de los pares de acople y se encuentra en el rango de 0,24 a 0,90

### **2.1.2.15 Aleaciones de aluminio para pistones**

El aluminio es el elemento importante que se utiliza al fabricar los pistones de los automóviles.

Las aleaciones de aluminio son de: aluminio-cobre-níquel (o hierro), aluminio-silicio, aluminio-cobre.

Las aleaciones que más se utilizan son las de aluminio silicio, ya que ofrecen buena resistencia mecánica y coeficiente de dilatación bajo, y un alto coeficiente de conductividad térmica.

Silicio es el elemento base de la aleación aluminio-silicio, tiene buena fluidez y poca contracción, y se convierten en colabilidad y buena soldabilidad.

El silicio tiene bajo coeficiente de expansión térmica que nos sirve en la fabricación de pistones, con elevada dureza de las partículas de silicio tiene buena resistencia al desgaste.

Tabla 2-3 Composición química de aleaciones de aluminio para pistones MAHLE (porcentaje en peso).

	M124	M126	M138	M244
	AlSi12CuMgNi	AlSi16CuMgNi	AlSi18CuMgNi	AlSi25CuMgNi
Si	11.0–13.0	14.8–18.0	17.0–19.0	23.0–26.0
Cu	0.8–1.5	0.8–1.5	0.8–1.5	0.8–1.5
Mg	0.8–1.3	0.8–1.3	0.8–1.3	0.8–1.3
Ni	0.8–1.3	0.8–1.3	0.8–1.3	0.8–1.3
Fe	max. 0.7	max. 0.7	max. 0.7	max. 0.7
Mn	max. 0.3	max. 0.2	max. 0.2	max. 0.2
Ti	max. 0.2	max. 0.2	max. 0.2	max. 0.2
Zn	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.2
Cr	max. 0.05	max. 0.05	max. 0.05	max. 0.6
Al	remainder	remainder	remainder	remainder
	M142	M145	M174+	M-SP25
	AlSi12Cu3Ni2Mg	AlSi15Cu3Ni2Mg	AlSi12Cu4Ni2Mg	AlCu2.5Mg1.5FeNi
Si	11.0–13.0	14.0–16.0	11.0–13.0	max. 0.25
Cu	2.5–4.0	2.5–4.0	3.0–5.0	1.8–2.7
Mg	0.5–1.2	0.5–1.2	0.5–1.2	1.2–1.8
Ni	1.75–3.0	1.75–3.0	1.0–3.0	0.8–1.4
Fe	max. 0.7	max. 0.7	max. 0.7	0.9–1.4
Mn	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.2
Ti	max. 0.2	max. 0.2	max. 0.2	max. 0.2
Zn	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.3	max. 0.1
Zr	max. 0.2	max. 0.2	max. 0.2	–
V	max. 0.18	max. 0.18	max. 0.18	–
Cr	max. 0.05	max. 0.05	max. 0.05	–
Al	remainder	remainder	remainder	remainder

Fuente: (Mahle GmbH, 2012, p. 64)

### 2.1.2.16 Esfuerzo

El esfuerzo se divide la fuerza y el área en la que se aplica.

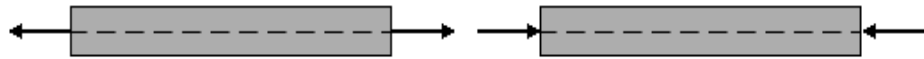
En algunos casos, como en el esfuerzo normal directo, la fuerza aplicada se reparte uniformemente en la totalidad de la sección transversal del miembro; en estos casos el esfuerzo puede calcularse con la simple división de la fuerza total por el área de la parte que resiste la fuerza, y el nivel del esfuerzo será el mismo en un punto

cualquiera de una sección transversal cualquiera. En otros casos, como en el esfuerzo debido a flexión, el esfuerzo variará en los distintos lugares de la misma sección transversal, entonces el nivel de esfuerzo se considera en un punto. (MOOT, 2006)

### 2.1.2.17 Tipos de esfuerzos

#### 2.1.2.17.1 Tracción

Un cuerpo se somete a dos fuerzas en sentidos contrarios y a dicho objeto lo estiran disminuyendo el área y aumentando la longitud.



*Figura 2-5 Esfuerzo y deformación uniaxial*

*Fuente: (SALAZAR, 2011)*

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

#### 2.1.2.17.2 Compresión

Un cuerpo se somete a dos fuerzas en sentidos contrarios y dicho objeto lo comprimen disminuyendo la longitud y aumentando el área.

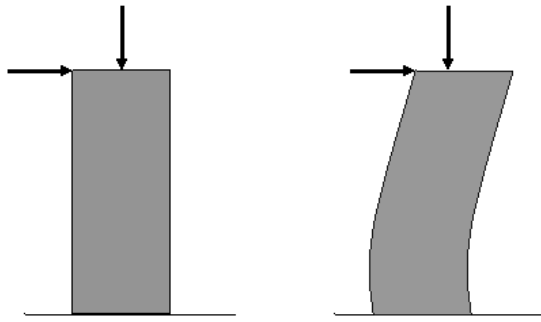


Figura 2-6 Esfuerzo y deformación combinados

Fuente: (SALAZAR, 2011)

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

### 2.1.2.17.3 Flexión

Son fuerzas que actúan paralelas al plano que se encuentra el objeto. El cuerpo se tiende a doblar y está sometido a tracción y a compresión.

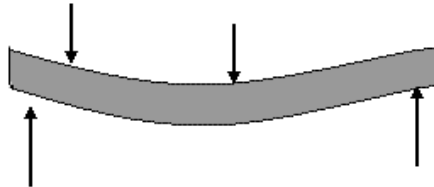


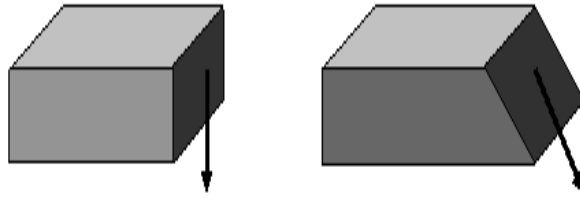
Figura 2-7 Esfuerzo y deformación por flexión

Fuente: (SALAZAR, 2011)

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

### 2.1.2.17.4 Cortante

Un cuerpo se somete a dos fuerzas en sentidos opuestos, el objeto se tiende a cortar y se encuentran en: remaches, soldaduras y tornillos.



*Figura 2-8 Esfuerzo Cortante*

*Fuente: (SALAZAR, 2011)*

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

#### **2.1.2.18 Esfuerzos producidos en la máquina de Moore**

La máquina de R.R. Moore se utiliza para obtener datos de ensayos para fatiga en viga rotativa.

Las partes de las que consta la máquina de R.R. Moore son:

- Motor
- Sistema de aplicación de la carga
- Mordazas
- Acoples
- Rodamientos fijos
- Rodamientos móviles

Por medio de pesas la máquina de R.R. Moore se somete a flexión pura. A la misma vez se utiliza para ver la resistencia del material al someterse a cargas repetidas.

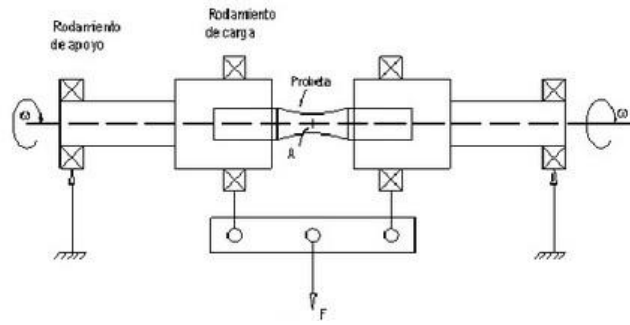


Figura 2-9 Máquina de R.R. Moore

Fuente: (MOOT, 2006)

### 2.1.2.19 Esfuerzo aplicado

Para calcular el esfuerzo aplicado que se genera en la probeta necesitamos encontrar tanto la fuerza cortante como el momento flector:

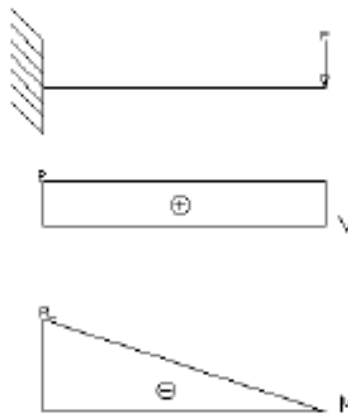


Figura 2-10 Viga en flexión

Fuente: Tesis de Maestría UTA (Ing. Guamanquispe Jorge)

Los mismos que generan:

Esfuerzos normales:



$$\sigma_x = \frac{Mc}{I}$$

Ecuación 2. 10

Esfuerzos Tangenciales:

$$\tau_{xy} = \frac{VQ}{bI}$$

Ecuación 2. 11

Y la gráfica sinusoidal se presenta a continuación:

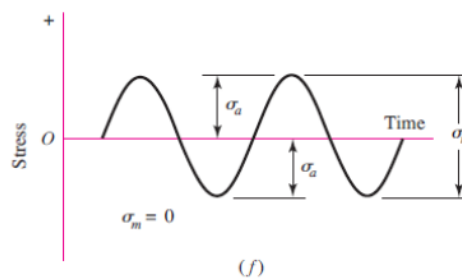


Figura 2-11 Amplitud de Esfuerzos

**Fuente:** Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley

Donde Tenemos que:

$\sigma_x =$  Esfuerzo Normal

$\sigma_m =$  Esfuerzo Medio

$\sigma_a =$  Amplitud de Esfuerzo

$\tau_{xy} =$  Esfuerzo Tangencial

$M =$  Momento Flector

$c =$  Distancia desde el eje neutro hasta las fibras externas de el eje

$I = \text{Momento de Inercia}$

$V = \text{Fuerza Cortante}$

$Q = \text{Momento estático}$

$D = \text{Diámetro}$

Donde tenemos que el momento de inercia es:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 2. 12}$$

Considerando:

$t = \text{espesor de la probeta}$

$$C = \frac{t}{2} \quad \text{Ecuación 2. 13}$$

Reemplazando en la Ecuación 2.1 podremos encontrar el momento flector:

$$\sigma_x = \frac{6M}{bt^2} \quad \text{Ecuación 2. 14}$$

#### **2.1.2.20 Análisis a fatiga por flexión en viga en cantiléver**

Mediante el método de las secciones se ha realizado un análisis de deflexión para lo cual se procederá a realizar un corte a una distancia X desde el extremo izquierdo por lo cual el momento flector es el siguiente:

$$M = P(X - L)$$

Aplicando el método diferencial tenemos la siguiente ecuación de segundo grado:

$$EIY''' = M \quad \text{Ecuación 2. 15}$$

Reemplazando obtenemos lo siguiente:

$$EIY''' = P(X - L) \quad \text{Ecuación 2. 16}$$

Integrando dos veces se obtiene:

$$EIY'' = \frac{P(X - L)^2}{2} + C_1$$

$$EIY' = \frac{P(X - L)^3}{6} + C_1X + C_2$$

Tenemos que las constantes C1 y C2 valen cero para el caso del empotramiento:

$$EIY'' = \frac{P(X - L)^2}{2} \quad \text{Ecuación 2. 17}$$

$$EIY' = \frac{P(X - L)^3}{6} \quad \text{Ecuación 2. 18}$$

Por lo tanto tenemos que la deformación en cualquier punto de la viga es:

$$Y = \frac{P(X - L)^3}{6EI}$$

Ecuación 2. 19

### 2.1.2.21 Inversión de esfuerzos

Ocurre una inversión de esfuerzo cuando determinado elemento de un miembro portátil se somete a cierto valor de esfuerzo de tensión, seguido por el mismo valor de esfuerzo de compresión. Si este ciclo de esfuerzos se repite muchas miles de veces, al esfuerzo se le llama repetido e invertido. La siguiente figura muestra el diagrama de esfuerzo en función del tiempo cuando el esfuerzo es repetido e invertido. Como  $\sigma_{min} = -\sigma_{máx}$  la relación de esfuerzos es  $R = -1.0$  y el esfuerzo promedio es cero. (MOOT, 2006)

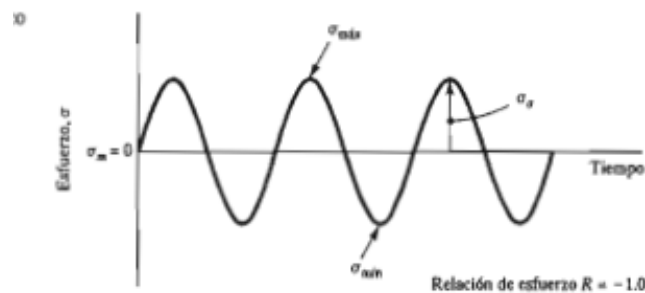


Figura 2-12 Esfuerzo repetido e invertido

**Fuente:** Diseño de Elementos de Máquinas de Moot

Un ejemplo importante en el diseño de máquinas es el de un eje redondo giratorio cargado en flexión como en el de la figura 2.13 en la posición que se muestra, un elemento en la parte inferior del eje tiene esfuerzo de tensión, mientras que uno en la parte superior tiene un esfuerzo de compresión, de igual magnitud. Cuando el eje gira 180° respecto a la posición que tiene en la figura estos dos elementos tienen una inversión completa de esfuerzos. Ahora si el eje continúa girando, todas las partes en flexión ven esfuerzos invertidos repetitivos. Esta es una descripción del caso clásico de carga de flexión invertida (Moot, 2006).

Con frecuencia a este tipo de carga se llama carga de fatiga, y a una máquina del tipo que se muestra en la figura 2 se le llama aparato para pruebas de R.R. Moore. Estas máquinas se usan para probar la capacidad de un material para resistir cargas repetidas. De esta forma se mide la propiedad del material llamada resistencia a la fatiga. (MOOT, 2006)

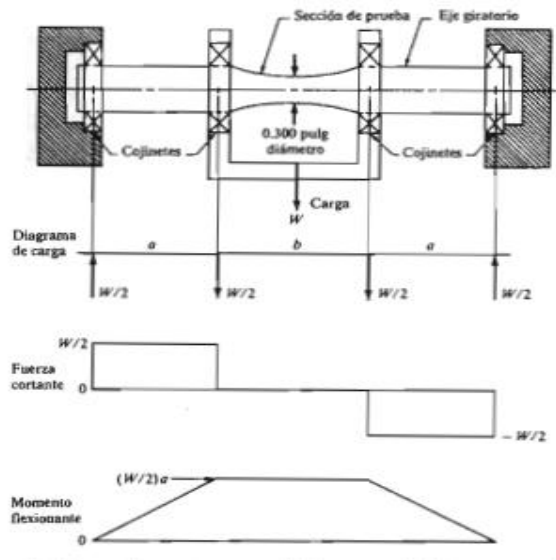


Figura 2-13 Pruebas de fatiga de R. R Moore

Fuente: Diseño de Elementos de Máquinas de Moot

Rango de esfuerzos  $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$$

Ecuación 2. 20

Componente alternante de esfuerzos  $\sigma_a$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}}{2}$$

Ecuación 2. 21

Componente medio de esfuerzos  $\sigma_m$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} \quad \text{Ecuaci3n 2. 22}$$

Por lo tanto se pueden formar dos relaciones:

Relaci3n de esfuerzos R:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecuaci3n 2. 23}$$

Relaci3n de amplitud A:

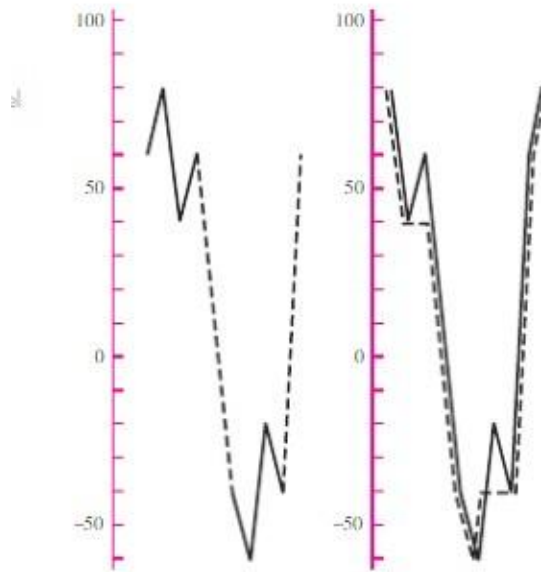
$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad \text{Ecuaci3n 2. 24}$$

#### **2.1.2.22 Cargas c3clicas**

Cuando un miembro port3til est3 sometido a un esfuerzo alternativo con promedio distinto de cero, la carga produce un esfuerzo fluctuante.

Un esfuerzo completamente reversible compuesto de n ciclos en una parte de la m3quina en una ubicaci3n cr3tica se somete a:

Un esfuerzo completamente reversible  $\sigma_1$  durante  $n_1$  ciclos,  $\sigma_2$  durante  $n_2$  ciclos,  $\sigma_3$  durante  $n_3$  ciclos. Una recta de tiempo oscilatoria de esfuerzo que presenta muchos picos y valles.



*Figura 2-14 Diagrama de esfuerzo variable preparado para evaluar el daño acumulado*

*Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*

Los métodos para contar ciclos incluyen:

- Números de picos de tensión de la falla.
- Todos los máximos arriba de la media y los mínimos globales entre cruces debajo de la media.
- Todos los cruces de pendiente positiva de niveles arriba de la media y todos los cruces de pendiente negativa de niveles debajo de la media.
- Una modificación del método anterior sólo con un registro realizado entre cruces sucesivos de un nivel asociado con cada nivel que cuenta.
- Cada variación máx-mín local se cuenta como medio ciclo y la amplitud asociada es medio intervalo.
- El método anterior más la consideración media local
- La técnica de conteo rain – flow. (Shigley, 2008).

El método que se utiliza aquí es igual a una variación de la técnica de conteo de rain flow. La regla de Palmgren-Miner de la sumatoria de la relación de ciclos,

también llamada regla de Miner, se escribe: (Palmgrem, 1924) (Miner, 1945)

$$\frac{N_i}{n_i} = C \quad \text{Ecuación 2. 25}$$

Donde  $n_i$  es el número de ciclos, según se definió antes y  $N_i$  representa el número de ciclos donde falla a ese nivel de esfuerzo  $\sigma_i$ . El parámetro  $c$  se determinó mediante experimentación; por lo general se encuentra en el intervalo  $0.7 < c < 2.2$  con un valor promedio cerca de la unidad.

Usando la formulación determinística como una regla de daño lineal se escribe:

$$D = \sum n_i^{N_i} \quad \text{Ecuación 2. 26}$$

Donde  $D$  es el daño acumulado. Cuando  $D = c = 1$  se origina la falla.



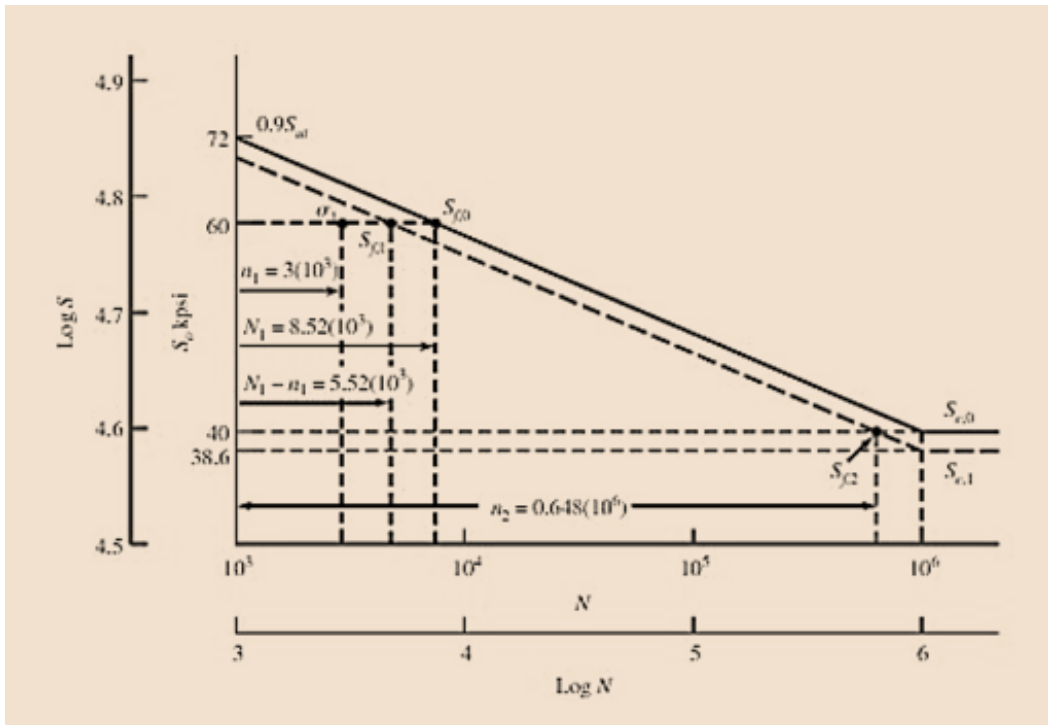


Figura 2-15 Uso de la regla de Miner para predecir el límite de resistencia a la fatiga de un material que se ha sobreesforzado durante un número finito de ciclos.

*Fuente:* Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley

### 2.1.2.22 Curva S-N

La resistencia a la fatiga se llama  $S_f$ , en función del logaritmo del número total de ciclos ( $\text{Log} [N]$ ), para cada probeta. Esta gráfica se llama diagramas S-N o diagramas de Wholer, y son utilizadas para realizar el diseño de los elementos de máquinas.

En la siguiente figura podemos ver que existen tres líneas las que permiten distinguir entre fatiga a bajo número de ciclos ( $<10^3$ ) y fatiga de alto número de ciclos ( $>10^3$ ). La recta horizontal define el límite de resistencia a la fatiga ( $S_e'$ ) del material, que constituye el límite de carga por debajo del cual se considera que el material no fallará por fatiga.

En metales no ferrosos y aleaciones no existe límite a la fatiga.

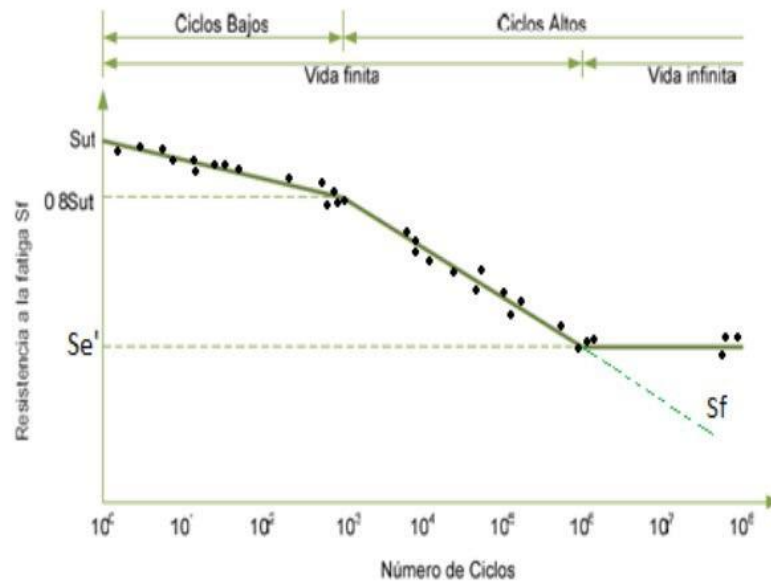


Figura 2-16 Regímenes de fatiga

Fuente: (SALAZAR, 2001)

### 2.1.2.23 Cálculo de la densidad de un cuerpo sólido

A la densidad se le define como la división entre la masa y su respectivo volumen.

$$\Delta d = \frac{m}{V} \quad \text{Ecuación 2. 27}$$

Para determinar la densidad de un cuerpo experimentalmente se lo hace de la siguiente manera:

- 1) En una balanza se toma la masa del sólido calibrándola en cero.
- 2) Se aplica el principio de Arquímedes que nos dice:

"Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje igual al peso del volumen de líquido desalojado".

Sumergiendo el cuerpo en el agua, el peso del cuerpo disminuye debido al empuje. Lo que nos marca la balanza  $F'$  es igual a la diferencia entre el peso  $P$  y el empuje  $E$ .

$$F' = P - E.$$

Ecuación 2. 28

Si el fluido es agua, cuya densidad es la unidad, el peso en gramos coincide numéricamente con el volumen medido en centímetros cúbicos.

El empuje es igual a la diferencia  $F - F'$  entre lo que marca la balanza antes y después de sumergir el cuerpo en agua e igual numéricamente al volumen del cuerpo en centímetros cúbicos.

$$V = F - F'.$$

Ecuación 2. 29

Una vez obtenidos los valores de masa y volumen se procede a calcular la densidad.

#### **2.1.2.24 Espectrómetro de Chispa o de Emisión Óptica**

Este tipo de espectrómetro nos ayuda a determinar qué elementos se encuentran presentes en dicho material, tanto como el porcentaje de cada uno de ellos.

Dicho espectrómetro radica en detectar las longitudes de onda características de dichos elementos cuando sus electrones son excitados mediante una chispa.

La norma que se utiliza para realizar este tipo de ensayo en materiales metálicos es la ASTM-E415, y es el método más exacto que se puede considerar.

### 2.1.2.25 Análisis Metalográfico

El análisis metalográfico de fundiciones de Aluminio-Silicio debe ser similar a la siguiente figura:

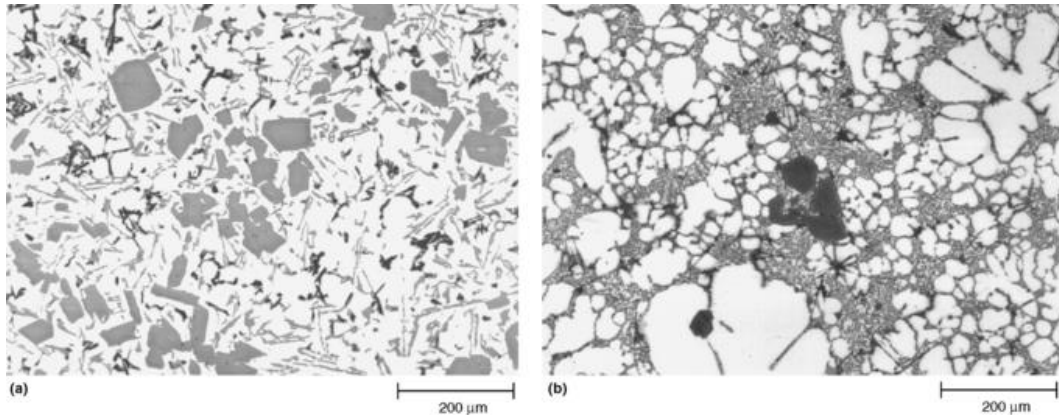


Figura 2-17 Ensayo Metalográfico de la aleación 390 Al-Si-Fe con aumento de 100x

Fuente: MetalHandbook Vol 09

### 2.1.2.26 Probeta

Para realizar los respectivos ensayos nos basaremos de acuerdo a lo especificado en la norma E466 – 96, en la siguiente figura se muestran las dimensiones de la probeta que se utilizará en los ensayos, las medidas se encuentran en milímetros:

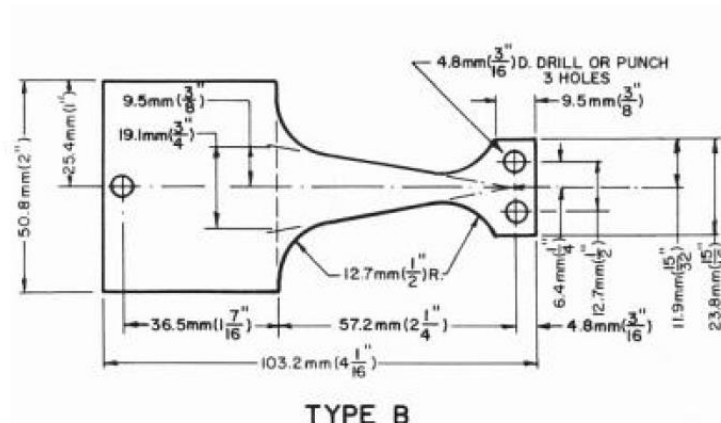


Figura 2-18 Dimensiones de las probetas para ensayos de vida a fatiga

Fuente: Norma ASTM E466-96

## **2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA**

El presente proyecto se basará en el paradigma crítico propositivo, porque la investigación será un avance para la industria automotriz y en el manejo de estructuras metálicas como son las de aluminio. Como es en el caso de Ecuador no disponemos de datos que conlleven a un buen manejo de este material para que hoy en día no se desperdicie como se lo ha venido haciendo en los años anteriores. Esta aleación no consta de datos exactos sobre la resistencia que puede tener sometido a cargas variables.

## **2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL**

Norma para ensayos a fatiga en esfuerzos axiales de materiales metálicos  
ASTME466 – 96

Norma para ensayos a fatiga Esfuerzo-Vida (S-N) ASTME466 – 96

Normas inen para acabados superficiales INEN 104- INEN 921

Artículos de: Constitución política, leyes, estatutos, reglamentos y otras normativas en relación al problema.

## 2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES

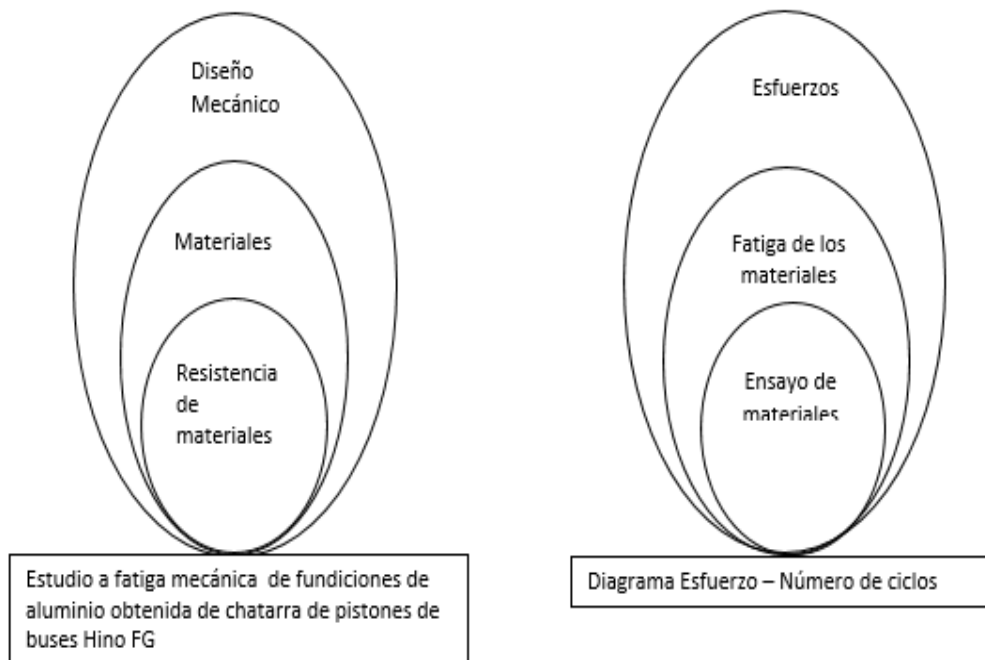


Figura 2-19 Red de Categorías Fundamentales

*Fuente: El autor*

## 2.5 HIPÓTESIS

Con el estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de buses Hino FG se podrá determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos.

## 2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

### 2.6.1 Variable Independiente:

Fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra.

### 2.6.2 Variable Dependiente:

Diagrama esfuerzo-número de ciclos.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 ENFOQUE**

En el presente proyecto de investigación se utilizarán datos cuantitativos ya que tendremos que realizar cálculos numéricos que a la vez serán explicativos gracias a que realizaremos varias pruebas de ensayos a fatiga de dicho material para determinar el comportamiento mecánico de dicho elemento. A la vez la investigación será cualitativa porque se necesitarán usar normas.

La información que se necesitará para dicha investigación serán fuentes primarias y secundarias

Las fuentes primarias son: libros tesis, artículos relacionados con el tema, internet.

Las fuentes secundarias serán ensayos y pruebas, gráficas, tablas, publicaciones, documentales, etc.

#### **3.2 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.2.1 Bibliográfica**

Es importante el tipo de recolección bibliográfica ya que en el presente proyecto se requerirá de la utilización de libros, tesis, internet, documentales, revistas, necesarios para una buena investigación.

### **3.2.2 De Campo**

Se realizará además una investigación de campo, ya que es necesario realizar un estudio de los hechos donde se genera el problema, con el fin de obtener información relevante, pues los datos serán la base para el desarrollo de la propuesta y apoyarán al cumplimiento de los objetivos de la investigación.

### **3.2.3 Experimental**

Los estudios se realizarán en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para lo cual se utilizará la máquina de Moore diseñada y construida anteriormente por el Señor Carlos Simbaña que nos garantizará resultados confiables y fiables mediante el cual realizaremos numerosas pruebas para determinar la curva esfuerzo-número de ciclos relacionándolo con el número de ciclos.

## **3.2 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.2.1 Exploratoria**

En el presente proyecto será necesario identificar los parámetros que conllevan a una buena investigación para solucionar el problema que tenemos al existir una escasez de valores reales sobre este material que puede ser reemplazado en elementos de máquinas y en estructuras metálicas.

### **3.2.3 Descriptiva**

La investigación cumplirá con muchos requisitos que los ingenieros necesitan: datos reales y confiables para el rediseño de elementos de máquinas a la vez alargando su vida útil de estos sometidos a ciclos altos.

Las materias que se aplicarán son Diseño Mecánico, Materiales y Resistencia de los Materiales, necesarias en la investigación.



### 3.3.3 Asociación de Variables

En el estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra es necesario asociar las variables tanto independiente como dependiente para llegar a determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos y así reemplazarlos en los elementos de máquinas.

### 3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

Como no se puede determinar la cantidad de chatarra, debemos considerar una población indefinida, por lo que para determinar el tamaño de muestra se utiliza la siguiente ecuación.

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{d^2} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

$Z_a^2$  = Es el nivel de seguridad

$p$  = Es la proporción esperada

$q = 1-p$

$d$  = Es la precisión

Probetas de fundición del aluminio de chatarra las dimensiones de éstas serán establecidas mediante normas para ensayos a fatiga:

ASTME466 – 96

ASTME739 – 91

El nivel de confianza o seguridad ( $1 - \alpha$ ). El nivel de confianza prefijado da lugar a un coeficiente. Para un nivel de seguridad del 95%  $\alpha = 1,96$ , para un nivel de seguridad del 99%  $\alpha = 2,58$

La precisión que se desea para el estudio;

Una idea del valor aproximado del parámetro que se quiere medir (en este caso, una proporción). Esta idea se puede obtener revisando la literatura o mediante estudios pilotos previos. En caso de no tener dicha información se utilizará el valor  $p=0.5(50\%)$

El coeficiente  $Z_{\alpha}$  de varía según diferentes niveles de seguridad, así: Si la seguridad fuese del 90% el coeficiente sería 1,645;

Si la seguridad fuese del 95% el coeficiente sería 1,96;

Si la seguridad fuese del 97,5% el coeficiente sería 2,24;

Si la seguridad fuese del 99% el coeficiente sería 2,576

### **3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES**

**Variable Independiente:** Fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de buses Hino FG.

Tabla 3-1 Operacionalización de Variable Independiente

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	ITEMS	Técnicas e Instrumentos
Se conoce como fatiga mecánica al fenómeno producido en un elemento de máquina o probeta cuando se aplican cargas cíclicas, provocando una rotura incluso cuando el esfuerzo generado es inferior a la fluencia. En aleaciones no ferrosas como el material propuesto no existe límite de fatiga específico pero se pretende determinar su comportamiento a cargas cíclicas.	Deformación	¿Qué carga se debe aplicar en fatiga?	< 18,5N  ≥18,5 N	Ensayos de laboratorio.  Hojas de cálculo.
	Aluminio de chatarra	¿Cuál es la composición química del aluminio de chatarra	Si= 12.05, Si>12.05 Si<12.05 Cu=1.24; Cu<1.24, Cu>1.24 Mg= 0,98, Mg<0.98, Mg>0.98 Ni=1.05, Ni<1.05, Ni>1.05 Fe=0.36; Fe<0.36, Fe>0.36 Mn= 0,04, Mn<0.04, Mn>0.04 Zn= 0,009, Zn<0.009, Zn>0.009 Ti= 0,08, Ti<0.08, Ti>0.08 Pb=0,002, Pb<0.002, Pb>0.002 Sn=0,001, Sn<0.001 Sn>0.001 Ca= 0,002 Al= base	Check list de composición química  Fichas de observación.  Fichas de observación
	Ciclos	¿Qué valor de número de ciclos se obtendrá?		Estudio del estado del arte.

*Fuente: El autor*

**Variable Dependiente:** Determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos.

Tabla 3-2 Operacionalización de la variable dependiente

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	ITEMS	Técnicas e Instrumentos
Es la posibilidad de representar gráficamente la variación del esfuerzo generado en una probeta o elemento mecánico, en función de la deformación que se produce, a medida que aumenta el esfuerzo se incrementa la deformación ocasionando una rotura del material,	Deformaciones	¿Cuál es la deflexión máxima que se genera en la probeta?	$= 0,003m$ $> 0,003m$ $< 0,003mm$	Ensayos de Laboratorio. Hoja de cálculos
	Esfuerzo a fatiga	Cuál es el rango del esfuerzo en porcentaje del $s_{ut}$ que se tendrá para $N \geq 1x10^5$	$=20\%s_{ut}$ $<20\%s_{ut}$ $>20\%s_{ut}$	Check list
	Número de ciclos	Cuál es el rango de ciclos esperados?	$N \geq 1x10^5$	Estudio del estado del arte

Fuente: El autor

### **3.5 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

Para la recolección de la información se realizará mediante la observación directa e indirecta, teniendo en cuenta que se necesita un cuaderno de apuntes para ir registrando los valores para posteriormente hacer un análisis de resultados. Individual o en equipo, etc

Además, se recopilará información necesaria de libros, internet y guía del tutor para el desarrollo de la parte técnica.

### **3.2 PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

Los datos obtenidos en la investigación se procesarán de la siguiente manera:

Fundir el aluminio que encontramos en los pistones de chatarra para así de esa manera fabricar las probetas a ensayar.

Ubicar la probeta en los soportes.

Revisión crítica de la información obtenida, que ayudará a plantear estrategias para la solución del problema a través de la propuesta.

Lectura de artículos relacionados con la investigación presentada.

Interpretación de resultados con el apoyo del marco teórico en cada uno de los aspectos.

#### **3.6.1 Plan de análisis e interpretación de resultados**

Para el análisis e interpretación de resultados del presente proyecto se realizarán a cabo los siguientes aspectos:

Análisis del problema actual que se está generando al no tener suficiente información.

Para determinar la resistencia a la fatiga del aluminio durante el ensayo tendremos que analizar las revoluciones a las que gira.

Análisis de los métodos y alternativas de solución encontradas mediante la investigación bibliográfica.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados de los ensayos a fatiga mecánica de las probetas obtenidas de la chatarra de pistones.

##### 4.1.1. Determinación del tamaño de la muestra

Para calcular el tamaño de la muestra se aplica la ecuación para una población indeterminada ya que no conocemos el número de la población, es decir la cantidad exacta de pistones.

A continuación vamos a considerar un error del 7% puesto que si utilizamos un error menor nos daría una cantidad de probetas muy alta o viceversa.

La probabilidad que vamos a utilizar es del 95% que significa que solo el 95% de la producción tendrá las características obtenidas en este estudio.

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{d^2}$$

Donde

$$\alpha = 0,05$$

$$Z_{\alpha} = 1,960$$

$$p = 0,95$$

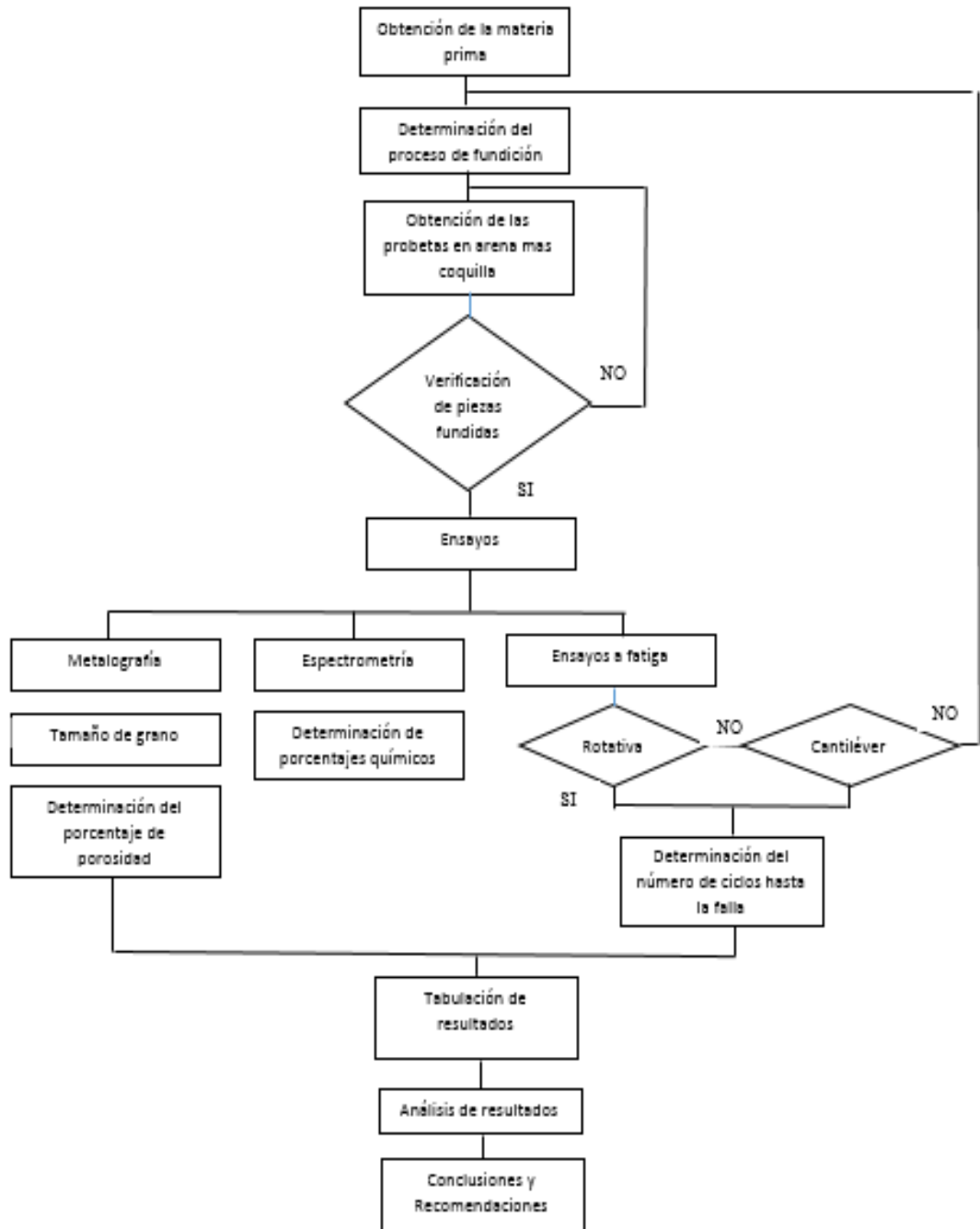
$$q = 1 - 0,95$$

$$d = 0,07$$

$$n = 16$$

El resultado que nos da es de 16 probetas que necesitaremos para realizar dicho estudio del material aluminio de chatarra obtenida de pistones de buses Hino FG.



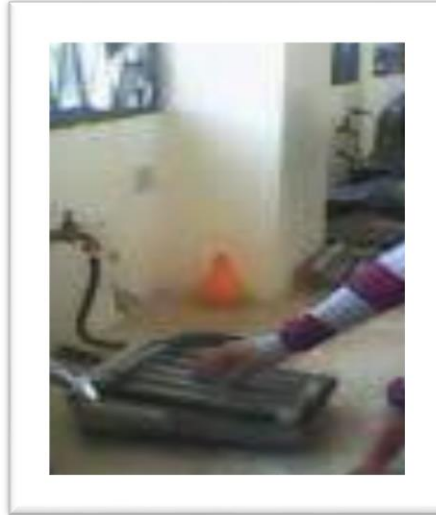


## 4.2 ENSAYO METALOGRAFICO

Para realizar este análisis se contó con el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato en los mismos que se realizaron ensayos metalográficos tanto en la cabeza, faldón fundición del pistón.

### 4.1.1.1 Proceso del análisis metalográfico

1. Las muestras se obtuvieron mediante corte del pistón.
2. Se lija las probetas desde la lija mas gruesa que es la número 400 hasta la mas fina la cual es la 1500 para alcanzar una superficie lisa.



*Figura 4-1 Lijado de la probeta*

*Fuente: El Autor*

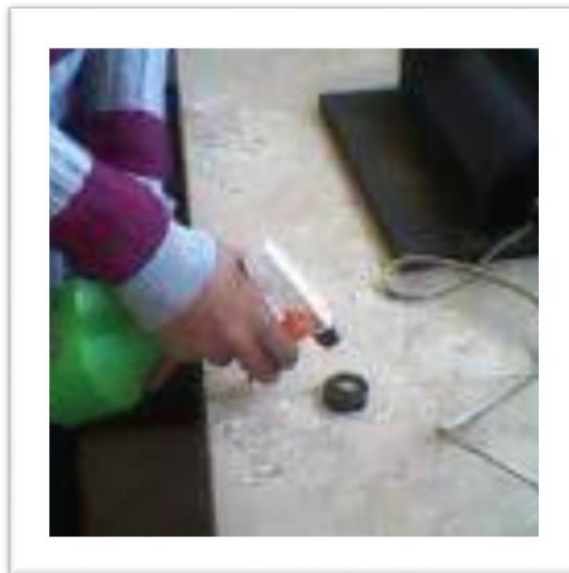
3. Se pule la superficie que será analizada en el disco que se encuentra ubicado en los laboratorios de Ingeniería Mecánica.



*Figura 4-2 Pulido de la probeta*

*Fuente: El Autor*

4. Se lava con agua la probeta a ensayar.



*Figura 4-3 Lavado de la probeta*

*Fuente: El Autor*

5. Se coloca en la secadora.



*Figura 4-4 Secado de la probeta*

***Fuente: El Autor***

6. Se ataca químicamente con ácido hidrofúrico durante 10 segundos.



*Figura 4-5 Ataque químico de la probeta*

***Fuente: El Autor***



*Figura 4-6 Probeta atacada quimicamente*

*Fuente: El Autor*

7. Se procede nuevamente a colocar en la secadora y se analiza en el microscopio



*Figura 4-7 Análisis de metalografía en el microscopio*

*Fuente: El Autor*



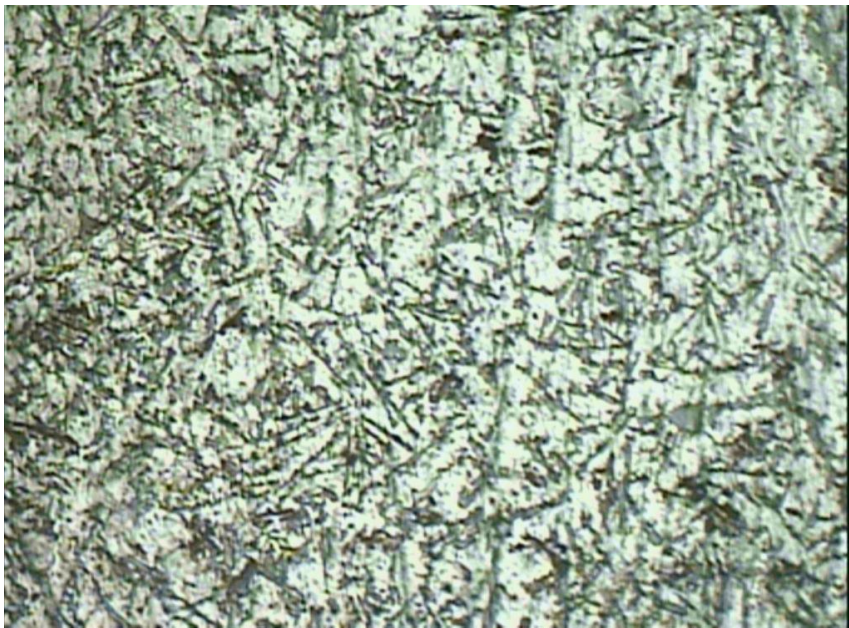
#### **4.1.1.2 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE METALOGRAFÍA**

Mediante la utilización del microscopio de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato se pudo determinar el porcentaje de elementos de aleación, distribución y tamaño de grano como se puede apreciar en las gráficas de abajo; Las gráficas son similares a las que se encuentran en el capítulo 2 figura 2.17 tomadas del Metal Handbook.

Se tomaron tres muestras, de la cabeza, el faldón del pistón y la fundición del pistón de buses Hino FG.



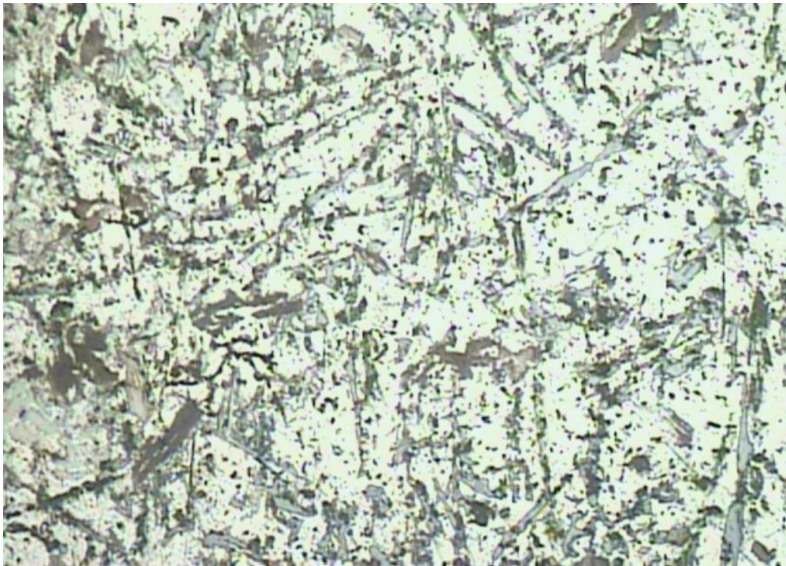
#### **CABEZA DEL PISTÓN**

En las siguientes gráficas se pueden ver las metalografías a 40 x, 100 X y 200 X, en las que se puede apreciar una distribución uniforme del silicio y aluminio, además se pudo determinar que existe un 22% de silicio y 78% de aluminio. Y de acuerdo a la norma ASTM E112-96 un tamaño de grano 11,33

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Material a ensayar:</b>	Cabeza del pistón	<b>Muestra:</b>	<b>Fecha:</b> 12/06/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por</b>	Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM		
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>			
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado		
<b>Ataque quimico:</b>	Acido hidrofúorico	<b>Tiempo:</b>	10 s
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido software clemex		
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg		
<b>RESULTADOS:</b>			
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 40x</b>			
			

*Figura 4-8 Metalografía de la cabeza del pistón tomada a 40x*



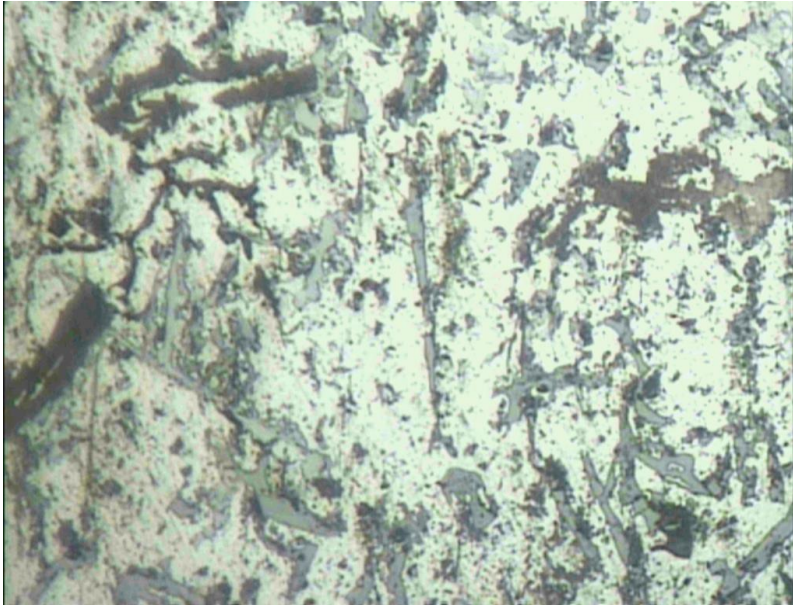
*Fuente: El Autor*

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Cabeza del pistón	<b>Muestra:</b>
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúorico	<b>Tiempo:</b>
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 100x</b>		
		

*Figura 4-9 Metalografía de la cabeza del pistón tomada a 100x*

*Fuente: El Autor*

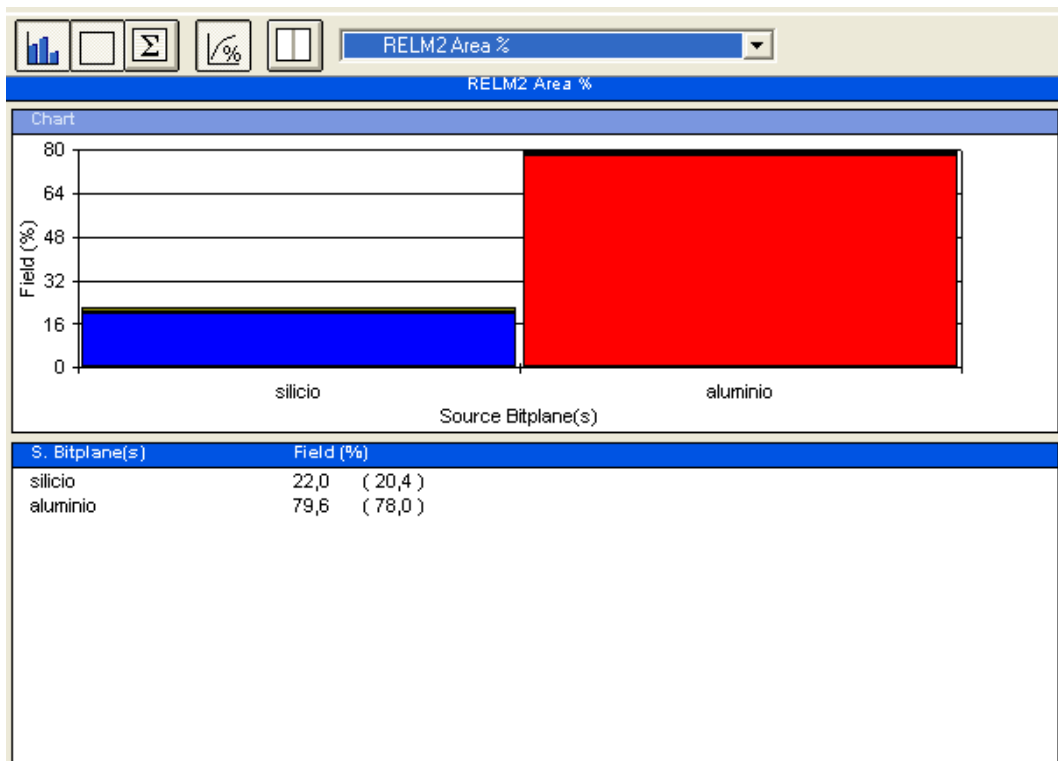
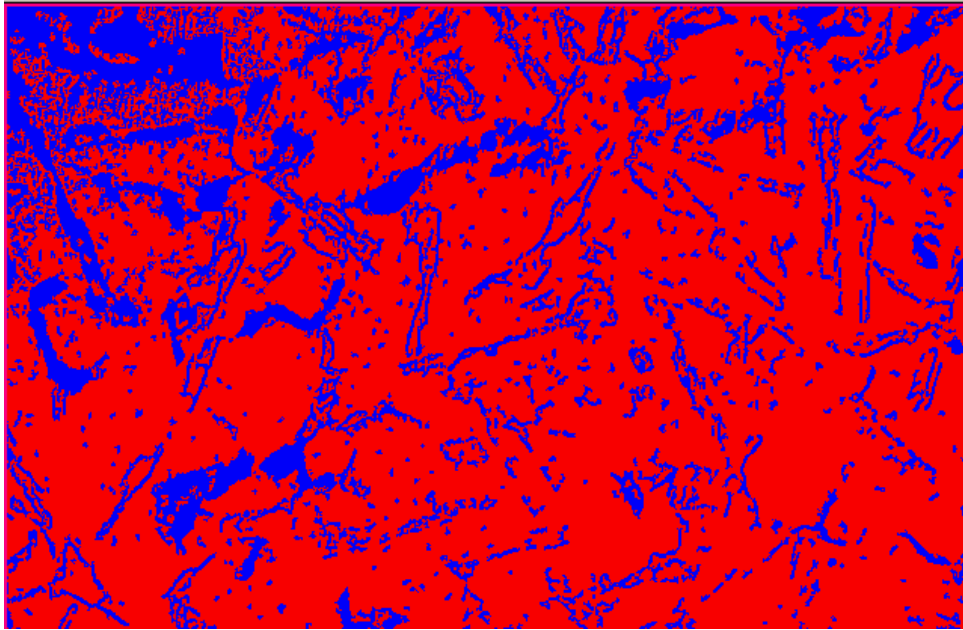


	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Cabeza del pistón	<b>Muestra:</b>
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido, secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidroflluórico	<b>Tiempo:</b>
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 200x</b>		
		

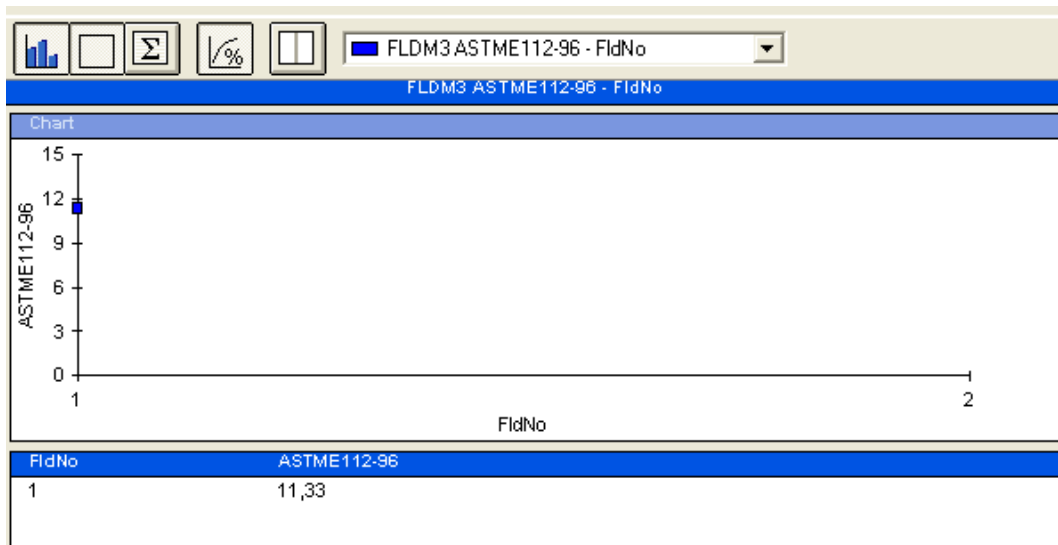
*Figura 4-10 Metalografía de la cabeza del pistón tomada a 200x*

*Fuente: El Autor*

## Análisis de los porcentajes de aluminio y silicio mediante Software






## Análisis del tamaño de grano mediante software.





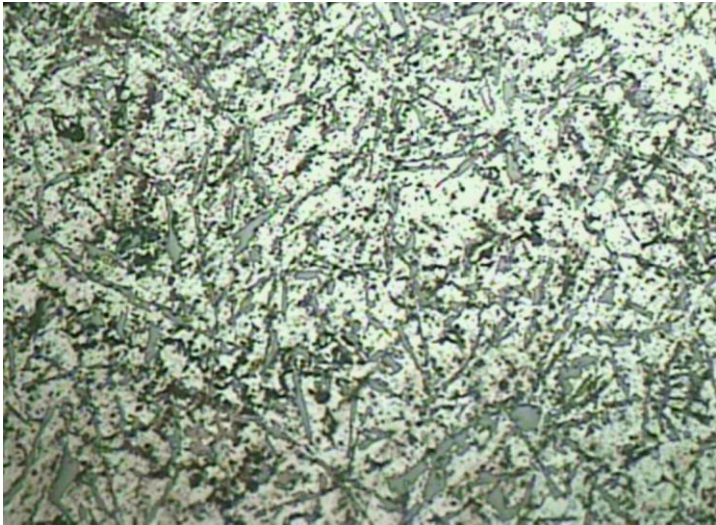
## FALDÓN DEL PISTÓN

En las siguientes gráficas se pueden ver las metalografías a 40 x, 100 X y 200 X, en las que se puede apreciar una distribución uniforme del silicio y aluminio, además se pudo determinar que existe un 12,1% de silicio y 86,9% de aluminio. Y de acuerdo a la norma ASTM E112-96 un tamaño de grano 11,19

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Material a ensayar:</b>	Faldón del pistón	<b>Muestra:</b>	<b>Fecha:</b> 12/06/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>	Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM		
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>			
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado		
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúorico	<b>Tiempo:</b>	10 s
<b>Instrumento:</b>	Microscopio,software clemex		
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg		
<b>RESULTADOS:</b>			
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 40x</b>			
			



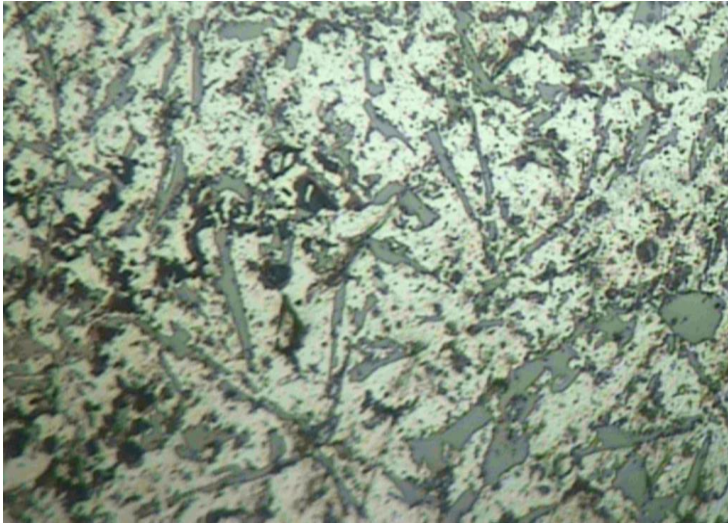
*Figura 4-11 Metalografía del faldón del pistón tomada a 40x*

*Fuente: El Autor*

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Faldón del pistón	<b>Muestra:</b> Fecha:12/06/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b> Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofluórico	<b>Tiempo:</b> 10 s
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 100x</b>		
		

*Figura 4-12 Metalografía del faldón del pistón tomado a 100x*

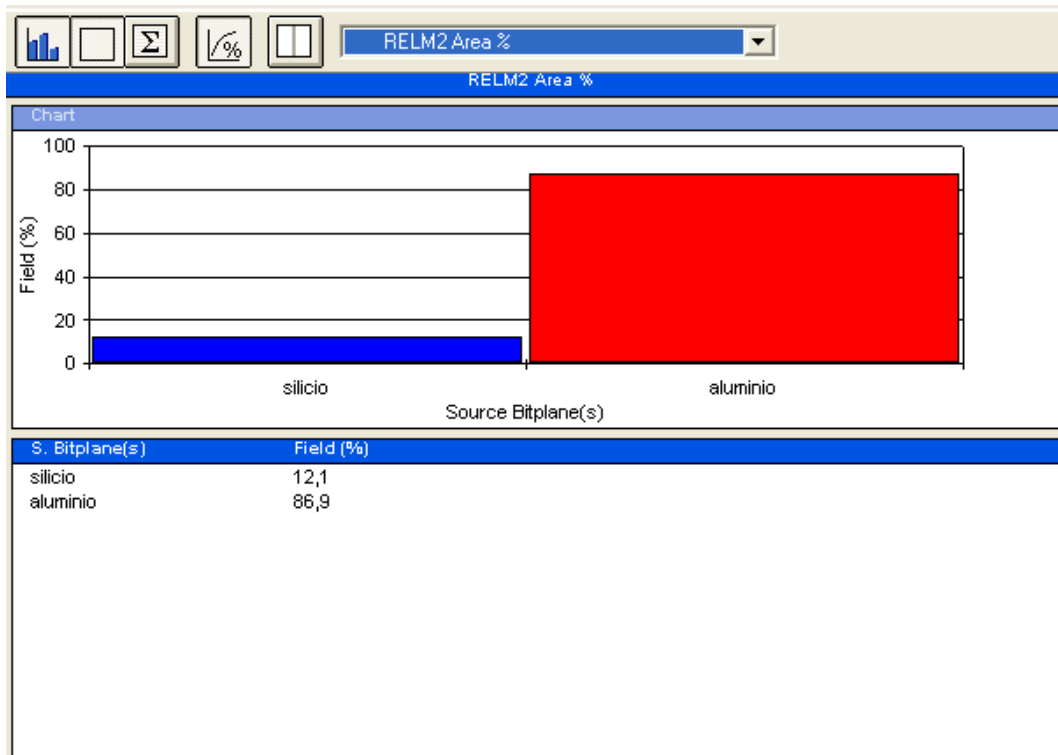
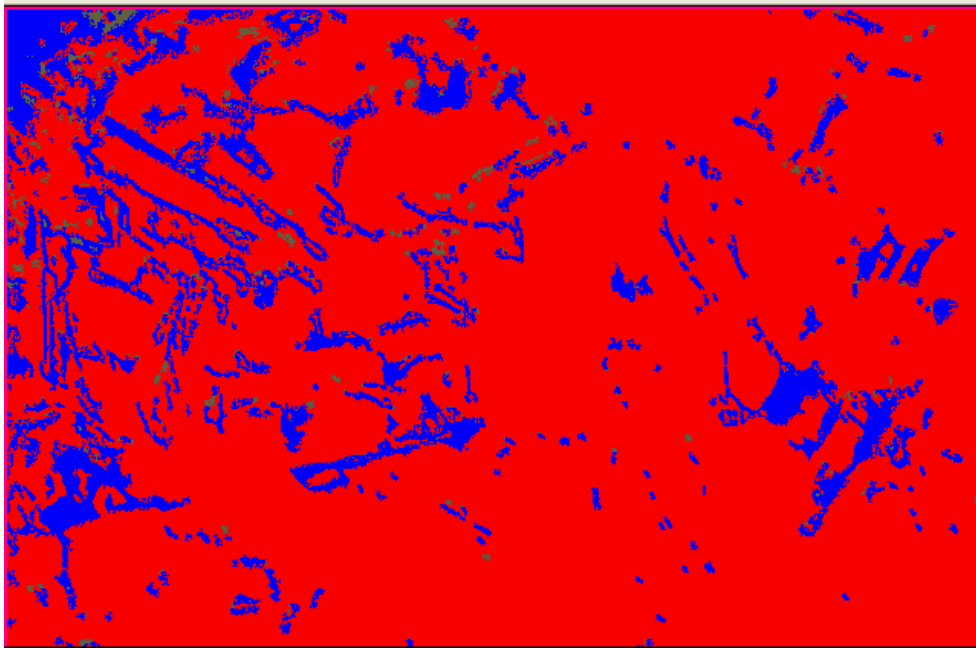
*Fuente: El Autor*

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Faldón del pistón	<b>Muestra:</b> Fecha:12/06/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b> Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúorico	<b>Tiempo:</b> 10 s
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 200x</b>		
		

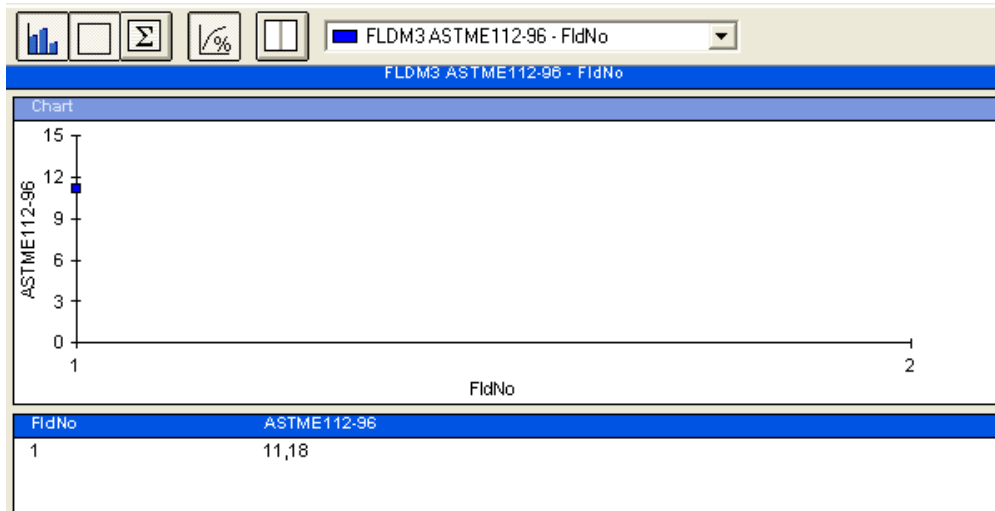
*Figura 4-13 Metalografía del faldón del pistón a 200x*

*Fuente: El Autor*

## Análisis de los porcentajes de aluminio y silicio mediante Software






## Análisis del amaño de grano mediante software



## FUNDICIÓN DEL PISTÓN



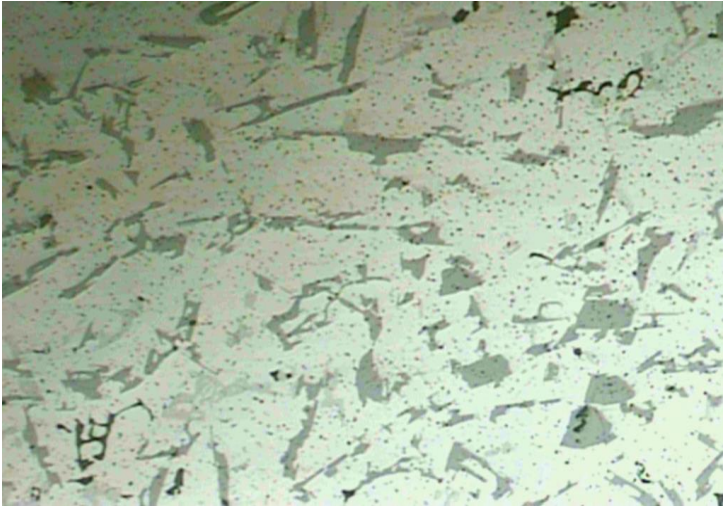
En las siguientes gráficas se pueden ver las metalografías a 40 x, 100 X y 200 X, en las que se puede apreciar una distribución uniforme del silicio y aluminio, además se pudo determinar que existe un 13,3% de silicio y 84,7% de aluminio. Y de acuerdo a la norma ASTM E112-96 un tamaño de grano 11,61



	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Fundición del pistón	<b>Muestra:</b>
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúorico	<b>Tiempo:</b>
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 40x</b>		
		



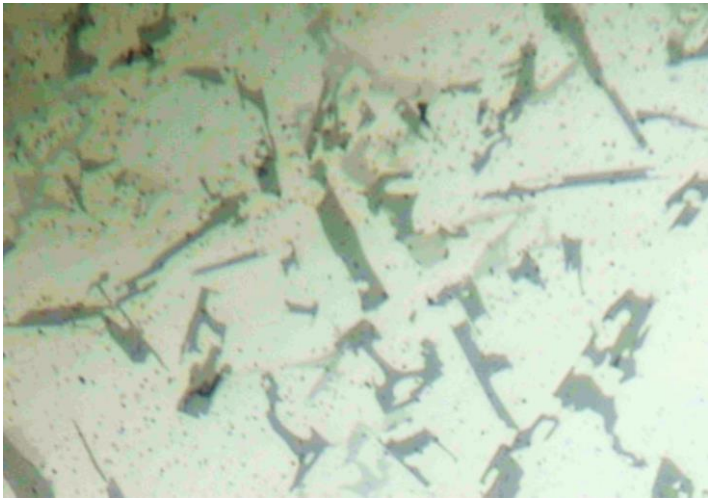
*Figura 4-14 Metalografía de la fundición del pistón a 40x*

*Fuente: El Autor*

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Fundición del pistón	<b>Muestra:</b>
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúorico	<b>Tiempo:</b>
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 100x</b>		
		

*Figura 4-15 Metalgrafía de la fundición del pistón a 100x*

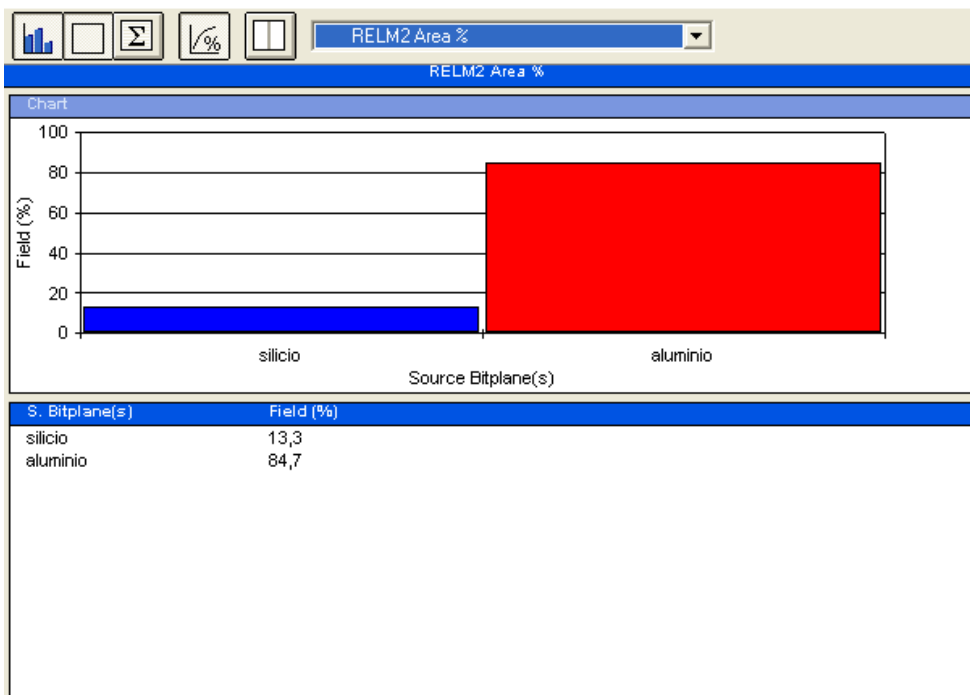
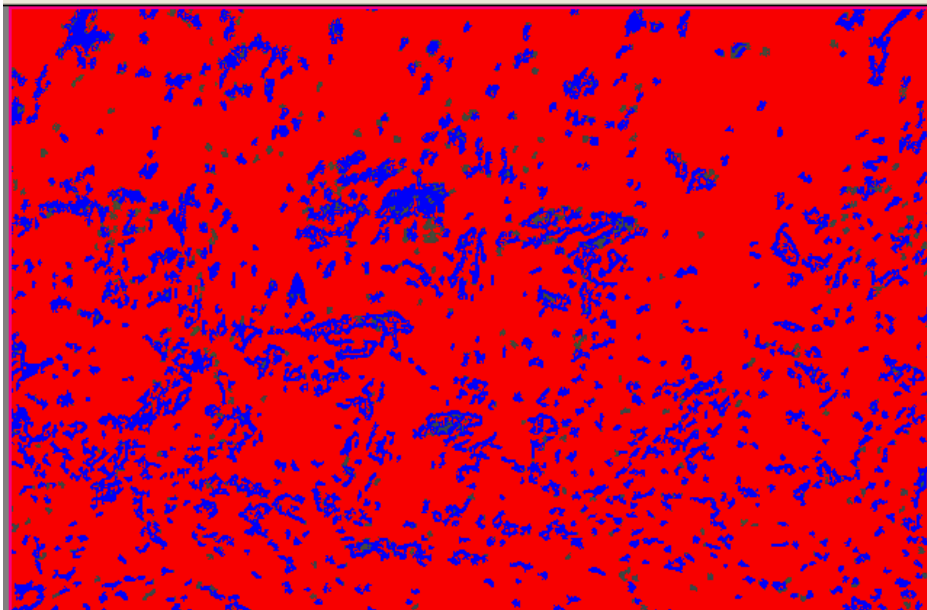
*Fuente: El Autor*

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Fundición del pistón	<b>Muestra:</b>
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofluórico	<b>Tiempo:</b>
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de ebrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 200x</b>		
		

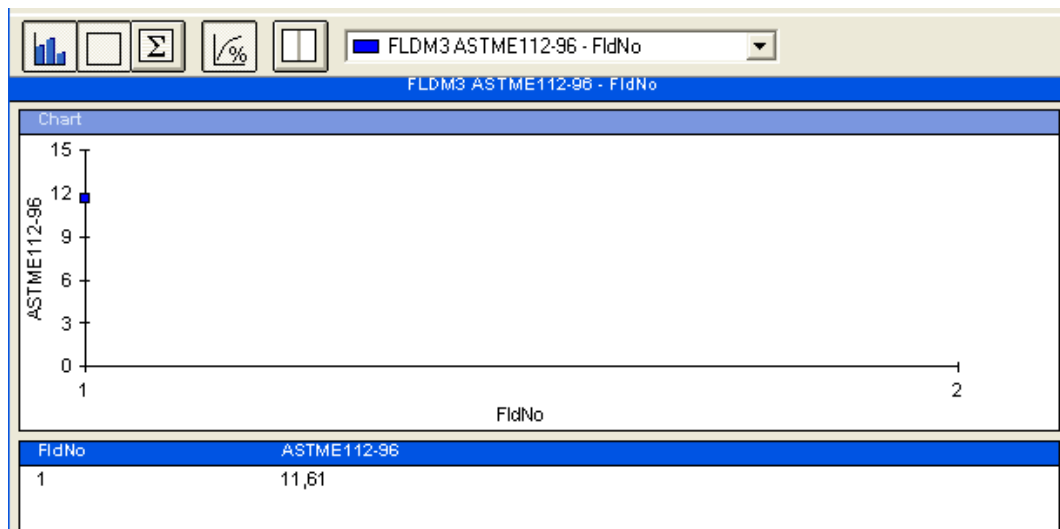
*Figura 4-16 Metalografía de la fundición del pistón a 200x*

*Fuente: El Autor*

## Análisis de los porcentajes de aluminio y silicio mediante Software



## Análisis del tamaño de grano mediante software



### 4.3 CÁLCULO DE LA DENSIDAD

Para realizar el cálculo de la densidad necesitamos conocer masa y volumen de la probeta.

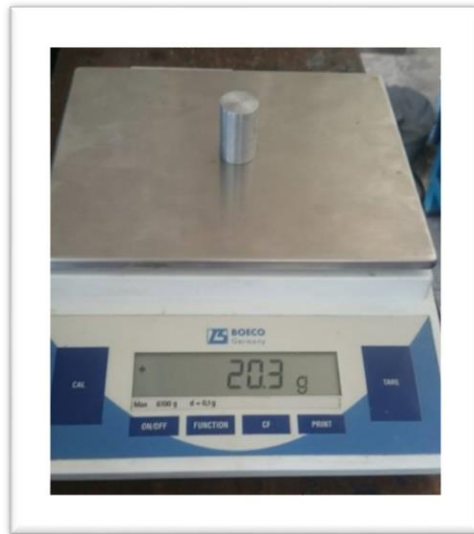
La ecuación que utilizaremos es la siguiente:

$$\Delta \rho = \frac{\Delta m}{\Delta v} \quad \text{Ecuación 4. 1}$$

Se procedió a realizar 3 ensayos para obtener la densidad

#### 4.3.1 Primer Ensayo

Los datos son los siguientes:



*Figura 4-17 Masa de la fundición*

***Fuente: El Autor***

$$\Delta m = 20,3g$$



*Figura 4-18 Altura de la fundición*

***Fuente: El Autor***



*Figura 4-19 Diámetro de la fundición*

*Fuente: El Autor*

Primero debemos realizar el cálculo del volumen con los siguientes datos:

$$d = 18,07\text{mm}$$

$$r = 9,035\text{mm}$$

$$h = 28,74\text{mm}$$

$$V = \pi * r^2 * h$$

Ecuación 4. 2

$$V = \pi * 9,035^2 * 28,74$$

$$V = 7370,43 \text{ mm}^3$$

Por lo que la densidad es la siguiente:

$$\Delta\rho = \frac{20,3 \text{ g}}{7370,43 \text{ mm}^3}$$

$$\Delta\rho = 0,002754 \frac{g}{mm^3} = 2754 \frac{kg}{m^3}$$

### 4.3.2 Segundo Ensayo

Los datos son los siguientes:



*Figura 4-20 Masa de la fundición*

*Fuente: El Autor*

$$\Delta m = 24,8g$$





*Figura 4-21 Altura de la fundición*

*Fuente: El Autor*



*Figura 4-22 Diámetro de la fundición*

*Fuente: El Autor*

Primero debemos realizar el cálculo del volumen con los siguientes datos:

$$d = 20,62\text{mm}$$

$$r = 10,31\text{mm}$$

$$h = 28,51\text{mm}$$

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * 10,31^2 * 28,51$$

$$V = 9520,60\text{ mm}^3$$

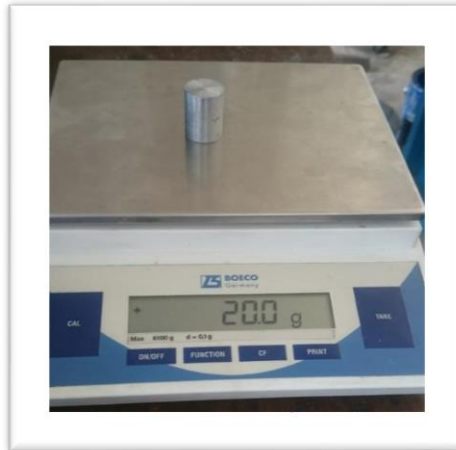
Por lo que la densidad es la siguiente:

$$\Delta\rho = \frac{24,8\text{ g}}{9520,6\text{ mm}^3}$$

$$\Delta\rho = 0,0026 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} = 2600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 4.3.2 Tercer Ensayo

Los datos son los siguientes:



*Figura 4-23 Masa de la fundición*

***Fuente: El Autor***

$$\Delta m = 20,0\text{g}$$



*Figura 4-24 Altura de la fundición*

*Fuente: El Autor*



*Figura 4-25 Diámetro de la fundición*

*Fuente: El Autor*

Primero debemos realizar el cálculo del volumen con los siguientes datos:

$$d = 18,37\text{mm}$$

$$r = 9,185\text{mm}$$

$$h = 28,48\text{mm}$$

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * 9,185^2 * 28,48$$

$$V = 7548,28 \text{ mm}^3$$

Por lo que la densidad es la siguiente:

$$\Delta\rho = \frac{20 \text{ g}}{7548,28\text{mm}^3}$$

$$\Delta\rho = 0,00265 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

#### 4.4 ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA

El análisis de espectrometría se realizó en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ya que en nuestra Universidad no contamos con argón para poder realizar dicha práctica.



*Figura 4-26 Espectrómetro Bruker*

*Fuente: El Autor*

Se procedió a hacer tres pruebas en cada pieza sometida al análisis de espectrometría para poder ver los porcentajes químicos de cada componente.

En el espectrómetro se inserta la pieza que vamos a analizar y de esa manera la máquina se encarga de realizar el análisis mediante argón.

En la computadora nos arroja los resultados con los porcentajes de cada componente y procedemos a guardar dicho documento.

Para realizar el análisis se necesitó cortar el pistón en dos partes de tal manera que nos quede una parte de la cabeza y otra el faldón. Por otra parte se realizó la fundición del aluminio y de igual manera se cortó para que quede la superficie lisa y plana.

En las siguientes figuras podemos ver como quedaron las muestras después de haber realizado el proceso de espectrometría en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

### **CABEZA DEL PISTÓN**

En esta parte de la cabeza del pistón se requirió hacer tres pruebas para obtener el promedio y así estar seguros cual es el porcentaje de cada componente que tiene dicho material.



*Figura 4-27 Cabeza del pistón una vez realizado el análisis de espectrometría*

*Fuente: El Autor*

## **FALDÓN DEL PISTÓN**

De igual manera en la parte del faldón se realizó de la misma manera las pruebas para verificar los componentes y los porcentajes, en la figura que encontramos a continuación podemos observar cómo se realizaron las pruebas.



*Figura 4-28 Faldón del pistón una vez realizado el análisis de espectrometría*

*Fuente: El Autor*

## FUNDICIÓN DEL PISTÓN

En la fundición del pistón se realizó el mismo proceso descrito anteriormente y a continuación se observa como quedó la pieza después de realizar dicho ensayo.



*Figura 4-29 Fundición del pistón una vez realizado el análisis de espectrometría*

*Fuente: El Autor*

### 4.1.2.1 Ensayo Espectrométrico de la cabeza del pistón

A continuación podemos ver los resultados del análisis que se realizó, obteniendo tres diferentes resultados de sus elementos químicos que se encuentran en la cabeza del pistón.




	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO																																																															
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA																																																															
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA																																																															
<b>ENSAYO ESPECTROMÉTRICO</b>																																																																
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>																																																																
<b>Material a ensayar:</b>	Cabeza del pistón	<b>Muestra:</b>	<b>Fecha:</b> 04/09/15																																																													
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>	Ing. Guamanquispe																																																													
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-ESPOCH																																																															
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO</b>																																																																
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	-																																																															
<b>Ataque químico:</b>	-	<b>Tiempo:</b>	56 s																																																													
<b>Instrumento:</b>	Espectrómetro Bruker																																																															
<b>Diametro de la probeta:</b>	20 cm																																																															
<b>RESULTADOS:</b>																																																																
<b>ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE LA CABEZA DEL PISTÓN</b>																																																																
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="text-align: left;"> <p><b>Bruker Analysis Report</b></p> <hr style="border: 2px solid blue;"/> <p>Sample:</p> <p>Analysis Time: 04.09.2015 12:40:55</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p></p> <p>Method: Al100</p> </div> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Si [%]</th> <th>Fe [%]</th> <th>Cu [%]</th> <th>Mn [%]</th> <th>Mg [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>∅</td> <td>14,05</td> <td>0,490</td> <td>1,179</td> <td>0,010</td> <td>1,106</td> </tr> <tr> <td></td> <th>Cr [%]</th> <th>Ni [%]</th> <th>Zn [%]</th> <th>Ti [%]</th> <th>Pb [%]</th> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>0,0040</td> <td>0,891</td> <td>0,013</td> <td>0,0077</td> <td>&lt;0,050</td> </tr> <tr> <td></td> <th>Sn [%]</th> <th>V [%]</th> <th>Sr [%]</th> <th>Zr [%]</th> <th>Cd [%]</th> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>&lt;0,0050</td> <td>0,0063</td> <td>&lt;0,0020</td> <td>&lt;0,0020</td> <td>&lt;0,0050</td> </tr> <tr> <td></td> <th>Co [%]</th> <th>B [%]</th> <th>Ag [%]</th> <th>Bi [%]</th> <th>Ca [%]</th> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>&lt;0,0030</td> <td>0,0017</td> <td>&lt;0,0010</td> <td>&lt;0,0060</td> <td>0,0047</td> </tr> <tr> <td></td> <th>Al [%]</th> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>82,23</td> <td colspan="4"></td> </tr> </tbody> </table>						Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	∅	14,05	0,490	1,179	0,010	1,106		Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]	∅	0,0040	0,891	0,013	0,0077	<0,050		Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]	∅	<0,0050	0,0063	<0,0020	<0,0020	<0,0050		Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]	∅	<0,0030	0,0017	<0,0010	<0,0060	0,0047		Al [%]					∅	82,23				
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]																																																											
∅	14,05	0,490	1,179	0,010	1,106																																																											
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]																																																											
∅	0,0040	0,891	0,013	0,0077	<0,050																																																											
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]																																																											
∅	<0,0050	0,0063	<0,0020	<0,0020	<0,0050																																																											
	Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]																																																											
∅	<0,0030	0,0017	<0,0010	<0,0060	0,0047																																																											
	Al [%]																																																															
∅	82,23																																																															

Figura 4-30 Análisis Espectrométrico de la composición de la cabeza del pistón

Fuente: El autor



A continuación se presenta la tabla de una sola prueba de la cabeza del pistón con sus respectivos valores de sus elementos que consta:



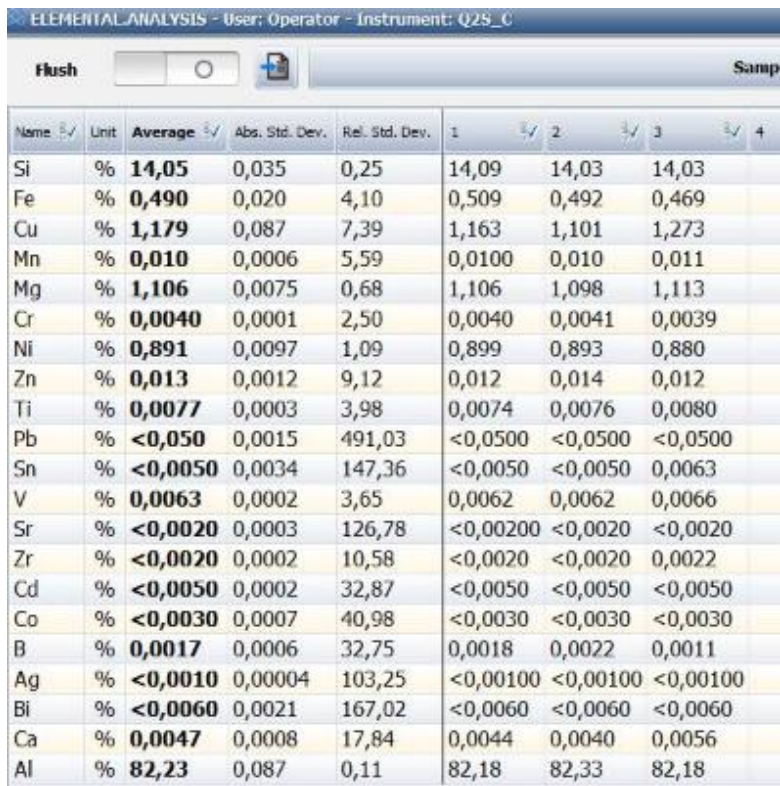
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO																																																																																																																																																																																																							
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA																																																																																																																																																																																																							
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA																																																																																																																																																																																																							
<b>ENSAYO ESPECTROMETRICO</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>Material a ensayar:</b>	Cabeza del Pistón	<b>Muestra:</b>																																																																																																																																																																																																						
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b> Ing. Guamanquispe																																																																																																																																																																																																						
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-FICM																																																																																																																																																																																																							
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>Ataque químico:</b>		<b>Tiempo:</b> 56 (s)																																																																																																																																																																																																						
<b>Instrumento:</b>	Espectrometro Bruker																																																																																																																																																																																																							
<b>Diametro de la probeta:</b>	20 cm																																																																																																																																																																																																							
<b>RESULTADOS:</b>																																																																																																																																																																																																								
<b>TABLA DE PORCENTAJES DE COMPOSICION DE LA CABEZA DEL PISTON</b>																																																																																																																																																																																																								
 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Unit</th> <th>Average</th> <th>Abs. Std. Dev.</th> <th>Rel. Std. Dev.</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Si</td><td>%</td><td>14,05</td><td>0,035</td><td>0,25</td><td>14,09</td><td>14,03</td><td>14,03</td><td></td></tr> <tr><td>Fe</td><td>%</td><td>0,490</td><td>0,020</td><td>4,10</td><td>0,509</td><td>0,492</td><td>0,469</td><td></td></tr> <tr><td>Cu</td><td>%</td><td>1,179</td><td>0,087</td><td>7,39</td><td>1,163</td><td>1,101</td><td>1,273</td><td></td></tr> <tr><td>Mn</td><td>%</td><td>0,010</td><td>0,0006</td><td>5,59</td><td>0,0100</td><td>0,010</td><td>0,011</td><td></td></tr> <tr><td>Mg</td><td>%</td><td>1,106</td><td>0,0075</td><td>0,68</td><td>1,106</td><td>1,098</td><td>1,113</td><td></td></tr> <tr><td>Cr</td><td>%</td><td>0,0040</td><td>0,0001</td><td>2,50</td><td>0,0040</td><td>0,0041</td><td>0,0039</td><td></td></tr> <tr><td>Ni</td><td>%</td><td>0,891</td><td>0,0097</td><td>1,09</td><td>0,899</td><td>0,893</td><td>0,880</td><td></td></tr> <tr><td>Zn</td><td>%</td><td>0,013</td><td>0,0012</td><td>9,12</td><td>0,012</td><td>0,014</td><td>0,012</td><td></td></tr> <tr><td>Ti</td><td>%</td><td>0,0077</td><td>0,0003</td><td>3,98</td><td>0,0074</td><td>0,0076</td><td>0,0080</td><td></td></tr> <tr><td>Pb</td><td>%</td><td>&lt;0,050</td><td>0,0015</td><td>491,03</td><td>&lt;0,0500</td><td>&lt;0,0500</td><td>&lt;0,0500</td><td></td></tr> <tr><td>Sn</td><td>%</td><td>&lt;0,0050</td><td>0,0034</td><td>147,36</td><td>&lt;0,0050</td><td>&lt;0,0050</td><td>0,0063</td><td></td></tr> <tr><td>V</td><td>%</td><td>0,0063</td><td>0,0002</td><td>3,65</td><td>0,0062</td><td>0,0062</td><td>0,0066</td><td></td></tr> <tr><td>Sr</td><td>%</td><td>&lt;0,0020</td><td>0,0003</td><td>126,78</td><td>&lt;0,00200</td><td>&lt;0,0020</td><td>&lt;0,0020</td><td></td></tr> <tr><td>Zr</td><td>%</td><td>&lt;0,0020</td><td>0,0002</td><td>10,58</td><td>&lt;0,0020</td><td>&lt;0,0020</td><td>0,0022</td><td></td></tr> <tr><td>Cd</td><td>%</td><td>&lt;0,0050</td><td>0,0002</td><td>32,87</td><td>&lt;0,0050</td><td>&lt;0,0050</td><td>&lt;0,0050</td><td></td></tr> <tr><td>Co</td><td>%</td><td>&lt;0,0030</td><td>0,0007</td><td>40,98</td><td>&lt;0,0030</td><td>&lt;0,0030</td><td>&lt;0,0030</td><td></td></tr> <tr><td>B</td><td>%</td><td>0,0017</td><td>0,0006</td><td>32,75</td><td>0,0018</td><td>0,0022</td><td>0,0011</td><td></td></tr> <tr><td>Ag</td><td>%</td><td>&lt;0,0010</td><td>0,00004</td><td>103,25</td><td>&lt;0,00100</td><td>&lt;0,00100</td><td>&lt;0,00100</td><td></td></tr> <tr><td>Bi</td><td>%</td><td>&lt;0,0060</td><td>0,0021</td><td>167,02</td><td>&lt;0,0060</td><td>&lt;0,0060</td><td>&lt;0,0060</td><td></td></tr> <tr><td>Ca</td><td>%</td><td>0,0047</td><td>0,0008</td><td>17,84</td><td>0,0044</td><td>0,0040</td><td>0,0056</td><td></td></tr> <tr><td>Al</td><td>%</td><td>82,23</td><td>0,087</td><td>0,11</td><td>82,18</td><td>82,33</td><td>82,18</td><td></td></tr> </tbody> </table>			Name	Unit	Average	Abs. Std. Dev.	Rel. Std. Dev.	1	2	3	4	Si	%	14,05	0,035	0,25	14,09	14,03	14,03		Fe	%	0,490	0,020	4,10	0,509	0,492	0,469		Cu	%	1,179	0,087	7,39	1,163	1,101	1,273		Mn	%	0,010	0,0006	5,59	0,0100	0,010	0,011		Mg	%	1,106	0,0075	0,68	1,106	1,098	1,113		Cr	%	0,0040	0,0001	2,50	0,0040	0,0041	0,0039		Ni	%	0,891	0,0097	1,09	0,899	0,893	0,880		Zn	%	0,013	0,0012	9,12	0,012	0,014	0,012		Ti	%	0,0077	0,0003	3,98	0,0074	0,0076	0,0080		Pb	%	<0,050	0,0015	491,03	<0,0500	<0,0500	<0,0500		Sn	%	<0,0050	0,0034	147,36	<0,0050	<0,0050	0,0063		V	%	0,0063	0,0002	3,65	0,0062	0,0062	0,0066		Sr	%	<0,0020	0,0003	126,78	<0,00200	<0,0020	<0,0020		Zr	%	<0,0020	0,0002	10,58	<0,0020	<0,0020	0,0022		Cd	%	<0,0050	0,0002	32,87	<0,0050	<0,0050	<0,0050		Co	%	<0,0030	0,0007	40,98	<0,0030	<0,0030	<0,0030		B	%	0,0017	0,0006	32,75	0,0018	0,0022	0,0011		Ag	%	<0,0010	0,00004	103,25	<0,00100	<0,00100	<0,00100		Bi	%	<0,0060	0,0021	167,02	<0,0060	<0,0060	<0,0060		Ca	%	0,0047	0,0008	17,84	0,0044	0,0040	0,0056		Al	%	82,23	0,087	0,11	82,18	82,33	82,18	
Name	Unit	Average	Abs. Std. Dev.	Rel. Std. Dev.	1	2	3	4																																																																																																																																																																																																
Si	%	14,05	0,035	0,25	14,09	14,03	14,03																																																																																																																																																																																																	
Fe	%	0,490	0,020	4,10	0,509	0,492	0,469																																																																																																																																																																																																	
Cu	%	1,179	0,087	7,39	1,163	1,101	1,273																																																																																																																																																																																																	
Mn	%	0,010	0,0006	5,59	0,0100	0,010	0,011																																																																																																																																																																																																	
Mg	%	1,106	0,0075	0,68	1,106	1,098	1,113																																																																																																																																																																																																	
Cr	%	0,0040	0,0001	2,50	0,0040	0,0041	0,0039																																																																																																																																																																																																	
Ni	%	0,891	0,0097	1,09	0,899	0,893	0,880																																																																																																																																																																																																	
Zn	%	0,013	0,0012	9,12	0,012	0,014	0,012																																																																																																																																																																																																	
Ti	%	0,0077	0,0003	3,98	0,0074	0,0076	0,0080																																																																																																																																																																																																	
Pb	%	<0,050	0,0015	491,03	<0,0500	<0,0500	<0,0500																																																																																																																																																																																																	
Sn	%	<0,0050	0,0034	147,36	<0,0050	<0,0050	0,0063																																																																																																																																																																																																	
V	%	0,0063	0,0002	3,65	0,0062	0,0062	0,0066																																																																																																																																																																																																	
Sr	%	<0,0020	0,0003	126,78	<0,00200	<0,0020	<0,0020																																																																																																																																																																																																	
Zr	%	<0,0020	0,0002	10,58	<0,0020	<0,0020	0,0022																																																																																																																																																																																																	
Cd	%	<0,0050	0,0002	32,87	<0,0050	<0,0050	<0,0050																																																																																																																																																																																																	
Co	%	<0,0030	0,0007	40,98	<0,0030	<0,0030	<0,0030																																																																																																																																																																																																	
B	%	0,0017	0,0006	32,75	0,0018	0,0022	0,0011																																																																																																																																																																																																	
Ag	%	<0,0010	0,00004	103,25	<0,00100	<0,00100	<0,00100																																																																																																																																																																																																	
Bi	%	<0,0060	0,0021	167,02	<0,0060	<0,0060	<0,0060																																																																																																																																																																																																	
Ca	%	0,0047	0,0008	17,84	0,0044	0,0040	0,0056																																																																																																																																																																																																	
Al	%	82,23	0,087	0,11	82,18	82,33	82,18																																																																																																																																																																																																	

Figura 4-31 Análisis Espectrométrico de la composición de la cabeza del pistón

Fuente: El autor

#### 4.1.2.2 Ensayo de la espectrometría del faldón

A continuación podemos ver los resultados del análisis que se realizó, obteniendo tres diferentes resultados de sus elementos químicos que se encuentran en la cabeza del pistón.



	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO																																																													
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA																																																													
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA																																																													
<b>ENSAYO ESPECTROMÉTRICO</b>																																																														
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>																																																														
<b>Material a ensayar:</b>	Faldón del pistón	<b>Muestra:</b> Fecha:04/09/15																																																												
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b> Ing. Guamanquispe																																																												
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-ESPOCH																																																													
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALGRÁFICO</b>																																																														
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	-																																																													
<b>Ataque químico:</b>	-	<b>Tiempo:</b> 56 s																																																												
<b>Instrumento:</b>	Espectrómetro Bruker																																																													
<b>Diametro de la probeta:</b>	Pistón	ASTM																																																												
<b>RESULTADOS:</b>																																																														
<b>ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE EL FALDÓN DEL PISTÓN</b>																																																														
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div> <p><b>Bruker Analysis Report</b></p> <hr style="border: 2px solid blue;"/> <p>Sample: Analysis Time: 04.09.2015 12:29:56</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p><b>BRUKER</b></p> <p>Method: Al100</p> </div> </div> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Si [%]</th> <th>Fe [%]</th> <th>Cu [%]</th> <th>Mn [%]</th> <th>Mg [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>∅</td> <td>14,40</td> <td>0,924</td> <td>1,189</td> <td>0,011</td> <td>1,046</td> </tr> <tr> <th></th> <th>Cr [%]</th> <th>Ni [%]</th> <th>Zn [%]</th> <th>Ti [%]</th> <th>Pb [%]</th> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>0,011</td> <td>0,910</td> <td>0,023</td> <td>0,0083</td> <td>&lt;0,050</td> </tr> <tr> <th></th> <th>Sn [%]</th> <th>V [%]</th> <th>Sr [%]</th> <th>Zr [%]</th> <th>Cd [%]</th> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>0,010</td> <td>0,0066</td> <td>&lt;0,0020</td> <td>0,0022</td> <td>&lt;0,0050</td> </tr> <tr> <th></th> <th>Co [%]</th> <th>B [%]</th> <th>Ag [%]</th> <th>Bi [%]</th> <th>Ca [%]</th> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>&lt;0,0030</td> <td>0,0064</td> <td>&lt;0,0010</td> <td>&lt;0,0060</td> <td>0,0097</td> </tr> <tr> <th></th> <th>Al [%]</th> <td colspan="4"></td> </tr> <tr> <td>∅</td> <td>81,44</td> <td colspan="4"></td> </tr> </tbody> </table>				Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	∅	14,40	0,924	1,189	0,011	1,046		Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]	∅	0,011	0,910	0,023	0,0083	<0,050		Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]	∅	0,010	0,0066	<0,0020	0,0022	<0,0050		Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]	∅	<0,0030	0,0064	<0,0010	<0,0060	0,0097		Al [%]					∅	81,44				
	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]																																																									
∅	14,40	0,924	1,189	0,011	1,046																																																									
	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Ti [%]	Pb [%]																																																									
∅	0,011	0,910	0,023	0,0083	<0,050																																																									
	Sn [%]	V [%]	Sr [%]	Zr [%]	Cd [%]																																																									
∅	0,010	0,0066	<0,0020	0,0022	<0,0050																																																									
	Co [%]	B [%]	Ag [%]	Bi [%]	Ca [%]																																																									
∅	<0,0030	0,0064	<0,0010	<0,0060	0,0097																																																									
	Al [%]																																																													
∅	81,44																																																													

Figura 4-32 Análisis Espectrométrico de la composición de faldón del pistón

Fuente: El Autor

A continuación se presenta la tabla de una sola prueba de el faldón del pistón con sus respectivos valores de sus elementos que consta:



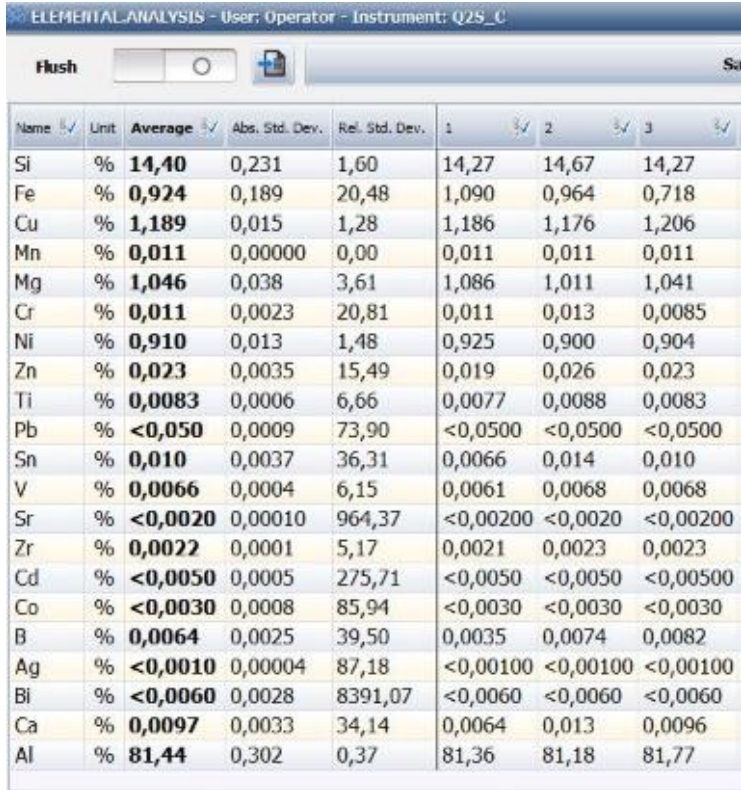
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
<b>ENSAYO ESPECTROMETRICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Material a ensayar:</b>	Faldón del Pistón	<b>Muestra:</b>	Fecha:04/09/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por</b>	Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-ESPOCH		
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO</b>			
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>			
<b>Ataque químico:</b>	-	<b>Tiempo:</b>	56 (s)
<b>Instrumento:</b>	Espectrometro Bruker		
<b>Diametro de la probeta:</b>	20 cm		
<b>RESULTADOS:</b>			
<b>TABLA DE PORCENTAJES DE COMPOSICIÓN DE EL FALDON</b>			
			

Figura 4-33 Análisis Espectrométrico de la composición del faldón del pistón

Fuente: El Autor

#### 4.1.2.3 Ensayo Espectrométrico de la fundición del pistón.

A continuación podemos ver los resultados del análisis que se realizó, obteniendo tres diferentes conclusiones de sus elementos químicos que se encuentran en la fundición del pistón.





	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO				
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA				
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA				
<b>ENSAYO ESPECTROMÉTRICO</b>					
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>					
<b>Material a ensayar:</b>	Fundición del pistón	<b>Muestra:</b>	Fecha:04/09/15		
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>	Ing. Guamanquispe		
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-ESPOCH				
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO</b>					
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	-				
<b>Ataque químico:</b>	-	<b>Tiempo:</b>	56 s		
<b>Instrumento:</b>	Espectómetro Bruker				
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg				
<b>RESULTADOS:</b>					
<b>ANÁLISIS DE ESPECTROMETRÍA DE LA FUNICIÓN DEL PISTÓN</b>					
 					
<b>Sample:</b> Analysis Time: 04.09.2015 12:46:23      Method: Al100					
	<b>Si [%]</b>	<b>Fe [%]</b>	<b>Cu [%]</b>	<b>Mn [%]</b>	<b>Mg [%]</b>
∅	13,14	0,620	1,348	0,031	1,056
	<b>Cr [%]</b>	<b>Ni [%]</b>	<b>Zn [%]</b>	<b>Ti [%]</b>	<b>Pb [%]</b>
∅	0,030	1,030	0,022	0,063	<0,050
	<b>Sn [%]</b>	<b>V [%]</b>	<b>Sr [%]</b>	<b>Zr [%]</b>	<b>Cd [%]</b>
∅	0,016	0,016	<0,0020	0,012	<0,0050
	<b>Co [%]</b>	<b>B [%]</b>	<b>Ag [%]</b>	<b>Bi [%]</b>	<b>Ca [%]</b>
∅	<0,0030	0,0016	<0,0010	<0,0060	0,0035
	<b>Al [%]</b>				
∅	82,61				

Figura 4-34 Análisis Espectrométrico de la composición de la fundición del pistón

Fuente: El Autor

A continuación se presenta la tabla de una sola prueba de el fundición del pistón con sus respectivos valores de sus elementos que consta:



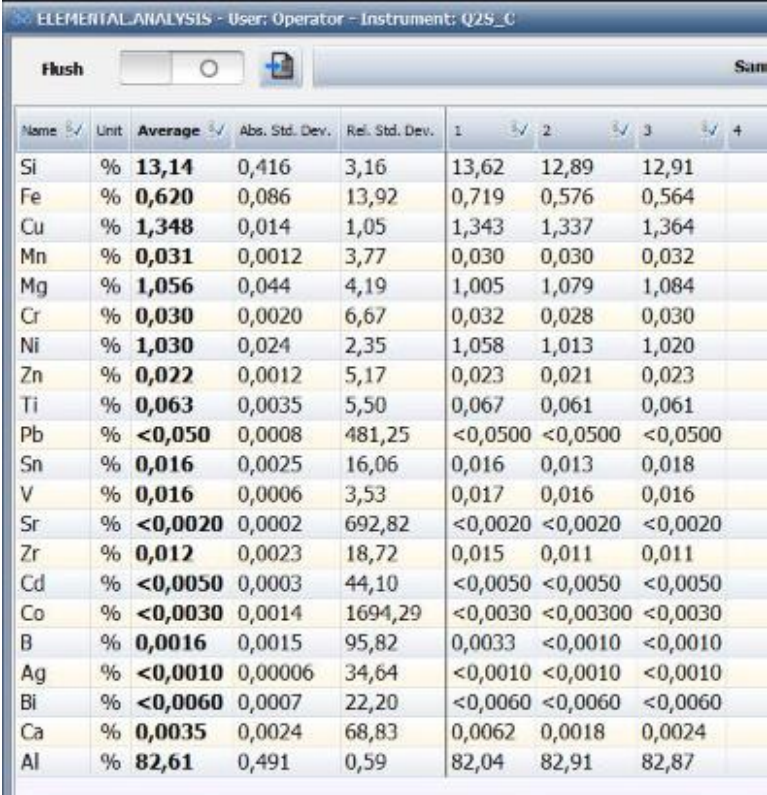
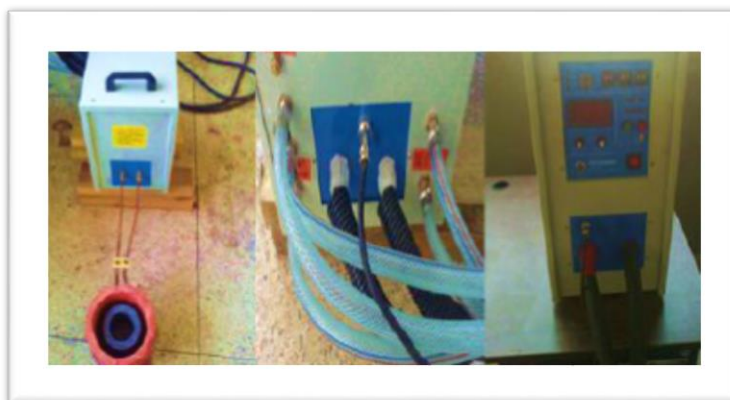
	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
<b>ENSAYO ESPECTROMETRICO</b>			
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>			
<b>Material a ensayar:</b>	Fundición del pistón	<b>Muestra:</b>	<b>Fecha:</b> 04/09/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b>	Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingeniería Mecánica-FICM		
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO</b>			
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>			
<b>Ataque químico:</b>	-	<b>Tiempo:</b>	56 (s)
<b>Instrumento:</b>	Espectrometro		
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg		
<b>RESULTADOS:</b>			
<b>TABLA DE PORCENTAJES DE COMPOSICION DE FUNDICIÓN</b>			
			

Figura 4-35 Análisis Espectrométrico de la composición de la fundición del pistón

Fuente: El autor

## 4.5 PROCESO DE FUNDICIÓN

Se realizó la fundición en el horno de inducción (figura 4-12) en el laboratorio de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato campus Huachi Chico.



*Figura 4-36 Horno de Inducción para fundir materiales.*

*Fuente: El Autor*

Para realizar, en el horno de inducción se utilizó los parámetros que se indican en la siguiente tabla.

*Tabla 4-1 Parámetros utilizados en el horno de inducción.*

PARÁMETRO	VALOR
Tipo de operación	Automático
Presión de agua	0.2 MPa
Caudal de agua	6 L/min
Tiempo de calentamiento	10 - 20 s
Tiempo de permanencia	20 s
Tiempo de enfriamiento	10 s
Amperaje	300 – 800 A

*Fuente: El Autor*

El proceso para la elaboración de la fundición de chatarra de pistones de buses HINO FG se ha centrado en el siguiente diagrama de flujo Fig: 4.37

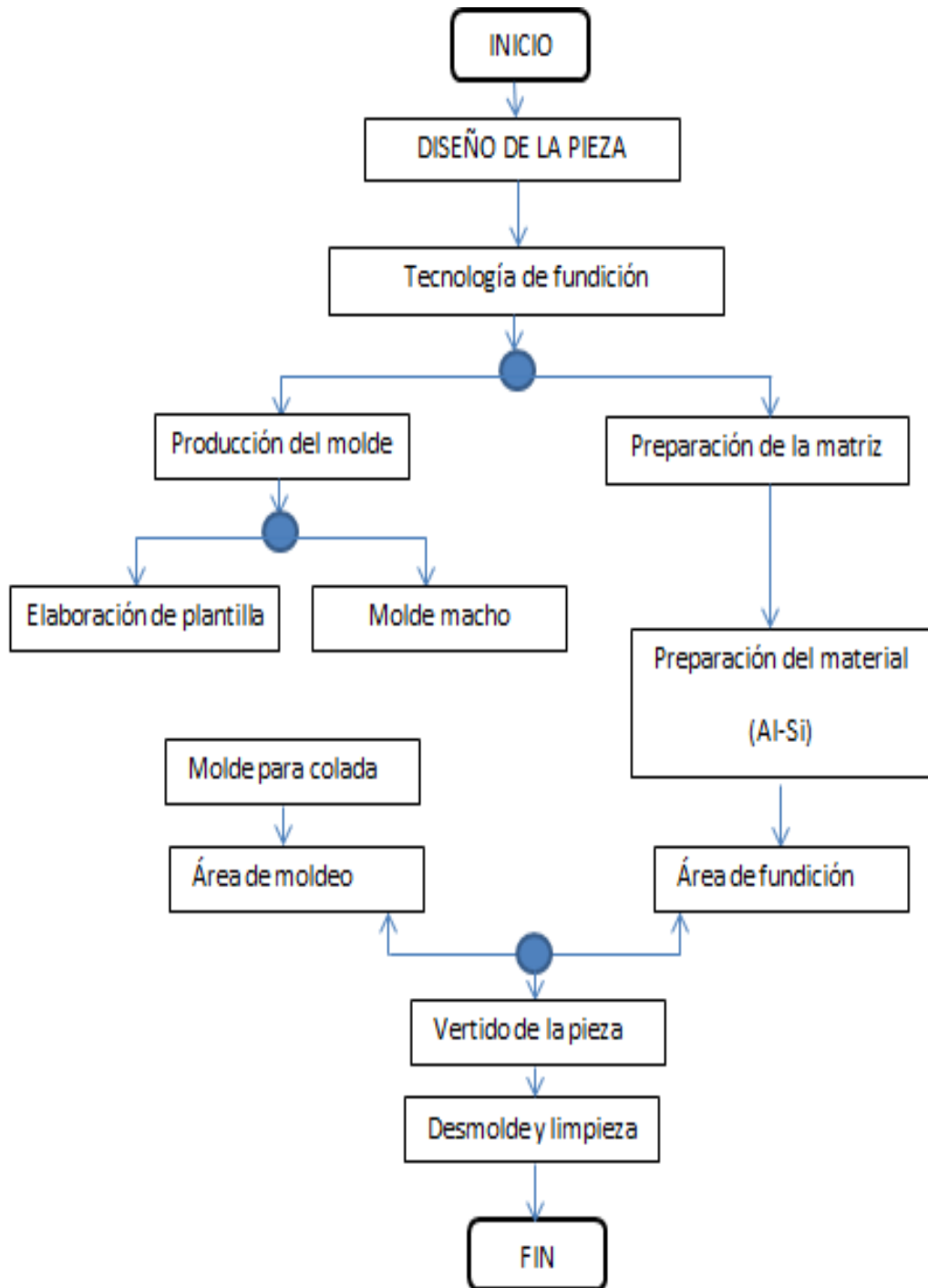


Figura 4-37 Diagrama de flujo del proceso de fundición.

Fuente: El Autor

**Obtención de la probeta en su estado inicial antes de su mecanizar.**

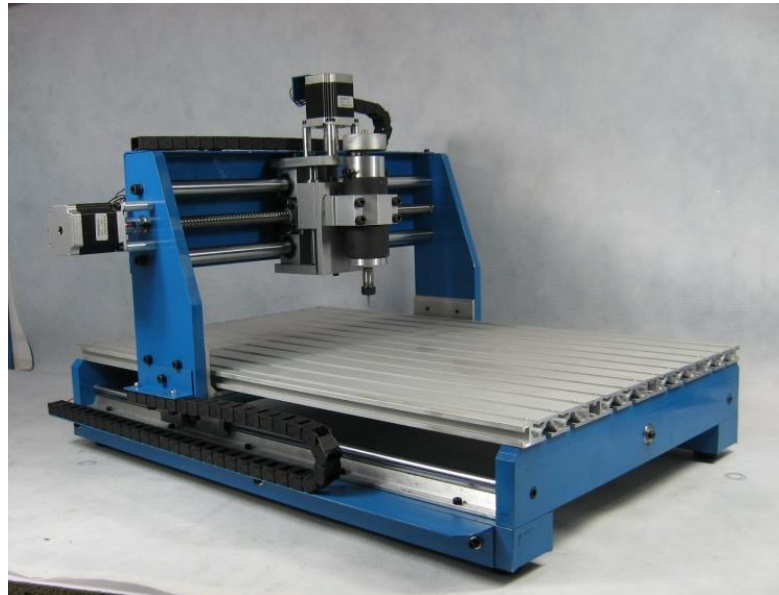


*Figura 4-38 Platinas Fundidas puestas en la máquina CNC para el corte*

*Fuente: El Autor*

#### **4.1.4 Obtención de las probetas**

Las probetas se obtuvieron mediante un proceso de maquinado en una máquina fresadora (ROUTER CNC) para corte y grabado en 3D de 60x90x8cm (XYZ).



*Figura 4-39 Router CNC*

*Fuente: El Autor*





*Figura 4-40 Corte de la pieza en la máquina Router CNC*

*Fuente: El Autor*

## **4.6 OBTENCIÓN DE LA CURVA S-N**

### **4.1.4.1 Verificación de la frecuencia de aplicación del esfuerzo**

En la placa del motor de la máquina para ensayos a fatiga en viga rotativa se observa que éste trabaja a 1720 RPM, para tener una mayor seguridad sobre la frecuencia que se utilizará se realizaron 16 ensayos lo cual tenemos que medir el tiempo en relación con el número de ciclos que gira la máquina, y lo podremos observar en un contador electrónico que se encuentra instalado en la misma. En la siguiente tabla observaremos que nosotros trabajaremos a 1799 RPM o 29,99 Hz de frecuencia a la cual trabaja la máquina para ensayos de polímeros, la misma que fue construida y diseñada por el Ing. Jorge Guamanquispe en la Universidad Técnica de Ambato como nos indica la norma ASTM D 671. El presente estudio se realizará con frecuencia de 29,99 Hz.

Tabla 4-2 Determinación de la frecuencia de aplicación de cargas

Determinación de la frecuencia				
Ensayo #	Revoluciones	Tiempo [min]	Frecuencia [Hz]	RPM
1	662	22	30,091	1805,455
2	1471	49	30,020	1801,224
3	1816	61	29,770	1786,230
4	2191	72	30,431	1825,833
5	2322	77	30,156	1809,351
6	2403	81	29,667	1780,000
7	3413	114	29,939	1796,316
8	3608	120	30,067	1804,000
9	3626	121	29,967	1798,017
10	3979	133	29,917	1795,038
11	3998	134	29,836	1790,149
12	5394	180	29,967	1798,000
13	7675	256	29,980	1798,828
14	10800	360	30,000	1800,000
15	23380	780	29,974	1798,462
16	170250	5683	29,958	1797,466

*Fuente: Tesis de Maestría UTA (Ing. Guamanquispe Jorge)*

Con los datos de la tabla anterior se calculan los parámetros de tendencia central y de dispersión tanto para las revoluciones por minuto del motor como para la frecuencia.

Tabla 4-3 Datos Estadísticos para las revoluciones del motor

DATOS ESTADISTICOS	
RPM	
Media	<b>1799,023</b>
Error típico	2,525
Mediana	1798,239
Moda	NA
Desviación estándar	10,099
Varianza de la muestra	101,982
Curtosis	2,946
Coefficiente de asimetría	0,814
Rango	45,833
Mínimo	1780,000
Máximo	1825,833
Suma	28784,367
Cuenta	16,000

*Fuente: Tesis de Maestría UTA (Ing. Guamanquispe Jorge)*

Tabla 4-4 Datos Estadísticos para la frecuencia

DATOS ESTADISTICOS	
FRECUENCIA	
Media	29,984
Error típico	0,042
Mediana	29,971
Moda	NA
Desviación estándar	0,168
Varianza de la muestra	0,028
Curtosis	2,946
Coficiente de asimetría	0,814
Rango	0,764
Mínimo	29,667
Máximo	30,431
Suma	479,739
Cuenta	16

Fuente: Tesis de Maestría UTA (Ing. Guamanquispe Jorge)

#### 4.1.4.2 Relación de esfuerzos

La relación de esfuerzos es el cociente entre el esfuerzo mínimo y el esfuerzo máximo que se genera en la probeta, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

#### 4.1.4.3 Análisis de Deflexión

La deformación de la viga en voladizo se analiza con la ecuación diferencial que tenemos a continuación:

$$EIY'' = M$$

El momento flector en donde la falla que se genera en el punto X es:

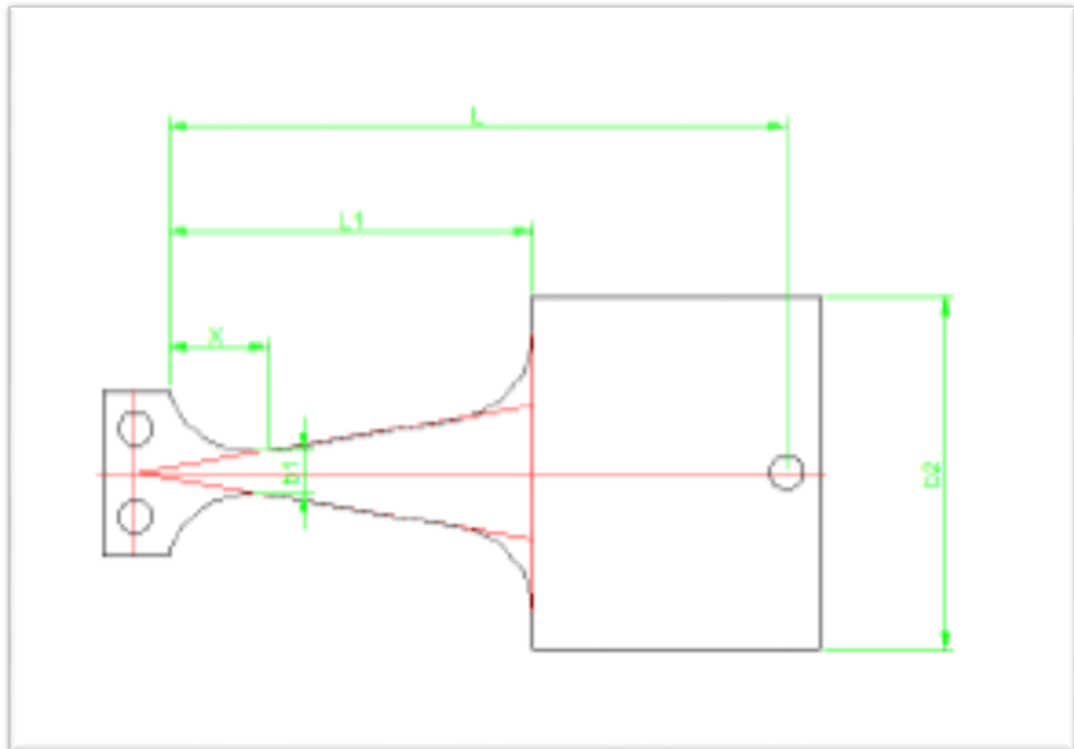
$$M_x = PX - PL$$

Realizando el primer caso de factorización y reagrupando tenemos que el momento flector es:

$$M_x = -\left(1 - \frac{X}{L}\right) PL \quad \text{Ecuación 4. 3}$$

El esfuerzo a una distancia X desde el extremo izquierdo que es donde la probeta falla nos queda así:

$$\sigma_x = -\frac{6PL}{bt^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \quad \text{Ecuación 4. 4}$$



*Figura 4-41 Probeta*

**Fuente:** Tesis de Maestría UTA (Ing. Guamanquispe Jorge)

En la máquina se propuso realizar ensayos a fatiga por flexión del aluminio, las probetas se obtuvieron fundiendo y luego mecanizándolas en la máquina CNC,

luego se realizaron los respectivos ensayos. La ecuación de la carga aplicada se la puede tomar de la tesis realizada en el 2012 en la Universidad Técnica de Ambato por el Ing. Jorge Guamanquispe cuyo tema fue: “Estudio del comportamiento a fatiga mecánica del teflón y Nylon para determinar la relación esfuerzo-número de ciclos bajo la aplicación de cargas variables y su influencia en el diseño de máquinas”.

La ecuación que fue hallada es la siguiente:

$$P = \frac{3(C_3L + C_4 - Y_2EI_2)}{L^3} \quad \text{Ecuación 4. 5}$$

#### 4.1.4.2.1 Tabla de relación de Esfuerzo y número de ciclos para la fundición de (Al-Si).

Tabla 4-5 Datos del ensayo de aluminio

Prob	ciclos	t[m]	b1[m]	b2[m]	L1[m]	L[m]	X[m]	I1[m^4]	I2[m^4]	def2[m]	F[N]
1	1E+05	0,0061	0,0060	0,057	0,05	0,087	0,0135	1,1E-10	1E-09	0,0005	18,5
2	1E+06	0,0061	0,0059	0,057	0,05	0,088	0,0125	1,1E-10	1E-09	0,0007	27
3	8E+05	0,0061	0,0058	0,057	0,05	0,084	0,0122	1,1E-10	1E-09	0,0008	30
4	4E+05	0,0061	0,0057	0,057	0,05	0,088	0,0143	1,1E-10	1E-09	0,0009	32
5	26428	0,0061	0,006	0,057	0,05	0,089	0,0165	1,1E-10	1E-09	0,001	39
6	41231	0,0061	0,006	0,057	0,05	0,083	0,0124	1,1E-10	1E-09	0,001	36
7	37845	0,0061	0,006	0,057	0,05	0,086	0,0124	1,1E-10	1E-09	0,0011	41
8	49416	0,0061	0,006	0,057	0,05	0,086	0,013	1,1E-10	1E-09	0,0012	44
9	19888	0,0062	0,006	0,057	0,05	0,082	0,0143	1,2E-10	1E-09	0,0014	55
10	5444	0,0062	0,0059	0,057	0,05	0,089	0,0135	1,2E-10	1E-09	0,0013	49
11	5211	0,0061	0,006	0,057	0,05	0,087	0,0125	1,1E-10	1E-09	0,0016	58
12	4776	0,0061	0,006	0,057	0,05	0,086	0,013	1,1E-10	1E-09	0,0016	58
13	3214	0,0066	0,0055	0,057	0,05	0,085	0,0114	1,3E-10	1E-09	0,0017	75
14	2185	0,0066	0,006	0,057	0,05	0,089	0,0114	1,4E-10	1E-09	0,002	96
15	3421	0,0060	0,0061	0,057	0,05	0,087	0,0163	1,1E-10	1E-09	0,0025	89
16	2398	0,0062	0,006	0,057	0,05	0,088	0,0145	1,2E-10	1E-09	0,003	116

Fuente: El Autor

#### 4.1.4.2.2 Relación esfuerzo - número de ciclos para la fundición de (Al-Si).

Se determinó la relación esfuerzo en función del número de ciclos, la misma que se realizó mediante un circuito electrónico y un circuito de comando para el encendido y apagado del motor luego se puede apreciar la gráfica del esfuerzo en función del logaritmo vulgar del número de ciclos.

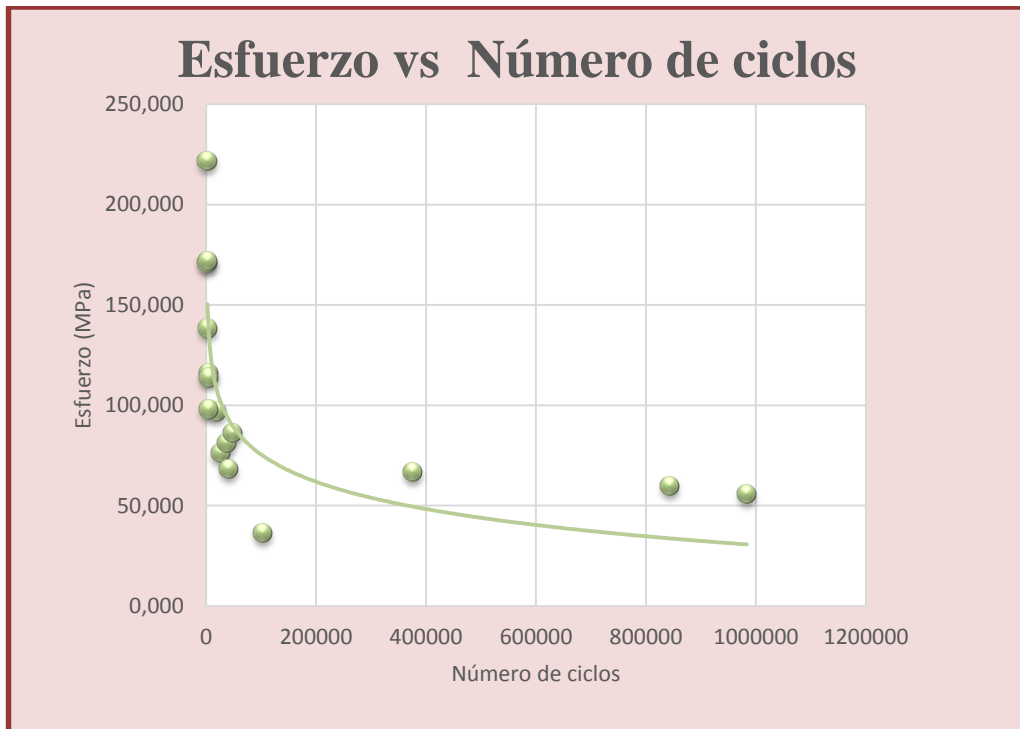


Figura 4-42 Curva esfuerzo Número de ciclos

*Fuente: El Autor*

A continuación se presenta la gráfica Esfuerzo en función del Número de ciclos hasta el fallo de la probeta.

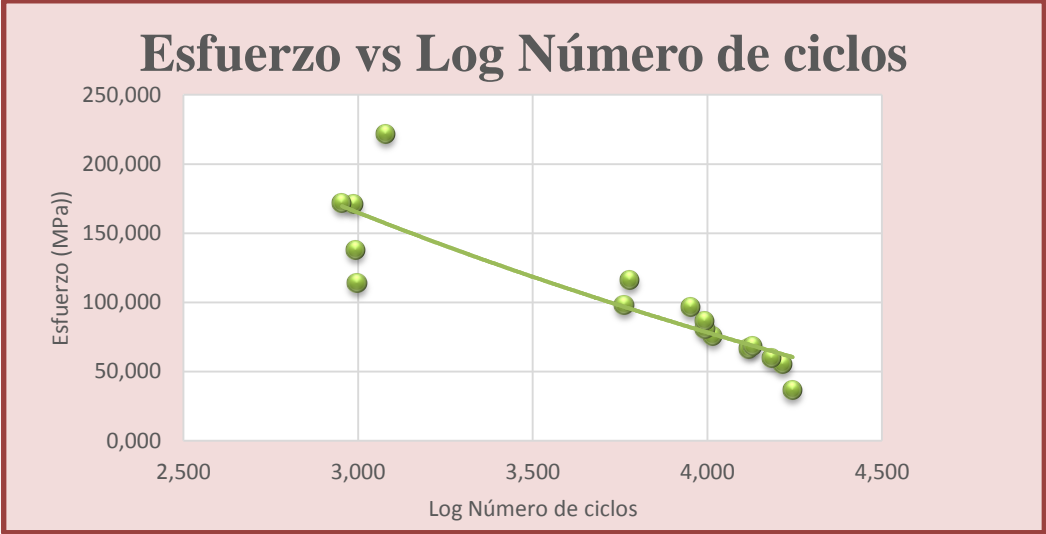


Figura 4-43 Relación Esfuerzo vs Log Número de ciclos

Fuente: El Autor

En la siguiente gráfica se presenta la relación de Log de esfuerzos en función del Log Número de ciclos de fallo de las probetas.

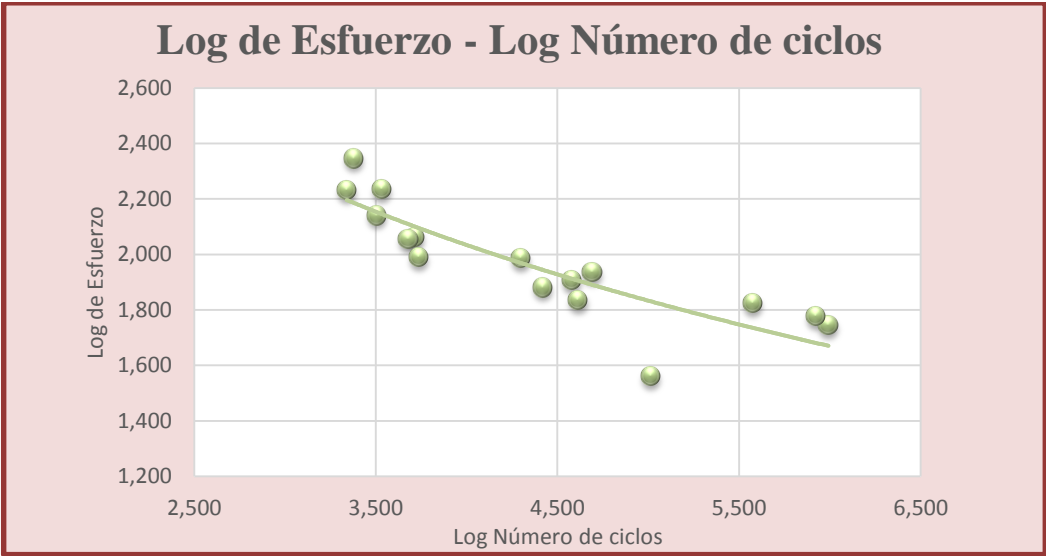


Figura 4-44 Relación Log Esfuerzo vs Log Número de ciclos

Fuente: El Autor

#### 4.1.4.3 Regresión Lineal para Aluminio-Silicio de pistones de buses Hino FG

Para obtener la regresión lineal se utiliza la formula  $Y = A + Bx$  en donde tenemos que:

$X = Variable\ Explicativa$

$Y = Variable\ dependiente$

La regresión lineal nos permite encontrar la recta que mayor se ajusta en un determinado número de puntos.

La regresión lineal que tenemos para estos datos es la siguiente:

$$C = A + bLogN$$

Y reemplazando tenemos lo siguiente:

$$Y = C$$

$$X = LogN$$

Obtenemos la siguiente ecuación:

$$Y = A + Bx$$

Ecuación 4. 6

El parámetro  $\hat{b}$  viene determinado por la siguiente formula:

$$\hat{b} = \frac{k \sum_{i=1}^k X_i Y_i - \sum_{i=1}^k X_i \sum_{i=1}^k Y_i}{k \sum_{i=1}^k X_i^2 - (\sum_{i=1}^k X_i)^2}$$

Ecuación 4. 7



Y el parámetro  $\hat{A}$  está dado por:

$$\hat{A} = \hat{Y} - \hat{b}\hat{X} \quad \text{Ecuación 4. 8}$$

En donde:

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{Ecuación 4. 9}$$

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{Ecuación 4. 10}$$

Como se muestra en la tabla siguiente obtenemos los valores para la regresión:

Tabla 4-6 Tabla para el cálculo de regresión

N	Log N	S [Mpa]	Log S
103442	5,015	36,543	1,563
983335	5,993	55,712	1,746
843210	5,926	59,884	1,777
376761	5,576	66,717	1,824
26428	4,422	75,988	1,881
41231	4,615	68,304	1,834
37845	4,578	81,096	1,909
49416	4,694	86,321	1,936
19888	4,299	96,865	1,986
5444	3,736	97,872	1,991
5211	3,717	116,125	2,065
4776	3,679	113,787	2,056
3214	3,507	138,242	2,141
2185	3,339	171,019	2,233
3421	3,534	171,921	2,235
2398	3,380	221,800	2,346

*Fuente: El Autor*

Con los valores anteriores se realizó la regresión obteniendo los siguientes valores:



$$\hat{b} = -1,475$$

$$\hat{A} = 3,7682$$

La ecuación nos queda de la siguiente manera:

$$S = -1,475 \text{ Log}(N) + 3,7682$$

Tabla 4. 1 Datos para el cálculo de regresión

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
<b>REGRESIÓN LINEAL</b>								
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ALUMINIO</b>								
<b>Tipo estudio:</b>	De laboratorio		<b>Nº de probetas</b>		19			
<b>Solicitado por:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		<b>Fecha de elaboración</b>		13/09/2015			
<b>Realizado por:</b>	León Tainy		<b>Supervisado</b>		Ing. Guamanquispe			
<b>Lugar:</b>	Universidad Técnica de Ambato							
<b>Material:</b>	Aluminio		<b>Frecuencia</b>		30 Hz			
<b>RESULTADOS</b>								
N	ciclos	xi=Log ciclos	S	yi =Log S	yi calc	XY	x <sup>2</sup>	Y-Yi
1	103442	5,015	36,543	1,563	1,849	7,837	25,147	-0,286
2	983335	5,993	57,712	1,761	1,661	10,555	35,912	0,100
3	843210	5,926	59,844	1,777	1,674	10,531	35,117	0,103
4	376761	5,576	66,717	1,824	1,741	10,172	31,093	0,083
5	26428	4,422	75,988	1,881	1,962	8,317	19,555	-0,082
6	41231	4,615	68,304	1,834	1,925	8,466	21,300	-0,091
7	37845	4,578	81,096	1,909	1,932	8,739	20,958	-0,023
8	49416	4,694	86,321	1,936	1,910	9,088	22,032	0,026
9	19888	4,299	96,865	1,986	1,986	8,538	18,478	0,000
10	5444	3,736	97,872	1,991	2,094	7,437	13,957	-0,103
11	5211	3,717	116,125	2,065	2,097	7,675	13,816	-0,032
12	4776	3,679	113,787	2,056	2,105	7,564	13,536	-0,049
13	3214	3,507	138,242	2,141	2,138	7,507	12,299	0,003
14	2185	3,339	171,019	2,233	2,170	7,457	11,152	0,063
15	3421	3,534	171,921	2,235	2,132	7,900	12,490	0,103
16	2398	3,380	221,800	2,346	2,162	7,929	11,423	0,184
Σ		70,010	1660,16	31,538	31,538	135,71	318,265	-2,22E-15

Fuente: El Autor

En la siguiente figura se muestra la relación del esfuerzo corregido versus Log Número de ciclos.

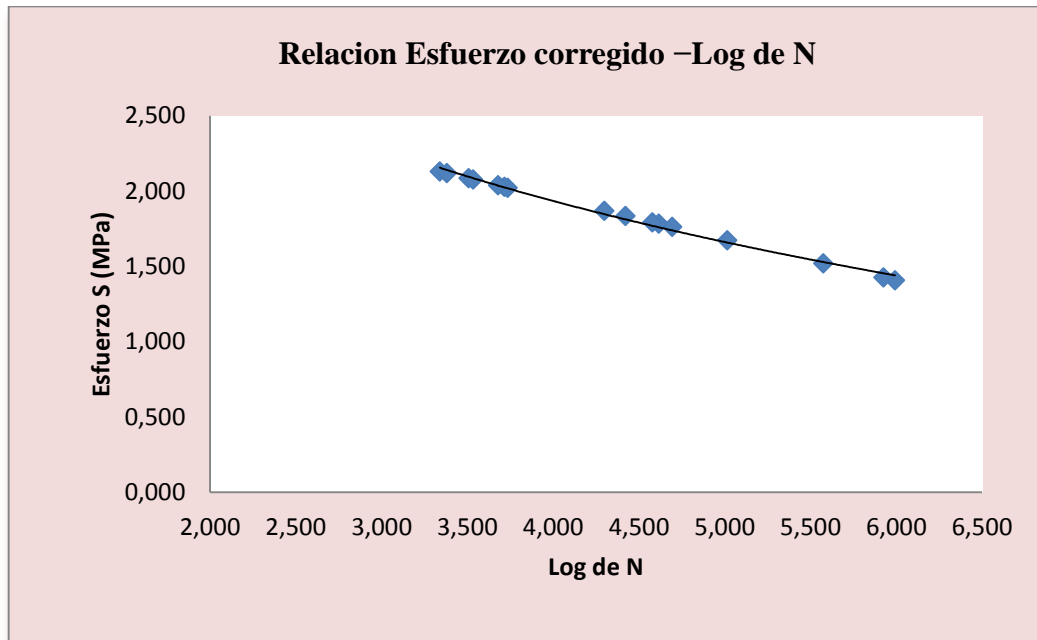


Figura 4-45 Relación Esfuerzo corregido – Log N

Fuente: El Autor

## 4.7 DEMOSTRACIÓN DE LA HIPÓTESIS

### 4.7.1 Demostración de la hipótesis para el aluminio

Después de haber realizado los ensayos y haber obtenido los resultados procederemos a realizar la comprobación de la hipótesis mediante el cálculo del T de student, para observaciones realizadas en dos grupos.

Para realizar la comprobación requeriremos de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\bar{x}}{s_x/\sqrt{n}}$$

Ecuación 4. 11

Donde:

$T = t$  student

$\bar{x}$  = media

$n$  = observaciones

$s_x$  = desviación estándar

Se comprueba la hipótesis estadísticamente teniendo:

$H_a$  = Hipótesis alterna ( $H_a < 0$ )

$H_o$  = Hipótesis Nula ( $H_o > 0$ )

### **Hipótesis Alterna**

Con el estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de buses Hino FG se podrá determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos.

### **Hipótesis Nula**

Con el estudio a fatiga mecánica de fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de buses Hino FG no se podrá determinar el diagrama esfuerzo-número de ciclos.

Para el presente proyecto se tomará un nivel de confiabilidad del 95%, por lo que se tiene un nivel de significación  $\alpha = 0,05$  por tratarse de muestras pequeñas ( $<20$ ).

Dividiremos para dos por lo que se analiza para las dos colas la significativa.

$$P = \frac{0,05}{2} = 0,025$$

Los grados de libertad son:

$$gl = 16 - 1$$

Con P y gl vamos a las tablas en los anexos para ver el “t” student:

$$t = 2,131$$

Para determinar la frecuencia esperada se basó en el número de ciclos hasta la falla, obtenidos en MPa.

Para el cálculo estadístico “T se calcula el promedio de las diferencias muestrales:

$$\bar{X} = \frac{\sum Xi}{n} \quad \text{Ecuación 4. 12}$$

Para calcular la cuasi varianza se tiene:

$$S_{x^2} = \frac{\sum (Xi - \bar{X})^2}{n - 1} \quad \text{Ecuación 4. 13}$$

Tabla 4-7 Datos para la realización de demostración de la hipótesis

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO							
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA							
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA							
<b>REGRESIÓN LINEAL</b>								
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ALUMINIO</b>								
<b>Tipo estudio:</b>	De laboratorio		<b>N° de probetas</b>	19				
<b>Solicitado por:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		<b>Fecha de elaboración</b>	13/09/2015				
<b>Realizado por:</b>	León Tainy		<b>Supervisado</b>	Ing. Guamanquispe				
<b>Lugar:</b>	Universidad Técnica de Ambato							
<b>Material:</b>	Aluminio		<b>Frecuencia</b>	30 Hz				
<b>RESULTADOS</b>								
N	ciclos	xi=Log ciclos	Sobs	yi =Log S	Sesp	XY	Xi-Xmed	Xi
1	103442	5,015	36,543	1,563	23,915	7,837	17,977	22,353
2	983335	5,993	57,712	1,761	28,195	10,555	35,912	26,434
3	843210	5,926	59,844	1,777	27,903	10,531	35,117	26,126
4	376761	5,576	66,717	1,824	26,372	10,172	31,093	24,548
5	26428	4,422	75,988	1,881	21,322	8,317	19,555	19,441
6	41231	4,615	68,304	1,834	22,167	8,466	21,300	20,333
7	37845	4,578	81,096	1,909	22,005	8,739	20,958	20,096
8	49416	4,694	86,321	1,936	22,512	9,088	22,032	20,575
9	19888	4,299	96,865	1,986	20,782	8,538	18,478	18,796
10	5444	3,736	97,872	1,991	18,320	7,437	13,957	16,329
11	5211	3,717	116,125	2,065	18,236	7,675	13,816	16,171
12	4776	3,679	113,787	2,056	18,071	7,564	13,536	16,015
13	3214	3,507	138,242	2,141	17,318	7,507	12,299	15,177
14	2185	3,339	171,019	2,233	16,585	7,457	11,152	14,352
15	3421	3,534	171,921	2,235	17,437	7,900	12,490	15,201
16	2398	3,380	221,800	2,346	16,761	7,929	11,423	14,415
$\Sigma$		70,010	1660,16	31,538	337,900	135,71	311,095	306,361775

Fuente: El Autor

### Regla de decisión

Hemos aceptado  $H_a$ , es decir con el estudio a fatiga mecánica del aluminio de chatarra de pistones de buses Hino FG se podrá determinar la relación esfuerzo número de ciclos, el valor de  $t$  a calcularse es menor que el valor de 2,32. Por el contrario si el valor es mayor o igual se acepta el  $H_0$ , es decir con el estudio a fatiga mecánica de chatarra de pistones de buses Hino FG no se podrá determinar la curva

esfuerzo – número de ciclos.

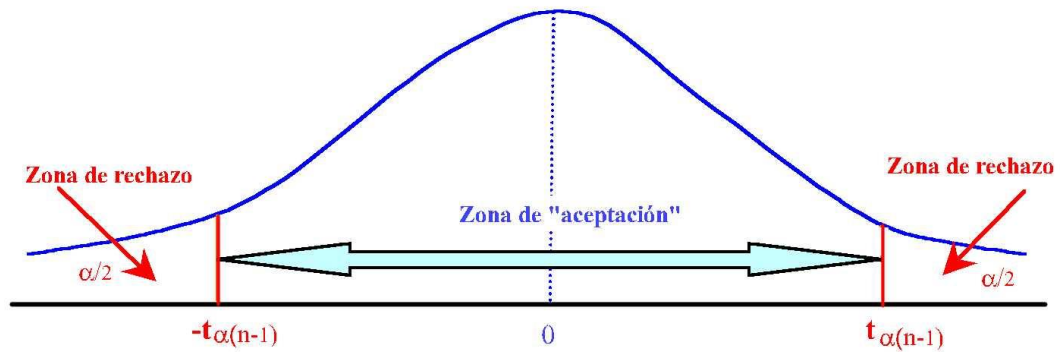
Ensayos = 16

Grados de libertad = 15

$X_{med} = 4,376$

$Sx^2 = 469,73$

$T = 0,036$



*Figura 4-46 Curva de probabilidad*

*Fuente: Libro de Estadística Carlos Escobar Soto*

Como  $t=0,036$  es decir  $< 2,031$ , es decir nos acogemos la hipótesis alterna.



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Del análisis realizado en el capítulo anterior se concluye que:

La fundición obtenida de pistones de aluminio de buses Hino FG tiene algunas características negativas como para que pueda ser utilizado en la fabricación de elementos sometidos a fatiga mecánica tales como:

Demasiado frágil como se muestra en la fotografía del tipo de fractura en donde se puede observar que el material es frágil y no muestra fatiga.



*Figura 5-1 Fractura del aluminio*

*Fuente: El Autor*

Tamaño de grano es muy grande

Tiene inclusiones

Tiene mucha porosidad

Por lo que no se ha podido obtener una curva esfuerzo - número de ciclos con la exactitud que se planteó, por el contrario como se puede observar en la figura 4-42 a 4-44 se aprecia un quiebre en la curva.

Sin embargo si se pudo obtener dicha curva para ciclos bajos como se puede ver en la figura 4.28.

A menos que se utilicen procesos de fundición adecuados para obtener el material, no se pueden ensayar a fatiga mecánica, por lo tanto no se pueden utilizar como elementos de máquinas a las que se apliquen cargas variables.

Se determinó que el mayor número de ciclos fue de 103442 con una deformación de 0,0005 que corresponde al 20 % de la resistencia última a la tracción y el menor número de ciclos fue 2398 con una deformación de 0,003.



*Figura 5-2 Tipo de falla en probeta de aluminio*

**Fuente:** El Autor

## 5.2 RECOMENDACIONES

Determinar un proceso de fabricación para obtener el material adecuado para la probeta.

Determinar parámetros para obtener una mejor calidad en la fundición.

Utilizar otros elementos de aleación para mejorar su comportamiento a fatiga.

Se debe cortar las probetas utilizando la máquina CNC ya que en otra máquina no se pudo tener las medidas exactas.

Para obtener resultados confiables se debe mejorar los procesos de obtención de las probetas con características tales como composición química, tamaño de grano, menores inclusiones.

Para mejorar el tamaño de grano y el comportamiento a fatiga mecánica se debe realizar un tratamiento térmico tal como recocido a la temperatura de 80°C ó 176°F.

Realizar y profundizar más el estudio sobre fatiga de estos materiales.

## **CAPITULO VI**

### **PROPUESTA**

Análisis de un proceso adecuado para obtener fundiciones de aluminio de chatarra de pistones de buses Hino FG con mejores propiedades mecánicas

#### **6.1 DATOS INFORMATIVOS**

De la información obtenida en el presente trabajo de investigación se ha determinado que el material obtenido no tiene buenas propiedades mecánicas a fatiga, ya que como se puede observar la sección de rotura en la figura 5-1, todas se deben a rotura frágil, por lo que se surge la necesidad de realizar estudios con el objeto de obtener una fundición que soporte cargas a fatiga.

Para mejorar las propiedades mecánicas el material debe tener un tamaño de grano más pequeño con menos inclusiones o impurezas de tal manera que se pueda obtener un material más dúctil.

Existen varias maneras de solucionar el problema tales como añadir en la colada descoreador y desgasificador, someter a compresión la colada justo en el momento que empieza la solidificación.

Como se mencionó en capítulos anteriores las aleaciones de aluminio silicio se encuentra en los cabezotes de los motores, cabezas de pistones, múltiples de admisión, carcazas de cajas de engranes, monoblocks, carcazas de bombas de agua y otros elementos de equipos industriales

## **6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA**

Se sabe que existen procesos para obtener un adecuado material en la fundición como por ejemplo los que se detallan a continuación.

### **Fundición en arena:**

Este proceso consiste en vaciar la colda en moldes obtenidos en arena, este procedimiento tiene la desventaja de obtener piezas con defectos debido a la humedad contenida en la arena, aunque también tiene ventajas tales como buena retractsibilidad, permeabilidad y reutilización, lo que le hace un proceso económico.

### **Fundición a presión:**

Este procedimiento tiene un excelente acabado superficial, es económica para cantidades grandes de producción.

### **Fundición en coquilla**

Se obtiene colando el metal fundido en coquilla metálica, se obtiene un excelente acabado superficial aunque en el interior es blando, siendo necesario para conseguir buenos resultados tener un control muy cuidadoso de la composición y de la velocidad de enfriamiento.

Las fundiciones en coquilla pueden obtenerse ajustando la composición de la fundición de tal modo que la velocidad de enfriamiento del normal en la superficie sea la justa para que se forme fundición blanca, mientras que en el interior, al ser menor la velocidad, se obtiene fundiciones atruchadas y grises.

## **6.3 JUSTIFICACIÓN**

En la Facultad de Ingeniería Mecánica contamos con instrumentos de ayuda para realizar el análisis de metalografía, de tal manera que se logra completar dicha investigación con mucha facilidad.

Anteriormente en el capítulo 4 se observó que las partículas de silicio son muy grandes por eso resulta necesario modificarlas y refinarlas, verificar realizando un proceso de metalografía del material, y a la vez realizar el proceso de espectrometría ya que con eso nos daríamos cuenta que material se le añadió a las fundiciones de aluminio obtenida de chatarra de pistones de buses Hino FG.

Es necesario mejorar la ductilidad porque el aluminio fundido pierde resistencia y se muestra difícil aplicar este material en la industria mecánica.

Se ha creído conveniente completar este trabajo de investigación realizando pruebas que mejoren la resistencia del material y se quite la fragilidad.

## **6.4 OBJETIVOS**

### **6.4.1 Objetivo General**

Mejorar calidad de la fundición de aluminio obtenido de pistones de buses Hino FG mediante la utilización de un adecuado proceso de fundición.

### **6.4.2 Objetivos Específicos**

Como objetivos específicos se puede mencionar los siguientes:

- Obtener fundiciones de aluminio con mejores propiedades a fatiga mecánica.
- Determinar un adecuado proceso de fundición.
- Comparar el comportamiento a fatiga del material obtenido.

## **6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD**

El presente proyecto es factible ya que solo se requiere de un molde para fundición, con el que se pueda aplicar carga justo en el momento en que la colada empieza a

solidificarse, es decir más o menos a unos 435 °C.

Como se pudo analizar anteriormente, todo el proceso de fundición es el utilizado con fundición en arena, la única diferencia es la utilización de un molde de acero en forma cilíndrica de 2“de diámetro y 3/8” espesor de pared.

El diseño y construcción de un recipiente de pared gruesa es totalmente factible, ya que la construcción de este es demasiado sencilla ya que el material se encuentra en el mercado y lo encontramos con facilidad y el costo es bajo y será sustentado por el autor de este trabajo de investigación.

Es importante porque se reduciría en gran parte el volumen la chatarra que existe en nuestro medio.

## **6.6 FUNDAMENTACIÓN**

### **6.6.1 Obtención de la probeta sin poros**

- Cortar la pieza a fundir (pistones de aluminio).
- Colocar el crisol y calentar el horno.
- Poner los pistones de aluminio cortados en el horno.
- Esperar 45 minutos hasta que se funda el aluminio y colocar el desgasificador y el descoriador.

- Se inserta el descoriador para eliminar escoria en la fundición.



*Figura 6-1 Inserción del descoriador*

*Fuente: El Autor*

- Se inserta el desgasificador para eliminar gases en la fundición.



*Figura 6-2 Inserción del desgasificador*

*Fuente: El Autor*

- Con una herramienta se eliminan las escorias poco a poco.





*Figura 6-3 Eliminación de escorias*

*Fuente: El Autor*

- Calentamiento del tubo a 437°C



*Figura 6-4 Calentamiento del tubo*

*Fuente: El Autor*

- Se mide la temperatura a la que se encuentra la colada.



*Figura 6-5 Medición de la temperatura en la colada*

*Fuente: El Autor*

Se mide la temperatura dentro del tubo.



*Figura 6-6 Medición de la temperatura dentro del tubo*

*Fuente: El Autor*

- Retirar el crisol del horno para empezar con la fundición



*Figura 6-7 Retirar el crisol*

*Fuente: El Autor*

- Llenar el tubo con la colada de aluminio.



*Figura 6-8 Verter la colada en el tubo*

*Fuente: El Autor*

- Con velocidad inicial cero lanzar un bloque de masa de 30 kg, el momento en que se encuentra pastoso la colada. Se determinó una masa de 30 kg ya que de esa manera se logra desarrollar la energía en el momento del impacto, necesaria para comprimir la colada y de esa manera disminuir la cantidad de poros, además esta masa está relacionada con la altura desde donde se suelta

el peso, la que se determina más adelante.



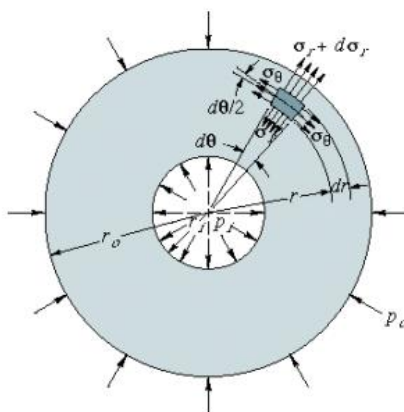
*Figura 6-9 Compresión de la probeta*

*Fuente: El Autor*

- Enfriar la probeta y cortar el tubo para poder sacarla.

Es importante diseñar y construir un molde de acero de pared gruesa el mismo que pueda soportar la presión ejercida.

### 6.6.2 Determinación de Parámetros de Diseño



*Figura 6-10 Cilindro de pared gruesa*

*Fuente: Cálculo, construcción y diseño de máquinas de Oscar Orozco Rios*

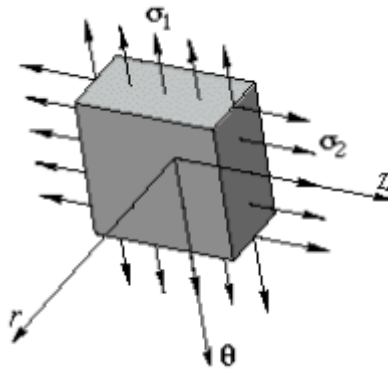


Figura 6-11 Planteamiento de equilibrio del cilindro de pared gruesa

Fuente: Cálculo, construcción y diseño de máquinas de Oscar Orozco Ríos

### Planteamiento del Equilibrio

$$\left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr\right)(r + dr)d\theta dz - \sigma_r r d\theta dz - 2\sigma_\theta \text{sen}\left(\frac{d\theta}{2}\right) dr dz = 0$$

Tensión y área:

a) Como  $d\theta$  es muy pequeño  $= \text{sen}\left(\frac{d\theta}{2}\right) = \frac{d\theta}{2}$

$$\left(\sigma_r r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr r + dr\sigma_r + dr \frac{d\sigma_r}{dr} dr\right) d\theta dz - \sigma_r r d\theta dz - 2\sigma_\theta \frac{d\theta}{2} dr dz = 0$$

b) Factor común  $d\theta dz$

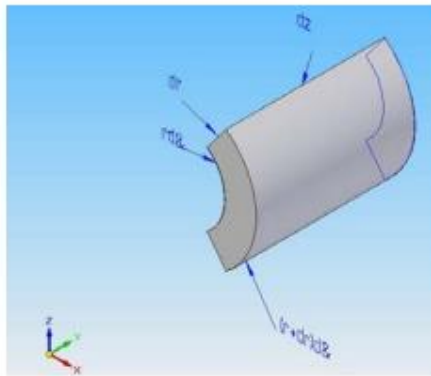
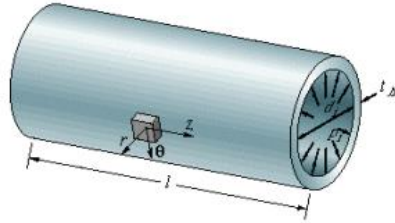
$$\left(\sigma_r r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr r + dr\sigma_r + dr \frac{d\sigma_r}{dr} dr - \sigma_r r - \sigma_\theta dr\right) d\theta dz = 0$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} dr r + dr\sigma_r + dr \frac{d\sigma_r}{dr} dr - \sigma_\theta dr = 0$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} dr r + dr \sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr^2 - \sigma_\theta dr = 0$$

c) Despreciando los infinitésimos de segundo orden

$$\frac{d\sigma_r}{dr} dr r + d\sigma_r = \sigma_\theta dr$$



$$\sigma_\theta = \frac{\frac{d\sigma_r}{dr} dr r + d\sigma_r}{dr}$$

$$\sigma_\theta = \frac{d\sigma_r}{dr} dr r + \frac{d\sigma_r}{dr}$$

$$\sigma_\theta = r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r$$

Esta última ecuación da una relación entre  $\sigma_r$  y  $\sigma_\theta$

Elemento cilíndrico polar de un cilindro de pared gruesa (antes y después de la deformación).

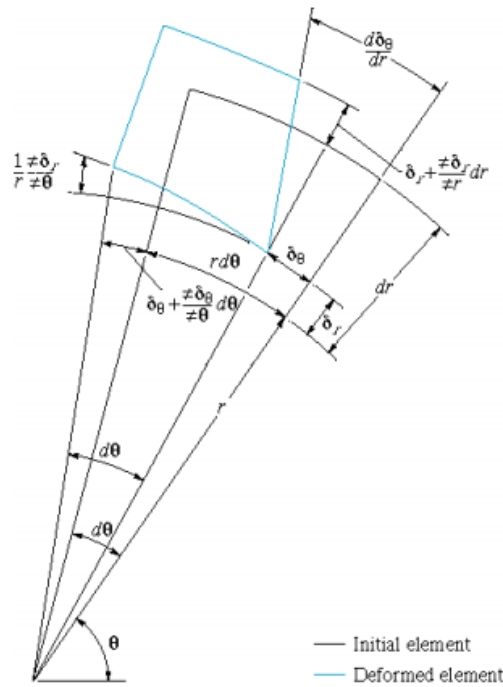


Figura 6-12 Deformación del cilindro de pared gruesa

Fuente: El Autor

Hay que obtener una segunda relación de la deformación del cilindro, para ello hay que suponer que la deformación longitudinal de todas las fibras es igual, por lo tanto la deformación es simétrica respecto al eje y por lo tanto existe un desplazamiento radial de todos los puntos de la pared del cilindro, dicho desplazamiento es constante en la dirección circunferencial  $\theta$ , pero varía con la distancia  $r$  (radio).

Donde:

$\delta_r =$  desplazamiento radial de una superficie cilíndrica de radio  $r$

$\delta_r + \frac{\partial \delta_r}{\partial r} dr =$  desplazamiento radial de una superficie de  $r + dr$

$\epsilon_r =$  elongación unitaria en la dirección radial  $r$

$\epsilon_\theta =$  elongación unitaria en la dirección circunferencial  $\theta$

Según el esquema anterior

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r + \frac{\partial \delta_r}{\partial r} dr - \delta_r}{dr} = \frac{\delta_r + \frac{\partial \delta_r}{\partial r} dr - \delta_r}{dr} = \frac{\partial \delta_r}{\partial r}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{(r + \delta_r)d\theta - r d\theta}{r d\theta} = \frac{r d\theta + \delta_r d\theta - r d\theta}{r d\theta} = \frac{(r + \delta_r - r)d\theta}{r d\theta} = \frac{\delta_r}{r}$$

Donde:

$r + \delta_r = \delta_\theta$  Según la figura

$r d\theta$  (Distancia de un arco cuyo radio es  $r$  y ángulo es  $d\theta$ )

### LEY DE HOOKE

Las deformaciones longitudinales  $\varepsilon$ , son proporcionales a las tensiones normales  $\sigma$  que las producen. Hay que observar que el alargamiento  $\varepsilon$  debido a las tensiones normales  $\sigma$ , va acompañado de acortamientos longitudinales en dirección de los otros ejes.

$$\varepsilon_r = \frac{\partial \delta_r}{\partial r} = \frac{\sigma_r - \nu \sigma_\theta}{E} \quad \text{Ecuación 6. 1}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\delta_r}{r} = \frac{\sigma_\theta - \nu \sigma_r}{E} \quad \text{Ecuación 6. 2}$$

Con las ecuaciones 6.1 y 6.2 se pueden obtener las tensiones en función de las elongaciones:



$$\sigma_r = \frac{(\varepsilon_r - \nu \varepsilon_\theta)E}{1 - \nu^2} \quad \text{Ecuación 6. 3}$$

$$\sigma_\theta = \frac{(\varepsilon_\theta - \nu \varepsilon_r)E}{1 - \nu^2} \quad \text{Ecuación 6. 4}$$

Donde:

E= módulo de elasticidad longitudinal

$\nu$ = coeficiente de Poisson

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)}{E} \quad \text{Ecuación 6. 5}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)}{E} \quad \text{Ecuación 6. 6}$$

Formulación

- a) Sustituyendo las ecuaciones 2 y 3 (elongación unitaria) en las ecuaciones 4 y 5 resulta:

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{\partial \delta_r}{\partial r} - \nu \frac{\delta_r}{r} \right) \quad \text{Ecuación 6. 7}$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1 - \nu^2} \left( \frac{\delta_r}{r} - \nu \frac{\partial \delta_r}{\partial r} \right) \quad \text{Ecuación 6. 8}$$

Introduciendo estas expresiones en la ecuación 1, hallamos la ecuación diferencial de los desplazamientos:

$$\frac{d^2 \delta_r}{dr^2} + \frac{d\delta_r}{dr} \frac{1}{r} - \frac{\delta_r}{r^2} = 0$$

La solución es:

$$\delta_r = C_1 + \frac{C_2}{r}$$

Sustituimos la ecuación 8 en las ecuaciones 6 y 7, teniendo en cuenta:

$$\frac{d\delta_r}{dr} = C_1 - \frac{C_2}{r^2}$$

Esfuerzo Radial:

$$\sigma_r = \frac{\varepsilon}{1 - \nu^2} \left( C_1(1 - \nu) - C_2 \frac{1 - \nu}{r^2} \right) \quad \text{Ecuación 6. 9}$$

Esfuerzo en dirección teta:

$$\sigma_{\theta} = \frac{\varepsilon}{1 - \nu^2} \left( C_1(1 + \nu) + C_2 \frac{1 + \nu}{r^2} \right) \quad \text{Ecuación 6. 10}$$

Determinar  $C_1$  y  $C_2$  aplicando condiciones de contorno en las superficies interior y exterior del cilindro:

$$\sigma_r = -P_i \text{ en } r = r_i$$

$$\sigma_r = -P_o \text{ en } r = r_o$$

Donde:

El signo marca que la tensión es de compresión:

$$C_1 = \frac{1 - \nu}{E} \left( \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \right) \quad \text{Ecuación 6. 11}$$

$$C_2 = \frac{1 - \nu}{E} \left( \frac{(P_o - P_i)(r_o r_1)^2}{r_o^2 - r_i^2} \right) \quad \text{Ecuación 6. 12}$$

Introduciendo los valores de  $C_1$  y  $C_2$  y las ecuaciones 9 y 10

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 - (P_o - P_i) \left( \frac{r_o r_1}{r} \right)^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{Ecuación 6. 13}$$

$$\sigma_r = \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2 + (P_o - P_i) \left( \frac{r_o r_1}{r} \right)^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad \text{Ecuación 6. 14}$$

## CÁLCULO DEL DISEÑO DE PARED GRUESA

Datos:

$$P_i = 35 \text{ Mpa}$$

$$r_i = 0,0225 \text{ m}$$

$$r_o = 0,0285 \text{ m}$$

$$P_o = 0$$

Aplicando la ecuación anterior:

$$\sigma_\theta = \frac{P_i r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}$$

$$\sigma_\theta = 57,9 \text{ MPa} = \sigma_r$$

Conclusión: como es menor que el límite de fluencia que es 70Mpa entonces se puede decir que las dimensiones son aceptables.

Tensiones en un cilindro de pared gruesa:

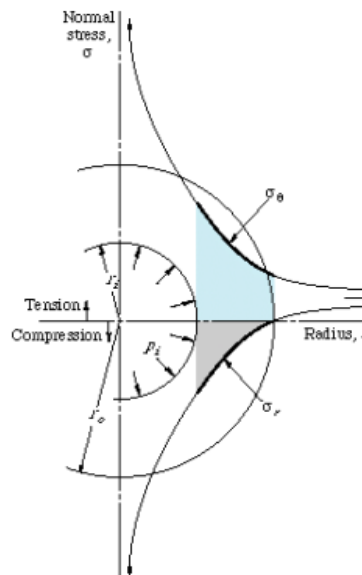


Figura 6-13 Cilindro de pared gruesa internamente presurizado, que muestra los esfuerzos circunferencial ( en el aro) y radial para diferentes valores del radio

**Fuente:** Cálculo, construcción y diseño de máquinas de Oscar Orozco Rios

### Cálculo de el esfuerzo normal:

Teniendo en cuenta que se puede calcular la energía cinética y la energía potencial podemos aplicar la ley de Hooke:

$$E_c = mgh \quad \text{Ecuación 6. 15}$$

$$E_{pe} = \frac{1}{2}kx^2 \quad \text{Ecuación 6. 16}$$

Para el cálculo de la constante de rigidez del aluminio tenemos los siguiente:

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad \text{Ecuación 6. 17}$$

$$P = \delta \frac{AE}{L} \quad \text{Ecuación 6. 18}$$

$$k = \frac{AE}{L} \quad \text{Ecuación 6. 19}$$

En donde tenemos que:

$\delta =$  *deformación que se produce*

$P =$  *presión*

$A =$  *área*

$E = \text{módulo de elasticidad}$

$L = \text{longitud}$

$k = \text{constante de rigidez del aluminio}$

Para calcular la distancia  $x$  que se desplaza el material tenemos que:

$$mgh = \frac{1}{2} \frac{AE}{L} x$$

$$x = mgh \frac{2L}{AE}$$

Ecuación 6. 20

Aplicando la Ley de Hooke calculamos el esfuerzo normal

$$\sigma = E\varepsilon$$

Ecuación 6. 21

En donde:

$\sigma = \text{Esfuerzo normal}$

$E = \text{módulo de elasticidad}$

$\varepsilon = \text{deformación}$

$$\varepsilon = \frac{x}{L}$$

Ecuación 6. 22

$$\sigma = mgh \frac{2l}{AE} \frac{1}{L} E$$

$$\sigma = \frac{2mgh}{A}$$

Ecuación 6. 23

En donde:

$\sigma$  = Esfuerzo normal

$$\sigma = \frac{2 * 30kg * 9,8 \frac{m}{s^2} * 1,14 m}{3,98 * 10^{-4} m^2}$$

$$\sigma = 1,684 MPa$$

### CÁLCULO DE LA ALTURA H:

$$E_{c1} + E_{p1} = E_{c2} + E_{p2}$$

Ecuación 6. 24

$$E_{c2} = E_{p2} = m * g * h$$

$$E_{c2} + E_{p2} = E_{c3} + E_{p3}$$

$$E_{c2} = -E_{p2}$$

$$m * g * h = -E_{p2}$$

$$m * g * h = -\frac{1}{2} kx^2$$

Como:

$$k = \frac{A * E}{L}$$

Entonces:

$$m * g * g = -\frac{1}{2} \frac{A * E}{L} * X^2$$

Despejando:

$$x = \sqrt{\frac{m * g * h * 2L}{A * E}}$$

Ecuación 6. 25

$$x = \sqrt{\frac{30 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2 * 1.14 \text{ m} * 2(0,25 \text{ m})}{3,98 \times 10^{-4} \text{ m}^2 * 70 \times 10^9 \text{ N/m}^2}}$$

$$x = 0,0024 \text{ m}$$

Por la ley de Hooke:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

como:

$$\varepsilon = \frac{x}{L}$$

Reemplazo:



$$P_i = \sigma$$

$$P_i = E * \frac{x}{L}$$

$$P_i = \frac{E \sqrt{\frac{m * g * h * 2L}{A * E}}}{L}$$

Ecuación 6. 26

Reemplazando:

$$P_i = S_y$$

$$S_y = \frac{E}{L} \sqrt{\frac{m * g * h * 2L}{A * E}}$$

$$h = \left(\frac{S_y * L}{E}\right)^2 \frac{A * E}{m * g * 2 * L}$$

$$h = S_y^2 \frac{L}{E} * \frac{A}{2 * m * g}$$

Datos:

Límite de fluencia del aluminio = 50-90 MPa de acuerdo a la dureza obtenida que es de 40 Brinell nuestro material tendrá un límite de fluencia de 55 MPa.

$$L = 0,25 \text{ m}$$

$$A = 3,97 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$E = 70 \text{ GPa}$$

$$m = 30 \text{ kg}$$

$$g = 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$h = (70 \times 10^6) Pa^2 \frac{1.14m}{70 \times 10^9 \frac{N}{m^2}} * \frac{3,97 \times 10^{-4} m^2}{2 * 30 kg * 9,8}$$

$$h = 0,053 \text{ m}$$

### CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{k * A}{x} (T_1 - T_2)$$

Ecuación 6. 27

Donde:

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  es el calor transmitido por unidad de tiempo

$K$  = conductividad térmica

$A$  = área de la superficie de contacto

$X$  = espesor del material

$(T_1 - T_2)$  = es la diferencia entre la parte caliente y fría = 234°C

Tiempo de enfriamiento = 25 minutos de acuerdo a la observación hasta que la probeta pueda ser manipulable.

Datos:

$k = 209,3$  para el aluminio

$T_1 = 623$

$T_2 = 389$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = 648,12 \frac{J}{s}$$

## DISEÑO DE LA ROSCA



*Figura 6-14 Rosca Acme*

*Fuente: El Autor*

Datos:

$p = \text{paso}$

$N_h = \text{Número de hilos por pulgada}$

$d = \text{diámetro mayor}$

$d_p = \text{diámetro de paso}$

$d_r = \text{diámetro menor o de raíz}$

$$N_h = \frac{1 \text{ in}}{p}$$

$$\text{Altura del filete} = \frac{d - d_r}{2}$$

Utilizando la siguiente ecuación:

Tornillos:

$$\sigma_A = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 6. 28}$$

$$F = P * A \quad \text{Ecuación 6. 29}$$

$$\sigma_A = \frac{F}{\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2)} \quad \text{Ecuación 6. 30}$$



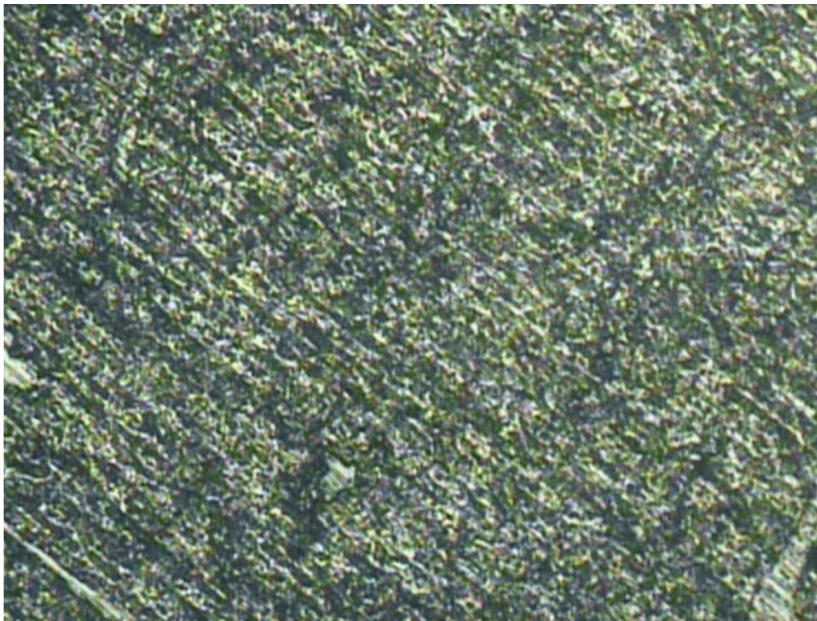
$$\sigma_A \leq S_y / 2$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{F}{2\pi D_i \left(\frac{P}{2}\right) N} \quad \text{Ecuación 6. 31}$$

$$\sigma_t \leq S_y / n$$



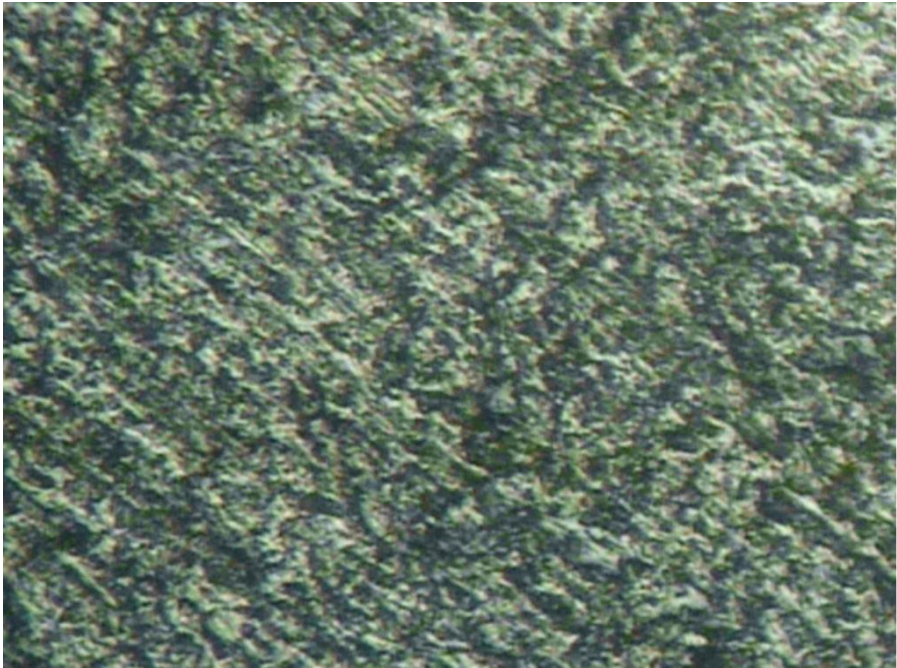
## 6.7 METALOGRAFÍA

Se realizó la metalografía de la probeta que se compactó y se mejoró la calidad de la fundición dándonos los siguientes resultados:

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Probeta Compactada	<b>Muestra:</b> Fecha:21/12/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b> Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúrico	<b>Tiempo:</b> 10 s
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de ebrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 100x</b>		
		

*Figura 6-15 Fotografía de la probeta compactada a 100x*

*Fuente: El Autor*

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
<b>ENSAYO METALOGRAFICO</b>		
<b>DATOS INFORMATIVOS:</b>		
<b>Material a ensayar:</b>	Probeta Compactada	<b>Muestra:</b> Fecha:21/12/15
<b>Realizado por:</b>	Tainy León	<b>Supervisado por:</b> Ing. Guamanquispe
<b>Centro de estudio:</b>	Laboratorio de Ingenieria Mecánica-FICM	
<b>PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRÁFICO</b>		
<b>Acondicionamiento de la superficie:</b>	Lijado, pulido y secado	
<b>Ataque químico:</b>	Acido hidrofúrico	<b>Tiempo:</b> 10 s
<b>Instrumento:</b>	Microscopio de barrido, software clemex	
<b>Diametro de la probeta:</b>	1 pulg	
<b>RESULTADOS:</b>		
<b>FOTOGRAFIA DE LA MICRO ESTRUCTURA A 200x</b>		
		

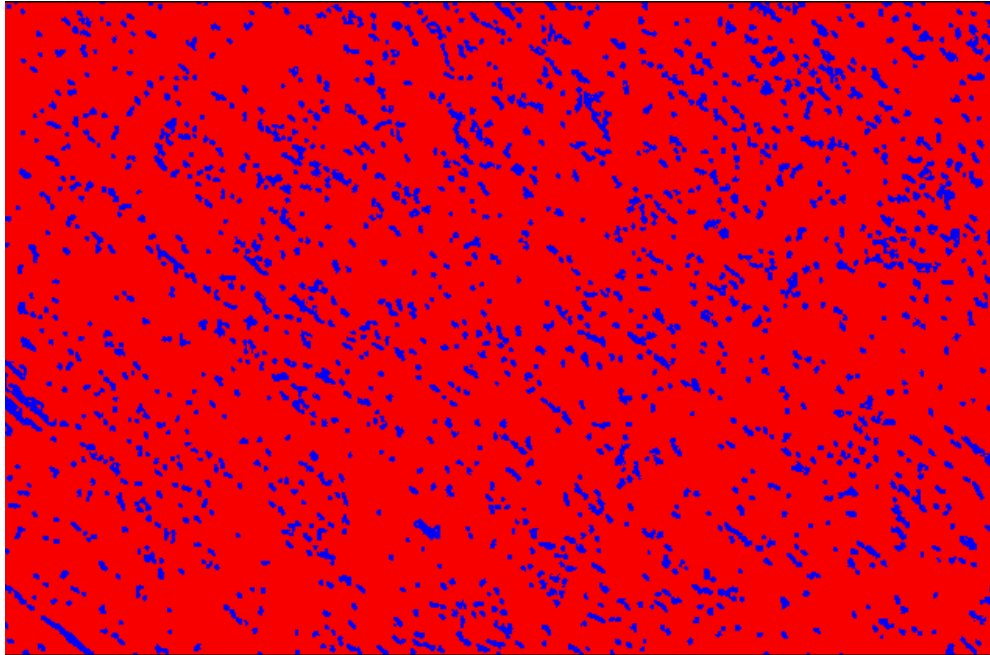
*Figura 6-16 Fotografía de la probeta compactada a 200x*

*Fuente: El Autor*

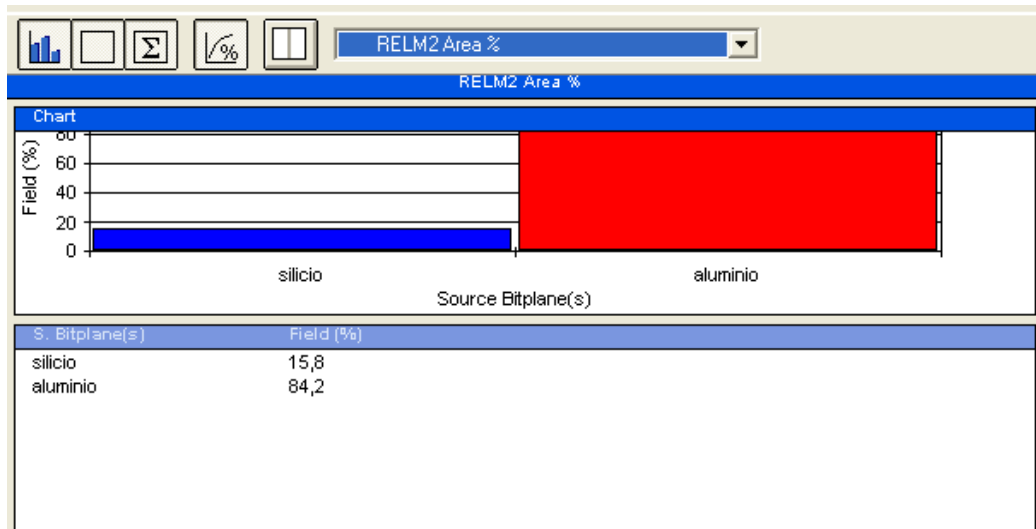
Como se puede ver en las 2 figuras anteriores el tamaño de grano se muestran mas finos

Del análisis metalográfico realizado en probetas obtenidas de fundiciones con el

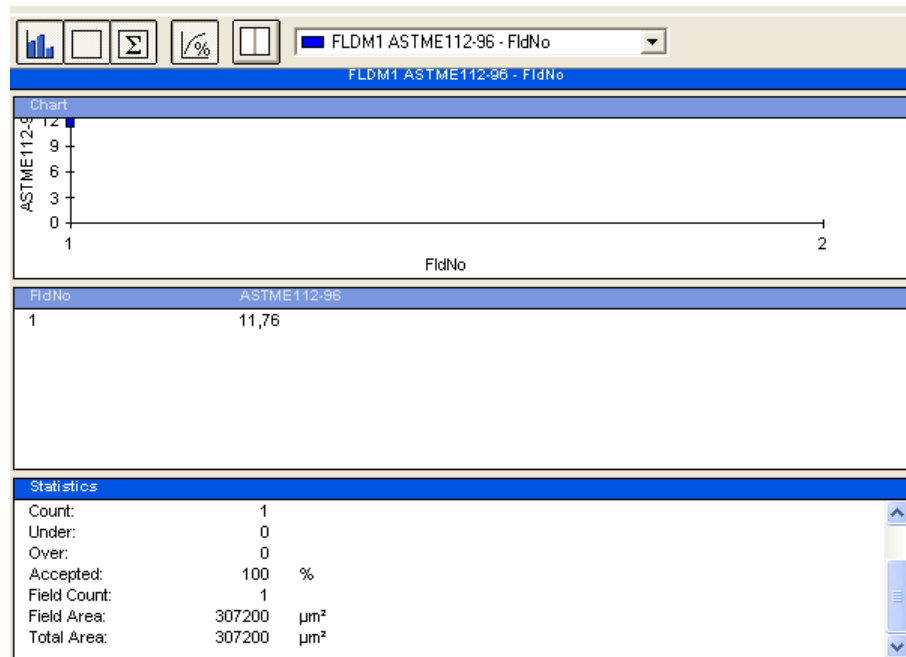
procedimiento sugerido se obtuvieron los siguientes resultados:



Se determinó que existe el 15,8% de Silicio y el 84,2% de Aluminio como se puede observar en la siguiente figura:



Así mismo se determinó que el tamaño de grano es



## 6.7 EQUIPO UTILIZADO

El equipo utilizado para la realización de dicho proyecto fue el siguiente

- Máquina para ensayos a fatiga de polímeros

Los instrumentos de medición y trazado fueron:

- Flexómetro
- Calibrador
- Escuadras

## 6.8 ADMINISTRACIÓN

En la parte administrativa se tiene que realizar un análisis de costo para la realización de las pruebas.



### 6.8.1 Costos Directos

Los costos directos comprende lo que se detalla a continuación:

*Tabla 6-1* Costos del material para ensayos

	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>TOTAL (DÓLARES)</b>
1	N/A	30	Probetas cilíndricas	10	300
2	N/A	16	Probetas planas	15	240
3	N/A	1	Tubo con rosca	20	20
4	N/A	1	Tapa con rosca	1	5
				<b>TOTAL</b>	<b>565</b>

*Fuente:* El Autor

### 6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

La presente propuesta debe estar sujeta a un plan de evaluación con el fin de mejorar los resultados que se obtengan. Con el fin de obtener fundiciones de aluminio con mejores propiedades a fatiga mecánica. De igual manera debemos tomar en cuenta cual es el proceso adecuado para obtener una buena calidad en la fundición.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Bairstow, L. (1910). *The Elastic Limits of Iron and Steel under Cyclic Variations of Stress*. London: Royal Society of London.
2. CALLISTER, W. (2002). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Technology Engineering.
3. Fuchs. (1980). *Introducción al Análisis de Fatiga o Durabilidad*. Nota Técnica N°FT01:Agosto 2006.
4. Haugen, E. y. (1975). *Probabilistic Design* (Vol. 12). Machine Design.
5. MARIN, J. (1962). *Mechanical Behavior of Engineering Materials*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
6. Miner, A. (1945). *Cumulative Damage in Fatigue* (Vol. 12).
7. MISHKE, C. (1 de enero 1987). *Prediction of Stochastic Endurance Strength*.
8. MOOT, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas* (Cuarta Edición ed.). México: Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana.
9. NOLL, C. y. (1953). *Allowable Working Stresses*. Nueva York: McGrawHill.
10. Palmgren, A. (1924). *Die Lebensdauer von Kugellagem* (Vol. 68).
10. 11. R.W. Landgraf. (1968). *Cyclic Deformation and Fatigue Behavior of Hardened Steels*. Universidad de Illinois : Urbana.
11. Shigley. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw- Hill Companies.

# **ANEXOS**

## **Anexo A**

### **NORMAS APLICABLES**

## PLASTICS PART DESIGN: LOW CYCLE FATIGUE STRENGTH OF GLASS-FIBER REINFORCED POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)

### Abstract

This paper summarizes our extensive investigation on the low cycle (up to  $N_f = 5 \times 10^6$ , where  $N_f$  is the number of cycles to failure) fatigue behavior of short glass-fiber reinforced poly(ethylene terephthalate), or PET, thermoplastic<sup>1</sup>. The modes of fatigue test include tension-tension, compression-compression, four-point bending (flexural) – all at frequency  $f = 1-3$  Hz, and flexural fatigue at  $f = 30$  Hz (ASTM D-671). All tests were stress-controlled with stress ratio  $R = S_{\min}/S_{\max} = 0.1$ , except for flexural fatigue at  $f = 30$  Hz where stress ratio  $R = -1$ . The fracture surfaces of tested specimens were analyzed using scanning electronic microscopy (SEM).

The results from this investigation provide comprehensive, up-to-date information and recommendations concerning methods for fatigue testing of injection molded specimens and models, prediction and optimization of low cycle fatigue properties that play a key role in determining a highly stressed plastic parts life and end-use performance, pre-selection of PET based plastic for various industrial applications.

### Introduction

Much of the recent growth in fiber-glass reinforced PET has been found in various industrial applications such as automotive, appliances, furniture and so on, where PET made parts and structures are gradually replacing steels, light alloys, and in some case expensive plastics thermoplastics and thermosets. One of the critical factors in structural design of highly loaded plastic parts is the aspect of the part's fatigue endurance (at various numbers  $N_f$  of cycles to failure from  $10^2$  to  $10^7$  and above). Very often the fatigue endurance of thermoplastics must be tested and analyzed under various design versions, stress-strain and loads modes, frequency  $f$ , time-temperature ( $t-T$ ), and moisture (Figure 1).

The various topics of fracture and fatigue of glass-fiber reinforced polyamide (PA) and PET based plastics have been discussed in [1-8]. Largest portion of these investigations was oriented on fatigue performance of various polyamides (PA 6, PA 66, PA 46, etc.) and significantly less study were oriented on fatigue of PET [2-3, 7-8]. The number of published article on low cycle fatigue of plastics is very limited. In our previous report to ANTEC we discussed the influence of time-temperature [4], and fiber loading [5] on fatigue performance of short glass-fiber reinforced polyamide 6.

Resistance to low cycle fatigue has some specific [1, 8] related to method of testing, test frequency, geometry of the specimens, loading methods (tensile, compression, flexural, torsion, etc.), influence of hysteretic heating, microstructure, etc. The purposes of this paper is to investigate low cycle fatigue characteristics of injection-molded PET with the influence of:

- Loading modes (types) such as four-point bending (flexural) and flexural (ASTM D 671-93), tension-tension and compression-compression.
- Geometry and sizes of used specimens and models.

Low cycle fatigue resistance of short glass-fiber reinforced PET plastic is analyzed and compared. Important comprehensive information was provided for plastic pre-selection, optimized design, product development, and technical support.

### Specific of test procedures and generated data

The typical flexural fatigue tests for plastics per ASTM D 671 are performed using well-known testers (SATEC SF-2U). The standard specimen is a cantilever beam with 3.2 mm in thickness and the width increasing linearly toward the beam root) is used for the test. The beam is subject to a symmetrical (stress ratio  $R = S_{\min}/S_{\max} = -1$ , where  $S_{\min}$  and  $S_{\max}$  are the minimum and maximum stress levels respectively) cyclic loading under controlled stress amplitude<sup>2</sup> and at frequency  $f = 30$  Hz. This test and used equipment are inexpensive and pro-

<sup>1</sup> PET – thermoplastic polyester for injection molding.

<sup>2</sup> Author to whom correspondence should be addressed.

vides a basic data for comparison of different plastic materials. With some assumptions, developed fatigue data ( $S-N_f$  curves) is used for design of various plastic parts.

There are obvious limitations in the flexural fatigue data obtained using the ASTM D-671 procedure above, among them are:

- The data is obtained in a single flexural mode with stress ratio  $R = -1$ , whereas the real applications often encounter fatigue in tension-tension or compression-compression mode, or flexural mode with stress ratio  $R$  other than  $-1$ ;
- The dimensions of thickness of actual plastic components, and thickness in particular, are often different from those of test specimens. As a result the different molding conditions experienced by the plastic parts and specimens may invoke different resistance to cyclic loading due to specifics in orientation and distribution of reinforcements, skin-core effects, etc.;
- The flexural loading mode in applications, as characterized by stress ratio  $R$ , and mean stress  $S_m = 0$ , is very different from the one in the laboratory flexural fatigue tests (ASTM D-671). The real stress ratio  $R$  is  $-0$  (or above) where in the flexural test  $R = -1$ . The mean stress  $S_m > 0$  for tensile-tensile mode and  $S_m < 0$  for compression-compression mode.
- The cyclic stress frequencies  $f$  in real applications are often substantially lower than the 30 Hz from the flexural ASTM tests;
- The shape of the cyclic loading function can also be very different from the sinusoidal used in the ASTM flexural fatigue test.
- The differences in fatigue cracks initiation and growth under variable loading modes (flexural, tension or compression, and multi-axial).

Although for some types of materials – metals in particular – the shape and frequency of the cyclic function may not have significant impact on the low cycle fatigue of the materials, this is not the case for thermoplastics. Due to the intrinsic viscoelastic behavior of thermoplastics, internal friction can easily cause heating in material samples at high frequency. This behavior results in lower fatigue resistance, especially when the often unmonitored and uncontrolled temperature goes above  $T_g$ , the glass transition temperature of the material [1, 4-5, 8].

## Experimental

### Material, Test Specimens and Models

45 wt.% short-glass-fiber reinforced PET thermoplastic colored in black (carbon black) was used for this study. This injection molding grade (Petra<sup>®</sup> 140 BK-

<sup>2</sup> Petra<sup>®</sup> is a registered trademark for BASF Corporation PET plastic products.

112) was developed for various applications where increased strength, stiffness, engineering property and dimensional stability performance is required. Typical mechanical properties are shown in Table 1. This data represent basic mechanical properties generated by ISO procedures for well-organized glass-fibers orientation in multi-purpose specimen only.

Test samples were molded into the following three types:

1. ISO multi-purpose tensile bars (ISO-3167) with 4 mm thickness that can be easily adapted for low cycle fatigue tests in three modes: tension, compression, and 4-point bending (flexural).
2. The “boss” (hollow cylinder, Figure 2).
3. Bars with cross-section 6.25 mm x 6.25 mm (Figure 3).

### Mechanical Tests

The focus of our investigation was in the low-cycle fatigue  $N_f$  range from  $(2-3) \times 10^2$  to  $(2-5) \times 10^4$  cycles to failure. The low cycle fatigue tests were conducted using Instron-1361, a servo-hydraulic system. All tests were conducted in stress-controlled mode with a constant  $S_{max}$ ,  $S_{min}$  and stress ratio  $R$ . A frequency  $f$  of 3 Hz was selected for most of the low cycle fatigue tests except for four-point bending where  $f = 1$  Hz was used. The stress ratio  $R = 0.1$  was used for all low cycle fatigue tests, except the classical flexural fatigue (ASTM D671), where  $R = -1$  at a frequency  $f = 30$  Hz, as discussed before. Additionally we conducted short-term tensile (compressive) and flexural tests for strength data for every type of used specimens. Fatigue data (Figures 4-5) and short-term properties (Table 1, Figure 6) were developed at controlled laboratory conditions at 23 °C, air and 50% RH).

#### Specific of Loading Modes, Specimens and Models

The following four cyclic loading modes were used:

1. Tension-tension fatigue, conducted on injection molded ISO-3167 multi-purpose specimens with a thickness of 4 mm.
2. Compression-compression fatigue, conducted on three types of injection-molded specimens
  - Rectangular specimens modified from the ISO-3167 used for tension-tension fatigue. A 20-mm long prism was obtained from the center section where the two ends were carefully machined to make sure that they are even and parallel to each other.
  - The “boss” (hollow cylinder) models were used as in applications (Figure 2 a, b).
  - The same boss specimen with the 3-mm removed from the top. The top layer was suspected to have a molding imperfection (kmit line) and fibers re-orientation that could be responsible for the reduced fatigue strength in many cases (Figures 2 and 7).

3. Four-point bend (flexural) fatigue test at a frequency  $f = 1$  Hz, performed on 50 mm long specimens cut from the center section of ISO-3167. The bottom span was 38 mm, and the top span was 12.7 mm.

## Results and Discussion

Figure 4 shows developed comprehensive data ( $S_a - N_f$ -curves) for the stress amplitude  $S_a$  vs. cycles to failure  $N_f$  for the fatigue tests under various stress modes. In Figure 5, stress amplitude  $S_a$  under each loading condition is normalized with the corresponding static strength  $S_u$  (for used specimen, Figure 6). On the most basic level, all these diagrams may be anticipated to be the same. Some static strength of material theories, such as the Tresca-Guest (maximum shear stress) criterion or the specific energy of volume distortion are not sensitive to the sign (tension or compression) of the main (normal) stresses. Therefore, the tension and the compression could represent the same level of fatigue tolerance as soon as the maximum shear stress is the same. The same can be applied to flexural where the volumes subjected to the same absolute level of maximum tension and compression are present.

On a somewhat higher level and considering experience of measuring static strength of materials and comparing for tension and flexural one can anticipate a higher fatigue strength obtained in flexural test. Indeed, the following probability considerations are usually used to explain the phenomenon:

- The failure is correlated with the largest defect, and one can assume that the defects are uniformly distributed in the tested volume (the specimen). In flexural test, only the outer surface adjacent layers (volumes) of material are exposed to the maximum stress. The probability to find the largest defect in these areas is therefore lower than in tension where the whole volume is under maximum stress. The experience of observing higher static flexural strength than tensile one is rather consistent on different materials, and this theory seems reasonable.
- The same probability considerations can be used in explaining differences observed between larger and smaller samples (Figures 4-6). Indeed for the same reason the strength, especially, fatigue strength of a smaller specimen should be higher.

Figures 4-5 show also the classical flexural fatigue data (ASTM D-671). The difference between the conditions of the two flexural tests is:

- The specimen configuration, sizes (thickness);
- The loading frequency  $f$ ;
- The loading method.

We already discussed the anticipated reduction of flexural fatigue strength on a larger specimen. The frequency  $f$  effect, if any, should lead to the opposite direction. The loading method should not lead to some substantial differences, because in both cases (the central section of the four-point flexural and ASTM test) the max stresses are constant through comparable areas of the surface. So what we can see from Figure 4 is that compressive fatigue strength is higher than both flexural and tensile fatigue strength. The  $S_a - N_f$ -curves are parallel within the same loading mode, but the slopes of the curves are steeper in the flexural and the tension modes, where they are parallel again within each mode. At the same time, Figure 5 shows that the differences within the compression mode become statistically negligible when the relative (with respect to the compressive static strength) values are considered (Table 1 and Figure 6). The differences between the tensile and the four-point flexural modes also disappear when looked at in the relative terms. These observations confirm the hypothesis that the major factor for the differences between the modes is the sign of the normal stress component in the max shear stress plane.

What is important is the observed substantial difference between the flexural modes of our four-point, where  $R = 0.1$ , and the flexural per ASTM D-671, where  $R = -1$ . If only the value of stress ratio  $R$  is considered, one would have expected a quite opposite picture to the one in Figures 4-5, namely, the stress amplitudes for  $R = 0.1$  should have been higher than the ones for  $R = -1$ . Indeed, the maximum stress achieved during the cycle is higher for  $R = 0.1$ . This controversy can be explained by examining the effect of loading frequency  $f$ . Apparently, as mentioned before, the relatively high frequency  $f = 30$ Hz used in ASTM D-671 (as opposite to the  $f = 1 - 3$  Hz used in other tests), can easily cause internal heating in the PET due to the viscoelastic nature of the material. The heat generated in the cyclic loading process cannot be dissipated quickly enough, causing rising temperature and softening of the material. The specimen, therefore, has been effectively tested at higher temperature when high frequency is applied. The reduced fatigue strength, as can be seen in the analysis, is caused more by the induced heat than the frequency itself. The flexural fatigue by ASTM D-671, therefore, will produce a  $S_a - N_f$  curve lower than other types of curves generated at lower frequencies  $f$  when internal heating is not a problem.

## Summary and Conclusions

The results from this investigation will provide comprehensive, uniform, and up-to-date information and recommendations for design against fatigue in various molded parts, pre-selection of short glass-fiber reinforced PET thermoplastic for design, mechanical performance prediction and optimization.

## Acknowledgment

The authors wish to express their appreciation to John Maczaj, Roberto Sanchez, for help in preparing this paper for publishing. A special thanks is going to Catherine Ruiz for constant support of this investigation and helpful discussions.

## References

1. Hertzberg, R. W., Manson, J. A., "Fatigue of Engineering Plastics", 295 pages, Academic Press, (1980).
2. Karger-Kocsis, J. and Friedrich, K., "Fracture and Fatigue of Unfilled and Reinforced Polyamides and Polyesters", Chapter 5, in Solid State Behavior of Linear Polyesters and Polyamides (editors J. Schultz and S. Fakirov), pp. 249-322, Prentice Hall, (1990).
3. Mulzahn, J. C. and Schultz, J. M., "Tension-Tension and Compression-Compression Fatigue Behavior of Injection-molded Short-glass-fiber/Poly(ethylene terephthalate) Composite", Composite Science and Technology, Vol. 27, pp. 253-289, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England (1986).
4. Jia, N. and Kagan, V., "Effects of Time and Temperature on Tension-Tension Fatigue Behavior of Short Fiber Reinforced Polyamides", ANTEC Proceedings (1997).
5. V., Kagan, R., McPherson, and J., Chang, "An Advanced High Modulus (HMG) Short Glass-Fiber Reinforced Nylon6: Part II - Mechanical Performance", ANTEC Proceedings (2001).
6. Srivastava, V., K. and Kawada, H., "Fatigue Behavior of Alumina-Fiber-Reinforced Epoxy Resin Composite Pipes Under Tensile and Compressive Loading Conditions", Composites Science and Technology, Vol. 61, pp. 2393-2403, Elsevier Science Ltd., (2001).
7. Chen, W., Cheng, F., Lu, "Tension and Compression Test of Two Polymers Under Quasi-Static and Dynamic Loading", Polymer Testing, Vol. 21, pp. 113-121, Elsevier Science Publishers Ltd., (2002).
8. Krohn, J., A., Novak, G., E., and Wyzgowski, M., G., "Reinforced Plastics Design: Tensile Versus Flexural Fatigue", ANTEC Proceedings (2001).

Property (in MPa)	Strength	Modulus
Tensile	190	12,700
Flexural	278	17,100
Compressive	191	8,087

Table 1. Typical mechanical properties of 45 wt.% GF PET colored in black at 23°C (multi-purpose test specimen ISO-3167).



Figure 1. An example of injection molded load bearing thermoplastic part with various modes of local cyclic loading (boss - compressive, ribs - flexural).



Figure 2. Fatigue failure mode for the boss at compression-compression loading. Agenda: a - shear cleavage along max shear stress plane; b - advanced stage of failure with the break along the knit line.



Figure 3. Fatigue failure mode for rectangular specimen at compression-compression loading (shear cleavage along max shear stress plane).

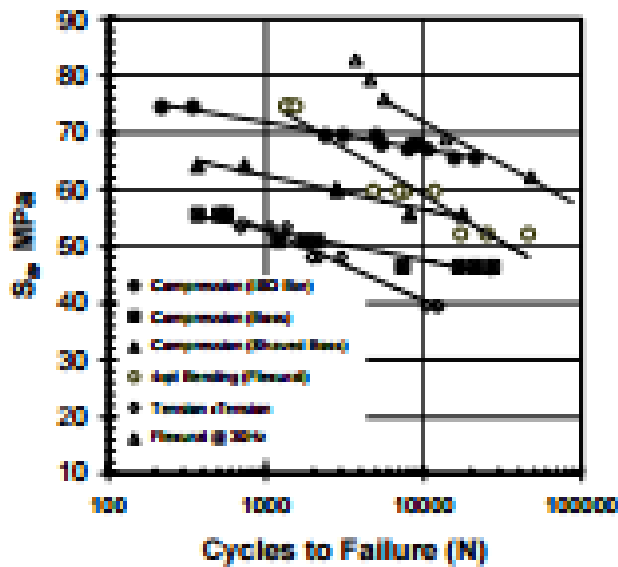


Figure 4. Comparison of Fatigue Properties of 45 wt.% short-glass-fiber reinforced PET. Agenda:  $S_a$  – is stress amplitude and  $N_f$  – number of cycles to failure.

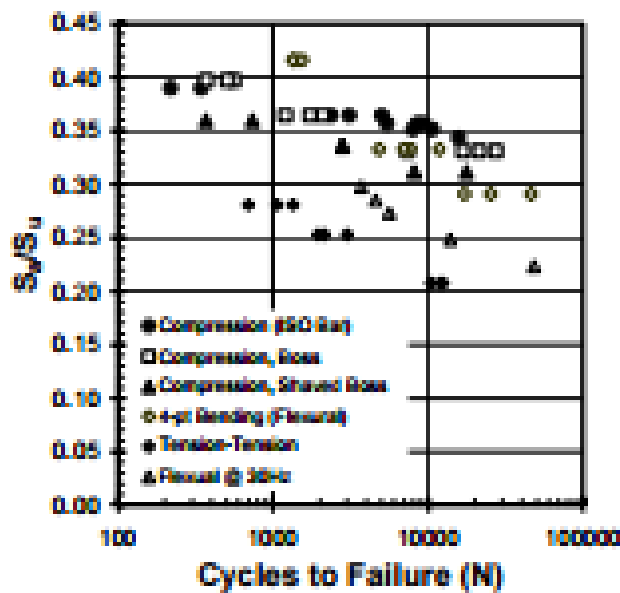


Figure 5. Master  $S_a/S_u - N_f$  Curve for All Fatigue Tests. Agenda: where  $S_a$  is stress amplitude;  $S_u$  is static strength of plasticized specimen, and  $N_f$  is number of cycles to failure.

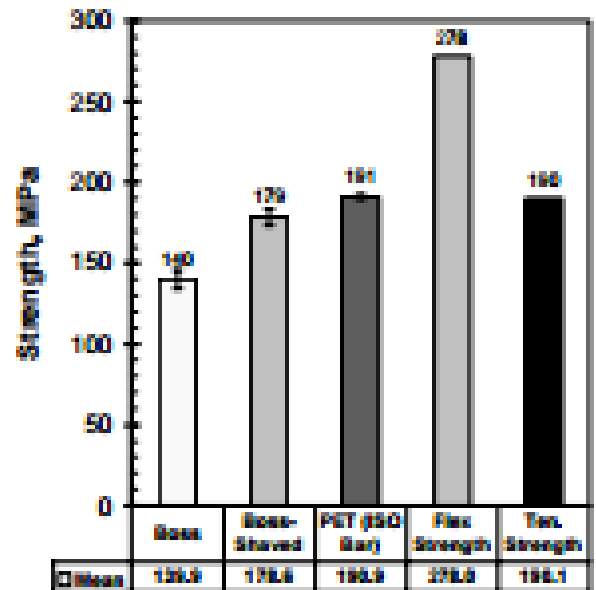


Figure 6. Mechanical Properties of 45 wt.% short-glass-fiber reinforced PET plastic.

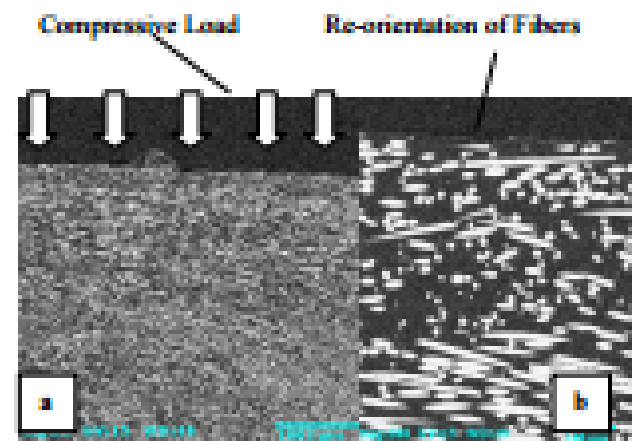


Figure 7. Specific of glass-fiber orientation for hollow boss (top layer content fibers oriented perpendicular to stress direction). Agenda: a – morphology of hollow boss; b – glass-fiber orientation and distribution at top layer, which was removed).


### Keywords

Poly(ethylene terephthalate), PET, fiberglass, reinforced, orientation, low cycle, fatigue, strength, mechanical performance, tensile, flexural, compressive.





## ANEXO B1

### TOMA DE DATOS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
		
<b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO MAESTRÍA EN DISEÑO MECÁNICO</b>		
<b>Tema:</b> “ESTUDIO A FATIGA MECÁNICA DE FUNDICIONES DE ALUMINIO OBTENIDA DE CAHATARRA DE PISTONES DE BUSES HINO FG PARA DETERMINAR EL DIAGRAMA ESFUERZO-NÚMERO DE CICLOS”		
Norma	ASTM D790	
Material	ALUMINIO	
Dimensiones	Probeta tipo B	
Tipo de carga aplicada	Estática de flexión	
Deflexión generada		(mm)
Temperatura		° C
Número de ciclos		Ad
Fecha		
Responsable		

## ANEXO B2

### FORMATO RESULTADOS

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO						
		FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA						
		CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA						
<b>REGRESIÓN LINEAL</b>								
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ALUMINIO</b>								
<b>Tipo estudio:</b>	De laboratorio		<b>Nº de probetas</b>		19			
<b>Solicitado por:</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA		<b>Fecha de elaboración</b>		13/09/2015			
<b>Realizado por:</b>	León Tainy		<b>Supervisado</b>		Ing. Guamanquispe			
<b>Lugar:</b>	Universidad Técnica de Ambato							
<b>Material:</b>	Aluminio		<b>Frecuencia</b>		30 Hz			
<b>RESULTADOS</b>								
N	ciclos	xi=Log ciclos	Sobs	yi =Log S	Sesp	XY	Xi-Xmed	Xi
Σ								

## Anexo C

### PROBETAS

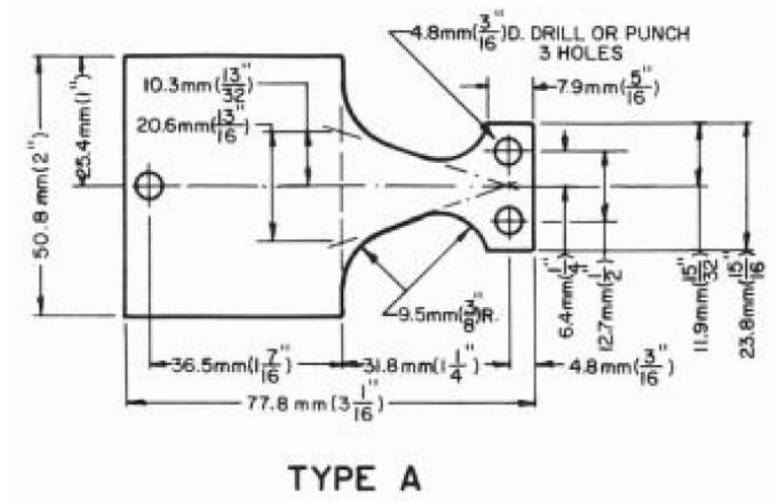


Figura 6. 1 Probeta tipo A para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Handbook of Plastics testings and Failure Analysis, Jhon Wiley y Sons (2007)

NORMA ASTM D790

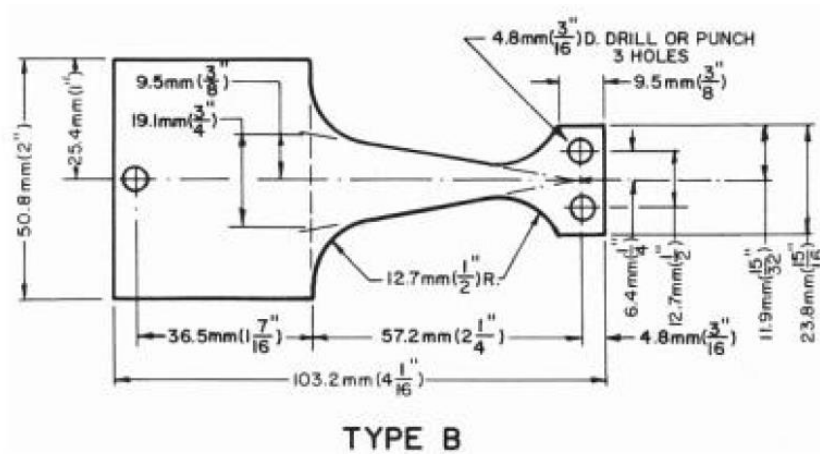


Figura 6. 2 Probeta tipo A para ensayo a fatiga de polímeros

Fuente: Handbook of Plastics testings and Failure Analysis, Jhon Wiley y Sons (2007)

NORMA ASTM D790

## Anexo D

### SELECCIÓN DEL ALUMINIO

*Tabla 6-2 Selección del aluminio*

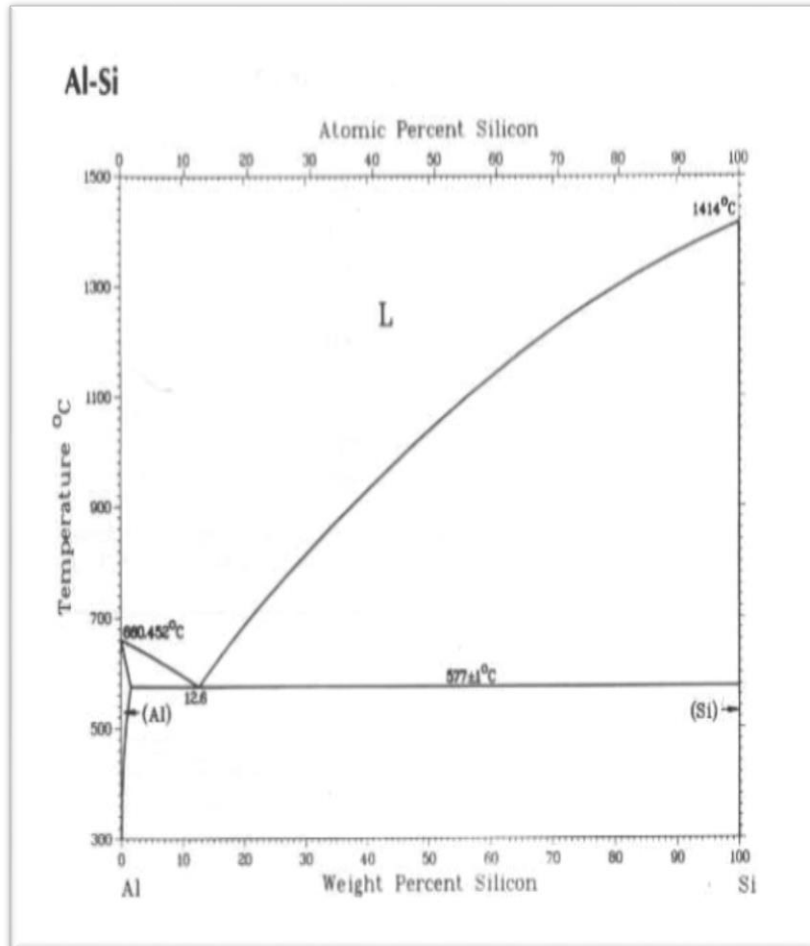
3005	ALMN1MG0.5
3103	ALMN1
3105	ALMN0.5MG0.5
4043	ALSI5
4043A	ALSI5(A)
4047	ALSI12
4047A	ALSI12(A)
5005	ALMG1(B)
5050	ALMG1.5(C)
5052	ALMG2.5
5056	ALMG5CR
5056A	ALMG5
5083	ALMG4.5MN0.7
5086	ALMG4
5154	ALMG3.5
5154A	ALMG3.5(A)
5183	ALMG4.5MN0.7(A)
5251	ALMG2
5356	ALMG5CR(A)
5454	ALMG3MN
5456	ALMG5MN
5554	ALMG3MN(A)

*Fuente: Metal Handbook Volumen 19 Página 1976*

Por lo tanto tomamos como muestra la aleación de aluminio 4047 que es el que mas se aproxima a nuestras características del aluminio de pistones.

## Anexo E

### DIAGRAMA ALUMINIO-SILICIO



J.L. Murray and A.J. McAlister, 1984

Phase	Composition, wt% Si	Pearson symbol	Space group
(Al)	0 to 1.6	<i>cF4</i>	<i>Fm<math>\bar{3}m</math></i>
(Si)	99.985 to 100	<i>cF8</i>	<i>Fd<math>\bar{3}m</math></i>

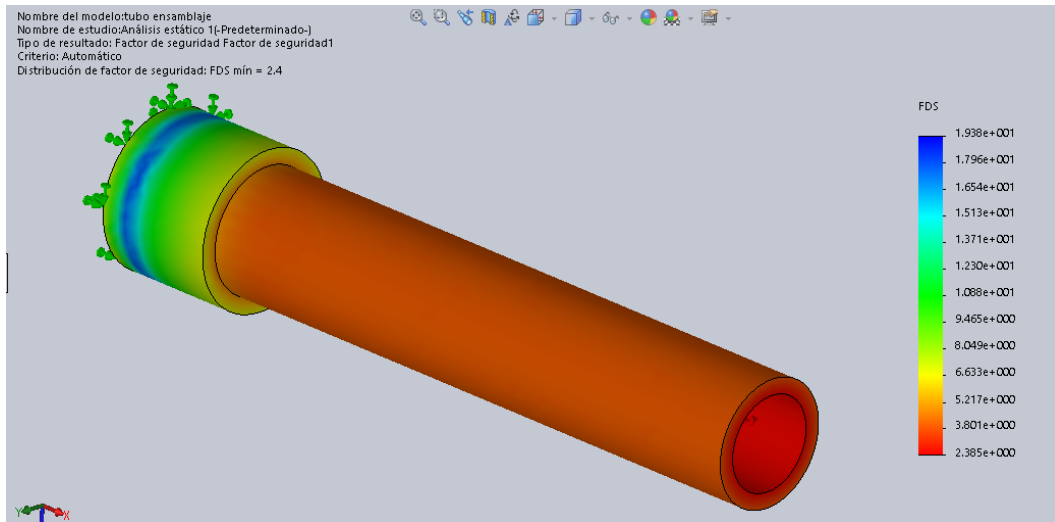
Figura 6-17 Diagrama de fase Aluminio - Silicio

Fuente: Metal Handbook Volumen 03

## Anexo F

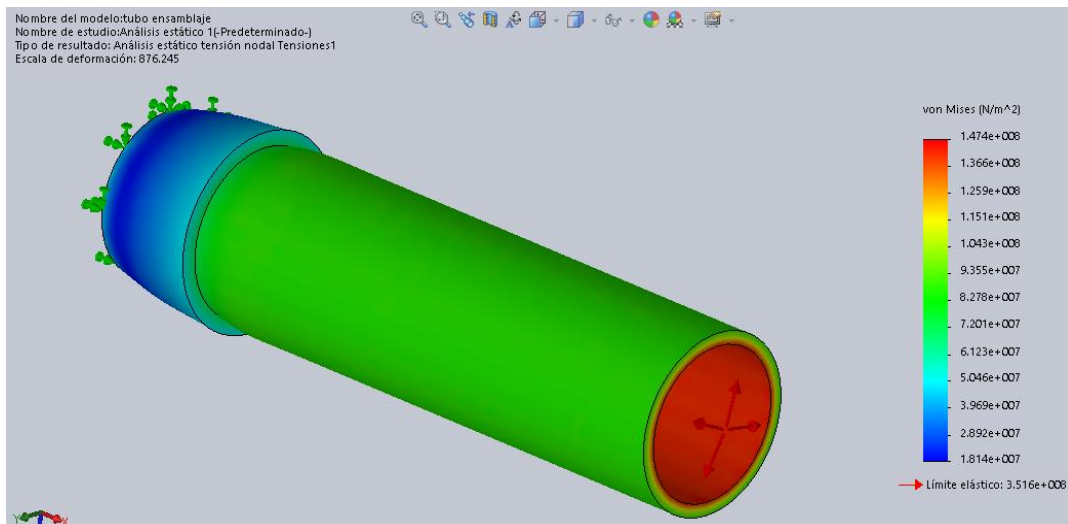
### ANALISIS DE ESFUERZOS DEL MOLDE CON CARGA DE 35 MPa

**Fig F1.** Factor de seguridad del molde



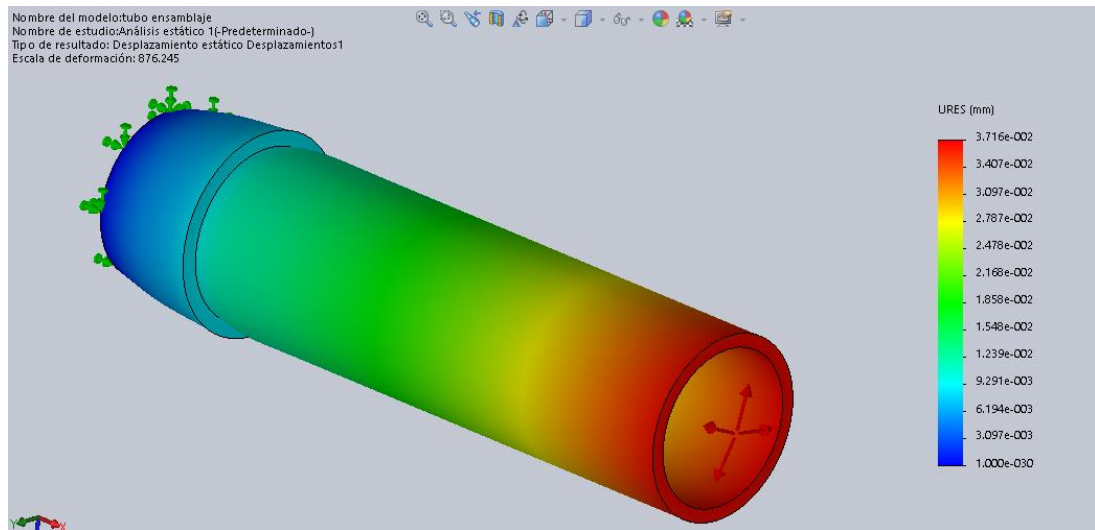
*Fuente: El Autor*

**Fig F2.** Análisis estático



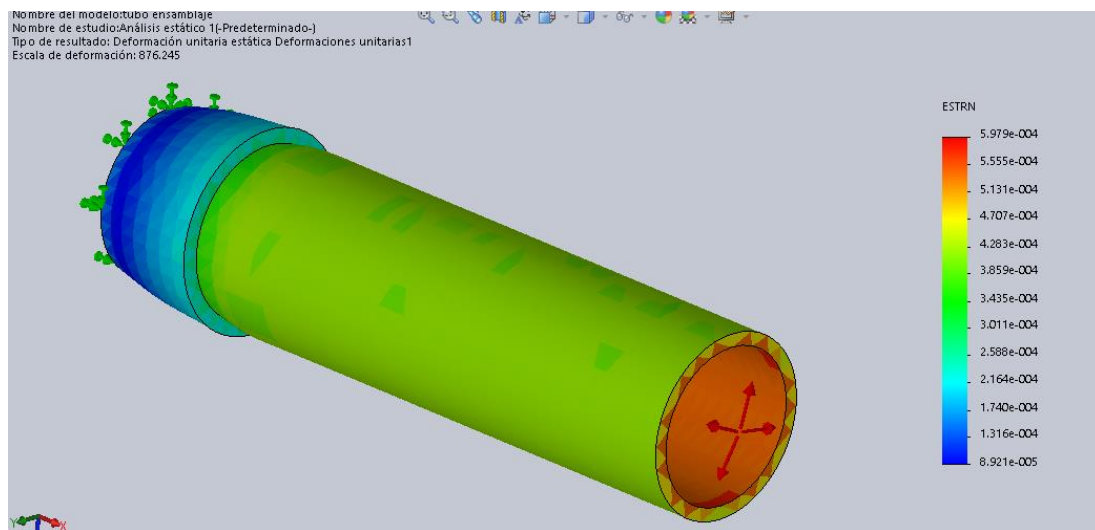
*Fuente: El Autor*

Fig F3. Desplazamiento estatico



*Fuente: El Autor*

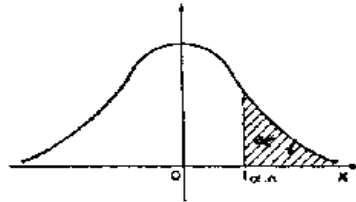
Fig F3. Deformaciones unitarias estática



*Fuente: El Autor*

## Anexo G

T- student



$\alpha/2$ gf	0,40	0,30	0,20	0,10	0,050	0,025	0,010	0,005	0,001	0,0005
1	0,325	0,727	1,376	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	318,3	636,6
2	0,289	0,617	1,061	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	22,33	31,60
3	0,277	0,584	0,978	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	10,22	12,94
4	0,271	0,569	0,941	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	7,173	8,610
5	0,267	0,559	0,920	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	5,893	6,859
6	0,265	0,553	0,906	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,208	5,959
7	0,263	0,549	0,896	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,785	5,405
8	0,262	0,546	0,889	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	4,501	5,041
9	0,261	0,543	0,883	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,297	4,781
10	0,260	0,542	0,879	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,144	4,587
11	0,260	0,540	0,876	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,025	4,437
12	0,259	0,539	0,873	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,930	4,318
13	0,259	0,538	0,870	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,852	4,221
14	0,258	0,537	0,868	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,787	4,140
15	0,258	0,536	0,866	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,733	4,073
16	0,258	0,535	0,865	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,686	4,015
17	0,257	0,534	0,863	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,646	3,965
18	0,257	0,534	0,862	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,611	3,922
19	0,257	0,533	0,861	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,579	3,883
20	0,257	0,533	0,860	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,552	3,850
21	0,257	0,532	0,859	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,527	3,819
22	0,256	0,532	0,858	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,505	3,792
23	0,256	0,532	0,858	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,485	3,767
24	0,256	0,531	0,857	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,467	3,745
25	0,256	0,531	0,856	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,450	3,725
26	0,256	0,531	0,856	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,435	3,707
27	0,256	0,531	0,855	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,421	3,690
28	0,256	0,530	0,855	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,408	3,674
29	0,256	0,530	0,854	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,396	3,659
30	0,256	0,530	0,854	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,385	3,646
40	0,255	0,529	0,851	1,303	1,648	2,021	2,423	2,704	3,307	3,551
50	0,255	0,528	0,849	1,298	1,676	2,009	2,403	2,678	3,262	3,495
60	0,254	0,527	0,848	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,232	3,460
80	0,254	0,527	0,846	1,292	1,664	1,990	2,374	2,639	3,195	3,415
100	0,254	0,526	0,845	1,290	1,660	1,984	2,365	2,626	3,174	3,389
200	0,254	0,525	0,843	1,286	1,653	1,972	2,345	2,601	3,131	3,339
500	0,253	0,525	0,842	1,283	1,648	1,965	2,334	2,586	3,106	3,310
$\infty$	0,253	0,524	0,842	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,090	3,291

Fuente: <http://www.matematicasvisuales.com/html/probabilidad/varaleat/tstudentprob.html>



## Anexo H

### MÁQUINA PARA ENSAYOS EN CANTIIVER DE PROBETAS PLANAS



# **Anexo I**

## **PLANOS**

1

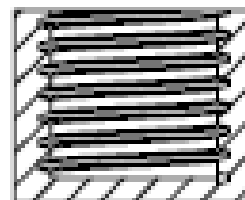
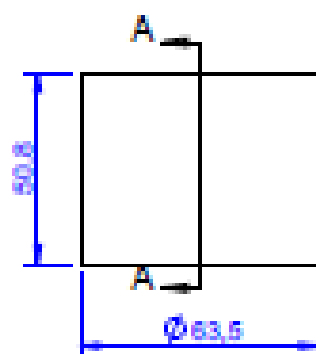
2

3

4

A

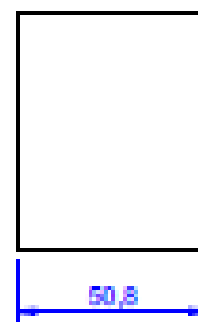
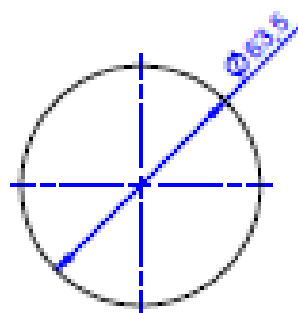
## SECCIÓN A-A



B

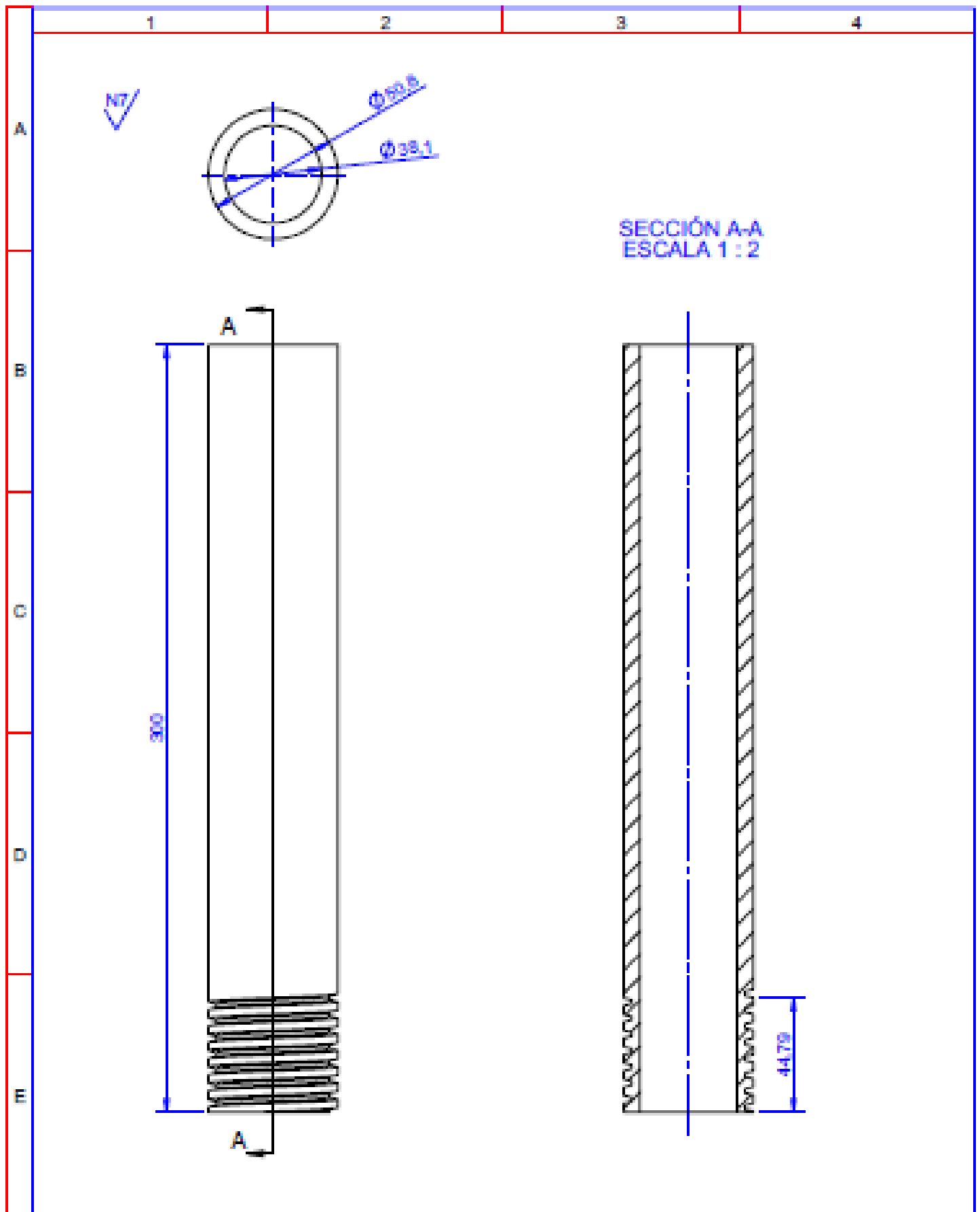
C

D

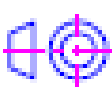


E

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	10 Kg	Acero AISI 1020	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 15/12/15	León Talny	<b>TAPA DEL MOLDE</b>	1:2
				Revisó: 15/12/15	Ing. Guzmanojaga		
				Aprobó: 15/12/15	Ing. Guzmanojaga		
				UTA		Número del dibujo: 01 de 03	
				Ing. Mecánica		(Sustitución)	
Fecha	Modificación	Fecha	Nombre				



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 2

				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	10 Kg	Acero	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujó: 15/12/15	León Talay	<b>Molde</b>	1:2
				Revisó: 15/12/15	Ing. Guzmanojaga		
				Aprobó: 15/12/15	Ing. Guzmanojaga		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 03 de 04	
Revisión	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

1

2

3

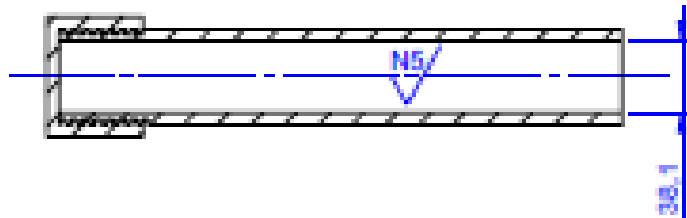
4

A



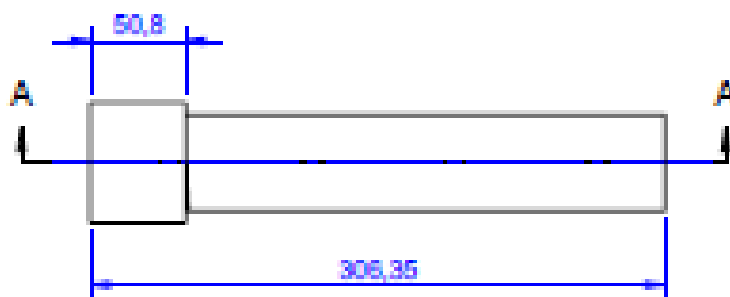
SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 4

B

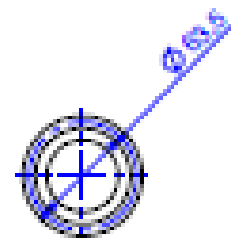


C

D



E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales:	
				±0,1	10 Kg	Acero AISI 1020	
				Fecha	Nombre	Denominación:	Escala:
				Dibujo: 12/01/18	León Talny	<b>CONJUNTO ARMADO</b>	1:2
				Revisó: 12/01/18	Ing. Guaranosque		
				Aprobó: 12/01/18	Ing. Guaranosque		
				UTA		Número del dibujo: 03 de 03	
				Ing. Mecánica		(Sustitución)	
Revisó	Modificación	Fecha	Nombre				