



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ

TEMA "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN PISTÓN
DISEÑADO Y MANUFACTURADO POR MEDIO DE CONTROL
NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA UN MOTOR MONO
CILÍNDRICO DE 4 TIEMPOS DE 150 CM^3 ."

AUTORES: JONATHAN PATRICIO, ROMERO PAILLACHO.

ANDRÉS SANTIAGO, VELÁSQUEZ GARCÍA.

DIRECTOR: ING. GUILLERMO MAURICIO, CRUZ ARCOS.

LATACUNGA

2019



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “*ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN PISTÓN DISEÑADO Y MANUFACTURADO POR MEDIO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA UN MOTOR MONO CILÍNDRICO DE 4 TIEMPOS DE 150 CM³*” fue realizado por los señores *Romero Paillacho, Jonathan Patricio y Velásquez García, Andrés Santiago* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 03 de junio de 2019

Firma:



Ing. Guillermo Mauricio Cruz Arcos.

C. C :0503010555



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, *Romero Paillacho, Jonathan Patricio* y *Velásquez García, Andrés Santiago*, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “*ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN PISTÓN DISEÑADO Y MANUFACTURADO POR MEDIO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA UN MOTOR MONO CILÍNDRICO DE 4 TIEMPOS DE 150 CM³.*”, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 03 de junio de 2019.



Romero Paillacho, Jonathan Patricio

C.C.: 1722456264



Velásquez García, Andrés Santiago

C.C.: 1804755989



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AUTORIZACIÓN

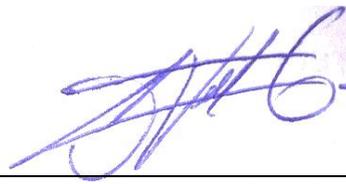
*Nosotros, **Romero Paillacho, Jonathan Patricio** y **Velásquez García, Andrés Santiago**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UN PISTÓN DISEÑADO Y MANUFACTURADO POR MEDIO DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA UN MOTOR MONO CILÍNDRICO DE 4 TIEMPOS DE 150 CM³.”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.*

Latacunga, 03 de junio de 2019



Romero Paillacho, Jonathan Patricio

C.C.: 1722456264



Velásquez García, Andrés Santiago

C.C.: 1804755989



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

AUTORIZACIÓN

*Nosotros, **Romero Paillacho, Jonathan Patricio y Velásquez García, Andrés Santiago** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el Repositorio Institucional: el registro bibliográfico, el resumen y la dirección web indexada a la revista del artículo académico:*

Latacunga, 03 de junio de 2019

Romero Paillacho, Jonathan Patricio

C.C.: 1722456264

Velásquez García, Andrés Santiago

C.C.: 1804755989

DEDICATORIA

A mis padres por haber sido pilares fundamentales en el proceso de mi formación profesional por motivarme día a día pese a las dificultades que se presentaban, a mis hermanos que siendo menores de edad en relación a mí me obligaron a ser un ejemplo seguir y dándome fuerzas para cumplir mi sueño.

A todas las docentes que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Jonathan P. Romero Paillacho.

DEDICATORIA

Este estudio que ha representado mucho esfuerzo y horas de trabajo, no hubiera visto la luz de no ser por el apoyo y la paciencia de mis padres, Paco y Jessy, y mis hermanas, Estefy y Gaby, por lo que este trabajo se lo dedico a ellos, también quiero agradecer por la ayuda de todas y cada una de las personas que aportaron con sus conocimientos durante todo el transcurso de este trabajo.

A la gran familia Automotriz, docentes y amigos, por llenarme de buenas vivencias y entrañables anécdotas durante toda mi vida universitaria, haciéndola más llevadera.

Por todo esto y más, gracias totales.

Andrés S. Velásquez García.

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud con Dios, quien con su bendición nos dio la vida guiándonos por el camino del bien y bendecirnos con buenos valores que poco a poco fuimos desarrollando al paso de los años.

Gracias a nuestros padres: Patricio y Carmen; y, Paco y Jessy por ser los primordiales promotores de nuestros sueños y brindarnos la oportunidad de demostrar que podemos ser unos excelentes profesionales de la República del Ecuador.

De igual manera agradecer a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a la gran familia que forma la carrera de Ingeniería Automotriz por conquistar nuestros corazones y portar los más gratos y agraciados recuerdos de nuestra preparación profesional.

Finalmente queremos expresar nuestro extraordinario agradecimiento al Ingeniero Mauricio Cruz principal colaborador en el desarrollo de este trabajo quien con su dirección, conocimiento, serenidad, experiencia y colaboración permitió alcanzar este objetivo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
AUTORIZACIÓN	v
DEDICATORIA	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xxii
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación e importancia.....	3
1.3. Objetivo.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.	4
1.4. Descripción general del proyecto.....	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Torque	7
2.2. Potencia.....	8
2.3. Consumo másico de combustible.....	10
2.4. Características de un pistón automotriz.	11

2.4.1.	Dimensiones de los pistones.	13
2.4.2.	Formas de pistones.	15
2.4.3.	Dilatación del pistón.	16
2.4.4.	Tolerancias de los pistones.....	19
2.4.5.	Temperaturas de funcionamiento en émbolos de motores de automóviles a plena carga.....	20
2.5.	Trabajos y características en los ejes de pistón o bulones.	21
2.5.1.	Descentrado del bulón.....	21
2.6.	Segmentos del pistón.....	24
2.6.1.	Tipos de segmentos según su función.....	24
2.6.2.	Tipos de segmentos según su forma y características.....	26
2.6.3.	Especificaciones de trabajo de segmentos del pistón.....	29
2.6.4	Reemplazo y montaje de segmentos del pistón.....	31
2.7.	Fuerzas que actúan sobre el mecanismo biela – manivela.....	34
2.8.	Trabajos prácticos de reducción de peso de los pistones.	34
2.8.1.	Recortes de la falda del pistón.	35
2.8.2.	Recortes internos de la cabeza del pistón.....	36
2.9.	Fallas en la cabeza del pistón.....	38
2.9.1.	Gripado por recalentamiento:.....	38
2.9.2.	Fundiciones.	39
2.9.3	Huellas de golpes.	40
2.9.4	Grietas en la cabeza y la cavidad de fondo.	41
2.9.5.	Daños en segmentos de pistón.	42
2.9.6.	Desgaste debido a derrame de combustible.	42
2.9.7.	Desgaste axial debido a la suciedad.....	43
2.10.	Características de la motocicleta ICS 150s.....	44
2.11.	Características del aluminio 7021.....	45
2.11.1.	Mecanizado del aluminio 7021.....	46
2.11.2.	Composición química del aluminio 7021.....	46
2.11.3.	Propiedades mecánicas y físicas del aluminio 7021.....	46
2.12.	Programas computacionales aplicados en la ingeniería.....	47
2.12.1.	Software CAD.....	47

2.12.2. Software CAE.	49
2.12.3. Software CAM.	50

CAPÍTULO III

3. CÁLCULOS DE ESFUERZOS SOMETIDOS AL PISTÓN

3.1. Datos obtenidos de la motocicleta.....	54
3.1.1. Medición de la cámara de combustión.....	55
3.1.2. Medición del diámetro del pistón.....	55
3.1.3. Medición de la carrera del pistón.....	56
3.2. Cilindrada unitaria.....	57
3.3. Cilindrada total.....	58
3.4. Relación de compresión.....	58
3.5. Volumen total del cilindro.	59
3.6. Área del pistón.	60
3.7. Presión de admisión.	60
3.8. Temperatura de admisión.....	66
3.9. Presión de compresión.	70
3.10. Temperatura en compresión.....	72
3.11. Temperatura de explosión.....	73
3.12. Presión en la explosión.....	75
3.13. Fuerza aplicada en la cabeza del pistón (F_e).	76
3.14. Presión de salida de gases de escape.....	77
3.15. Temperatura de escape.....	78
3.16. Radio del cigüeñal.....	79
3.17. Lambda (λ).....	79
3.18. Ángulo de biela.	80
3.19. Fuerza lateral del pistón.	81
3.20. Eficiencia del ciclo termodinámico.....	82

CAPÍTULO IV

4. ENSAYOS Y PRUEBAS

4.1. Ensayo metalográfico del pistón de fábrica.	83
4.1.1. Corte del material.....	84

4.1.2.	Composición de la probeta.....	84
4.1.3.	Compactado de la probeta.....	85
4.1.4.	Lijado de la probeta.....	86
4.1.5.	Pulido de la probeta.....	86
4.1.6.	Revelado químico.....	87
4.1.7.	Fotografiado micrográfico.	88
4.1.8.	Resultados obtenidos.....	89
4.2.	Ensayo a la compresión.....	92
4.2.1.	Razón de esbeltez.....	92
4.2.2.	Procedimiento del ensayo de compresión.	95
4.2.3.	Resultados de ensayo.	97
4.3.	Proceso de tratamiento térmico del aluminio 7021.....	98
4.3.1.	Templado.....	99
4.3.2.	Envejecido.....	101
4.4.	Ensayo de dureza del aluminio 7021.	102
4.5.	Pruebas dinamométricas de la motocicleta.	104

CAPÍTULO V

5. CONSTRUCCIÓN DEL PISTÓN EN ALUMINIO 7021

5.1.	Modelado en el software CAD.....	106
5.1.1.	Modelado del pistón.....	106
5.1.2.	Modificaciones a considerar en el modelado del pistón.	110
5.2.	Análisis en el software CAE.	111
5.2.1.	Análisis del pistón de aluminio 7021.	112
5.2.2.	Análisis del pistón de aluminio A390.	131
5.3.	Mecanizado con software CAM.....	144
5.3.1.	Código GUI.....	145
5.3.2.	Características de las líneas de código.	150
5.4.	Proceso de mecanizado del pistón con la máquina CNC.....	151
5.5.	Tratamiento térmico.....	153
5.5.1.	Templado.....	154
5.5.2.	Envejecido.....	155

CAPÍTULO VI**6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

6.1.	Análisis de los datos generados por la simulación CAE.....	156
6.1.1.	Deformaciones direccionales.	157
6.1.2.	Esfuerzo equivalente.	158
6.1.3.	Esfuerzo máximo.	159
6.1.4.	Factor de seguridad.	160
6.1.5.	Desgaste entre pistón y bulón.	161
6.2.	Análisis de los datos de los ensayos de dureza posterior a los tratamientos térmicos.	161
6.3.	Análisis de curvas de potencia y torque.....	163
6.4.	Viabilidad del pistón de aluminio 7021.	166

CAPÍTULO VII**7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

7.1.	Conclusiones.	171
7.2.	Recomendaciones.....	173

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175
---	-----

ANEXOS	181
---------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1.	<i>Relación con respecto al diámetro.</i>	15
Tabla No. 2.	<i>Ficha técnica de la motocicleta ICS 150C.</i>	45
Tabla No. 3.	<i>Composición química del aluminio 7021</i>	46
Tabla No. 4.	<i>Propiedades mecánicas del aluminio 7021.</i>	47
Tabla No. 5.	<i>Propiedades físicas del aluminio 7021</i>	47
Tabla No. 6.	<i>Datos recolectados del listado de funciones "M":</i>	52
Tabla No. 7.	<i>Grados y porcentajes de la fase alfa y beta en las probetas.</i>	90
Tabla No. 8.	<i>Designación de las familias de aluminio.</i>	91
Tabla No. 9.	<i>Propiedades mecánicas del aluminio A390.</i>	133
Tabla No. 10.	<i>Propiedades térmicas del aluminio A390.</i>	134
Tabla No. 11.	<i>Hoja de trabajo de los procesos de mecanizado del pistón.</i>	152
Tabla No. 12.	<i>Datos recolectados del ensayo de dureza posterior a los tratamientos térmicos.</i>	162

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura No. 1.</i>	Gráfica de potencia y par motor.	8
<i>Figura No. 2.</i>	Gráfica de potencia.	9
<i>Figura No. 3.</i>	Gráfica de consumo de combustible.	11
<i>Figura No. 4.</i>	Partes del pistón.	12
<i>Figura No. 5.</i>	Cotas a considerar en un pistón.	14
<i>Figura No. 6.</i>	Formas de émbolos.	16
<i>Figura No. 7.</i>	Sección de un pistón forjado y fundido.	16
<i>Figura No. 8.</i>	Temperaturas de un pistón en sus principales zonas de trabajo.	17
<i>Figura No. 9.</i>	Pistón ovalado visto por su parte inferior.	18
<i>Figura No. 10.</i>	Dilatación de la falda del pistón	19
<i>Figura No. 11.</i>	Pistón con ruptura en la falda.	20
<i>Figura No. 12.</i>	Temperatura de funcionamiento en émbolos.	21
<i>Figura No. 13.</i>	Bulón descentrado	23
<i>Figura No. 14.</i>	Diferentes fases angulares del procedo final del tiempo de compresión y principio del tiempo de explosión.	23
<i>Figura No. 15.</i>	Segmentos de pistón.	24
<i>Figura No. 16.</i>	Segmentos de sección rectangular.	26
<i>Figura No. 17.</i>	Segmentos de sección cónica.	27
<i>Figura No. 18.</i>	Segmentos de torsión.	27
<i>Figura No. 19.</i>	Segmentos de sección trapecial.	28
<i>Figura No. 20.</i>	Segmentos con expansor.	28
<i>Figura No. 21.</i>	Segmentos recogedores de aceite.	29
<i>Figura No. 22.</i>	Segmento compuesto.	29
<i>Figura No. 23.</i>	Segmento de compresión.	30
<i>Figura No. 24.</i>	Especificaciones de aros de pistón.	31
<i>Figura No. 25.</i>	Cortador de reborde.	32
<i>Figura No. 26.</i>	Acotación de la vista frontal del pistón.	33
<i>Figura No. 27.</i>	Rango de variación de luz.	33
<i>Figura No. 28.</i>	Fuerzas en el mecanismo biela - manivela.	34

Figura No. 29.	A: pistón estándar; B: el mismo pistón estándar después de haber sido trabajado para alivianarlo.....	35
Figura No. 30.	Conjunto de pistones y bielas después de haber sido aligerado y preparado para un motor de competición.	36
Figura No. 31.	Las partes sombreadas son las partes de material que es posible rebajar.	37
Figura No. 32.	Forma de trabajar el aligeramiento de un pistón eliminando material interior con la ayuda de una fresa.	37
Figura No. 33.	El rebaje interno también debe efectuarse con la ayuda de una broca.....	38
Figura No. 34.	Daños de gripado por calentamiento.	39
Figura No. 35.	Fundición de la cabeza del pistón.....	40
Figura No. 36.	Huellas por golpes.	41
Figura No. 37.	Grietas en la cabeza y cavidad el fondo.	41
Figura No. 38.	Daños en el segmento del pistón.	42
Figura No. 39.	Desgaste radial debido a derrame de combustible.....	43
Figura No. 40.	Desgaste axial debido a la suciedad.	44
Figura No. 41.	Motocicleta ICS 150s.	44
Figura No. 42.	Software CAD para el diseño mecánico.....	48
Figura No. 43.	Análisis asistido por computadora.....	49
Figura No. 44.	Fabricación asistida por computadora.	51
Figura No. 45.	Fuerzas que actúan en el pistón.	54
Figura No. 46.	Medición del volumen de la cámara.....	55
Figura No. 47.	Medición del diámetro de cabeza del pistón.	56
Figura No. 48.	Medición de la carrera del pistón.	56
Figura No. 49.	Datos de la temperatura y la presión atmosférica.....	61
Figura No. 50.	Velocidad del aire en la entrada de la admisión.	63
Figura No. 51.	Velocidad de apertura de la válvula de admisión.....	64
Figura No. 52.	Coefficiente de gases residuales Y_r	67
Figura No. 53.	Temperatura de gases residuales	69
Figura No. 54.	Exponente politrópico medio de compresión.	71
Figura No. 55.	Temperatura de combustión.	74

Figura No. 56.	Fuerzas que actúan en el tren alternativo.....	78
Figura No. 57.	Longitud de la biela.....	80
Figura No. 58.	Instalaciones del laboratorio de ingeniería civil y mecánica.....	83
Figura No. 59.	Probetas.....	84
Figura No. 60.	Corte del material del pistón original.....	84
Figura No. 61.	Polvo fenólico de baquelita negro.....	85
Figura No. 62.	Prensa hidráulica para probetas metalográficas.....	85
Figura No. 63.	Banco de lijas.....	86
Figura No. 64.	Abrasivo alúmina alfa.....	87
Figura No. 65.	Pulidora de paño.....	87
Figura No. 66.	Kellers ASTM E-407.....	88
Figura No. 67.	Microscopio metalográfico.....	88
Figura No. 68.	Fotografía estructural probeta 3; A: 40X, B: 100X, C: 200X, D: 400X.....	89
Figura No. 69.	Fotografía estructural aleación Al- Si- Cu.....	91
Figura No. 70.	A: aleación A390 tomada del Metal Handbook; B: imagen del ensayo metalográfico del pistón de fábrica.....	91
Figura No. 71.	Vista frontal pistón dibujado.....	93
Figura No. 72.	Vista superior del pistón dibujado.....	94
Figura No. 73.	Máquina de ensayo de compresión marca Controls.....	95
Figura No. 74.	Placa de identificación máquina ensayo de compresión.....	95
Figura No. 75.	Colocación del pistón en las planchas de la máquina.....	96
Figura No. 76.	Curva fuerza (MPa) vs. tiempo(s) módulo de la máquina.....	96
Figura No. 77.	Curva fuerza (MPa) vs. tiempo(s) programa Excel.....	97
Figura No. 78.	Resultado de la prueba de compresión.....	97
Figura No. 79.	Laboratorio de ensayos climáticos y tratamientos térmicos.....	98
Figura No. 80.	Probetas del aluminio 7021.....	99
Figura No. 81.	Horno de tratamientos térmicos.....	99
Figura No. 82.	Parámetros del proceso de templado en el programador.....	100
Figura No. 83.	A: templado con agua desmineralizada; B: templado con aceite SAE 40.....	101
Figura No. 84.	Parámetros del proceso de envejecido en el programador.....	101

Figura No. 85.	Durómetro digital ERNST.....	103
Figura No. 86.	Panel de visualización de datos durómetro digital.	103
Figura No. 87.	Anclaje de la motocicleta al dinamómetro	105
Figura No. 88.	Prueba dinamométrica en acción.....	105
Figura No. 89.	Herramientas de medición utilizadas.....	106
Figura No. 90.	Selección de plano para el croquis.	107
Figura No. 91.	Trazado del croquis.	107
Figura No. 92.	Figura base modelada del pistón.	108
Figura No. 93.	Modelado final terminado.	108
Figura No. 94.	Modelado de biela y cigüeñal.....	109
Figura No. 95.	Ensamble completo del tren alternativo.	109
Figura No. 96.	Imagen comparativa. A: pistón de fábrica; B: rediseño de pistón.	110
Figura No. 97.	Imagen comparativa vista lateral. A: pistón de fábrica; B: rediseño del pistón.....	111
Figura No. 98.	Ensamble tren alternativo.	112
Figura No. 99.	Restricción del movimiento del pistón.....	113
Figura No. 100.	Parámetros del movimiento del pistón.	113
Figura No. 101.	Área de contacto de la fuerza del pistón.....	114
Figura No. 102.	Parámetros de la fuerza del pistón.....	114
Figura No. 103.	Visualización de contactos predeterminados.....	115
Figura No. 104.	Eliminación de contactos predeterminados.	115
Figura No. 105.	Superficie de contacto del bulón.	116
Figura No. 106.	Superficie de contacto del pistón.....	116
Figura No. 107.	Contacto pistón - bulón.....	117
Figura No. 108.	Superficie de contacto del bulón.	117
Figura No. 109.	Superficie de contacto pie de biela	118
Figura No. 110.	Contacto bulón y pie de biela.	118
Figura No. 111.	Contacto muñón de bancada – muñón de biela.	119
Figura No. 112.	Características generales aleaciones de aluminio.....	119
Figura No. 113.	Especificaciones de propiedades mecánicas del aluminio 7021.	120
Fig.ura No. 114.	Guardado base de datos en el software CAE.....	120

Figura No. 115.	Análisis de deformación direccional en el eje X pistón de aluminio 7021.....	121
Figura No. 116.	Análisis de deformación direccional en el eje Y pistón de aluminio 7021.....	122
Figura No. 117.	Análisis de deformaciones direccional en el eje Z pistón de aluminio 7021.....	123
Figura No. 118.	Pistón de aluminio 7021 esfuerzo equivalente Von Mises.....	124
Figura No. 119.	Pistón de aluminio 7021 esfuerzo máximo.....	125
Figura No. 120.	Pistón de aluminio 7021 esfuerzo máximo de corte.....	126
Figura No. 121.	Factor de seguridad pistón de aluminio 7021.....	127
Figura No. 122.	Análisis del esfuerzo friccionante entre bulón y pistón de aluminio 7021.....	128
Figura No. 123.	Análisis de la presión en el alojamiento del pistón de aluminio 7021.....	129
Figura No. 124.	Análisis desgaste del eje de bulón.....	130
Figura No. 125.	Restricción del movimiento del pistón de fábrica.....	131
Figura No. 126.	Área de contacto de la fuerza del pistón de fábrica.....	132
Figura No. 127.	Contactos entre los elementos.....	132
Figura No. 128.	Características generales aleaciones de aluminio A390.....	133
Figura No. 129.	Especificaciones de propiedades mecánicas del aluminio A390.....	134
Figura No. 130.	Static structural del pistón de fábrica.....	134
Figura No. 131.	Análisis de deformación direccional en el eje X pistón de fábrica.....	135
Figura No. 132.	Análisis de deformación direccional en el eje Y pistón de fábrica.....	136
Figura No. 133.	Análisis de deformaciones direccional en el eje Z pistón de fábrica.....	137
Figura No. 134.	Pistón de fábrica esfuerzo equivalente Von Mises.....	138
Figura No. 135.	Pistón de fábrica esfuerzo máximo.....	139
Figura No. 136.	Esfuerzo máximo de corte pistón de fábrica.....	140
Figura No. 137.	Factor de seguridad del pistón de aluminio A390.....	141

Figura No. 138.	Esfuerzo friccionante del pistón de fábrica.	142
Figura No. 139.	Análisis de la presión en el alojamiento del pistón de aluminio A390.	143
Figura No. 140.	Análisis desgaste del alojamiento del pistón de aluminio A390.	144
Figura No. 141.	Generación y verificación de código GUI en el software CAM y en la máquina CNC.	145
Figura No. 142.	Selección de proceso a mecanizar en el software CAM.	146
Figura No. 143.	Extracción líneas de código proceso de afinado del perfil de la falda.	147
Figura No. 144.	Selección del proceso de mecanizado a realizar.	147
Figura No. 145.	Bloque de aluminio 7021.	148
Figura No. 146.	Parámetro principal del proceso de mecanizado afinado de falda.	148
Figura No. 147.	Simulación del mecanizado afinado de la falda.	149
Figura No. 148.	Resultado final afinado de la falda.	150
Figura No. 149.	Teclado del controlador Anayak –Matic-7-CNC.	150
Figura No. 150.	Líneas de código proceso de mecanizado afinado del perfil de la falda.	151
Figura No. 151.	Pistón dentro del horno a temperatura ambiente.	154
Figura No. 152.	Templado del pistón en agua desmineralizada.	154
Figura No. 153.	Horno abierto para que se produzca el enfriamiento hasta temperatura ambiente.	155
Figura No. 154.	Ciclo de trabajo para un motor de 4 tiempos mono cilíndrico (lazo abierto).	156
Figura No. 155.	Deformaciones máximas direccionales en los ejes de coordenadas pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica A390.	158
Figura No. 156.	Valores de esfuerzo equivalente pistón de aluminio 7021.	159
Figura No. 157.	Valores críticos del esfuerzo máximo pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica A390.	160
Figura No. 158.	Gráfica de potencia y torque pistón de fábrica.	164
Figura No. 159.	Gráfica de potencia y torque pistón de aluminio 7021.	165

Figura No. 160.	Gráfica comparativa de curvas de torque entre el pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica A390	165
Figura No. 161.	Gráfica comparativa de curvas de potencia entre el pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica A390	166
Figura No. 162.	Pistón manufacturado montado en el motor de combustión interna de la motocicleta.....	167
Figura No. 163.	Pruebas de ruta realizadas con la motocicleta.	167
Figura No. 164.	Pistón después de haber funcionado 500km.....	168
Figura No. 165.	Reconocimiento de falla de gripado en la falda del pistón.....	168
Figura No. 166.	Reconocimiento de falla de gripado en los alrededores del eje del bulón.....	169
Figura No. 167.	A: estado de la falda de pistón de fábrica; B: estado de la falda de pistón de aluminio 7021.....	170
Figura No. 168.	A: interior del pistón de fábrica A390; B: interior del pistón de aluminio 7021.	170

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1.</i>	Fuerza en la parte superior del pistón.....	12
<i>Ecuación 2.</i>	Cilindrada unitaria.....	57
<i>Ecuación 3.</i>	Cilindrada total.....	58
<i>Ecuación 4.</i>	Volumen de la cámara.....	58
<i>Ecuación 5.</i>	Volumen total de los cilindros.	59
<i>Ecuación 6.</i>	Área del pistón.	60
<i>Ecuación 7.</i>	Presión de admisión.	60
<i>Ecuación 8.</i>	Densidad de la carga en la admisión.	62
<i>Ecuación 9.</i>	Pendiente de una recta.....	63
<i>Ecuación 10.</i>	Recta punto pendiente	63
<i>Ecuación 11.</i>	Velocidad del aire en la entrada del sistema de admisión.....	63
<i>Ecuación 12.</i>	Constante ($\beta_2 + \xi$)	65
<i>Ecuación 13.</i>	Presión de admisión	66
<i>Ecuación 14.</i>	Temperatura de admisión	66
<i>Ecuación 15.</i>	Coeficiente de gases residuales	68
<i>Ecuación 16.</i>	Presión de compresión.	70
<i>Ecuación 17.</i>	Exponente politrópico medido de compresión.....	72
<i>Ecuación 18.</i>	Temperatura en compresión.	72
<i>Ecuación 19.</i>	Temperatura en el ciclo de explosión.....	74
<i>Ecuación 20.</i>	Presión en la explosión.....	75
<i>Ecuación 21.</i>	Coeficiente real de variación molecular.....	75
<i>Ecuación 22.</i>	Fuerza en la parte superior del pistón.....	76
<i>Ecuación 23.</i>	Presión de escape.	77
<i>Ecuación 24.</i>	Temperatura de escape.....	78
<i>Ecuación 25.</i>	Radio del cigüeñal.....	79
<i>Ecuación 26.</i>	Lambda.....	80
<i>Ecuación 27.</i>	Angulo de biela.	81
<i>Ecuación 28.</i>	Fuerza lateral del pistón.	81
<i>Ecuación 29.</i>	Eficiencia del ciclo termodinámico.....	82

<i>Ecuación 30.</i>	Razón de esbeltez.	92
<i>Ecuación 31.</i>	Radio de giro.	93
<i>Ecuación 32.</i>	Momento de inercia de la probeta.	93
<i>Ecuación 33.</i>	Área del pistón.	93
<i>Ecuación 34.</i>	Esfuerzo de Von Mises.	124

RESUMEN

El sector autopartista automotriz se ha favorecido gracias a los adelantos tecnológicos en la manufacturación de autopartes con procesos que ya son posibles realizarlos en nuestro medio, pero este sector se ve afectado por la falta de autopartes en el mercado para ciertos vehículos. Por lo que este estudio práctico-teórico se enfoca en la viabilidad de la manufactura de un pistón o émbolo de motor de una motocicleta con materiales disponibles en el país, y así tener una visión de las falencias y aciertos que se presenten durante la manufactura y puesta a prueba de la autoparte, por lo que se mostrará el proceso de la manufactura del pistón desde el modelado CAD, su análisis CAE bajo condiciones de trabajo simuladas, su manufactura en aluminio 7021 con la ayuda de una CNC asistida por un software CAM y finalmente su acondicionamiento a los ciclos de trabajo del motor sometiéndolo a tratamientos térmicos. Para analizar los parámetros de rendimiento de la autoparte, la motocicleta se someterá a pruebas dinamométricas de torque - potencia y a 500 Km de trabajo, así observar su desempeño y compararlo con los de un pistón de refacción regular y dar factibilidad a esta investigación. Con esta investigación se da la iniciativa para generar nuevos métodos, temas de investigación y conocimiento en el campo del diseño y mejora de partes automotrices.

PALABRAS CLAVE:

- **PISTONES - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN**
- **MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA**
- **PISTONES - TRATAMIENTOS TÉRMICOS**
- **AUTOMÓVILES**

ABSTRACT

The automotive auto parts sector has been favored thanks to the technological advances in the manufacture of auto parts with processes that are already possible in our environment, but this sector is affected by the lack of auto parts in the market for certain vehicles. So this theoretical-practical study focuses on the feasibility of manufacturing a piston or motor piston of a motorcycle with materials available in the country, and thus have a vision of the shortcomings and successes that arise during the manufacture and testing of the auto part, so it will show the piston manufacturing process from CAD modeling, CAE analysis under simulated work conditions, its manufacture in aluminum 7021 with the help of a CNC machine assisted by CAM software and finally its conditioning to the working cycles of the engine subjecting it to thermal treatments. To analyze the performance parameters of the auto part, the motorcycle will undergo torque-power tests and 500 km of test, so observe its performance and compare it with those of a regular spare piston and give feasibility to this investigation. With this research the initiative is given to generate new methods, research topics and knowledge in the field of design and improvement of automotive parts.

KEYWORDS:

- **PISTONS - DESIGN AND CONSTRUCTION**
- **INTERNAL COMBUSTION ENGINES**
- **PISTONS - HEAT TREATMENTS**
- **AUTOMOBILES**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes.

(Oocities, 2009) menciona, a partir de 1920, gracias a las nuevas aleaciones ligeras y a las técnicas de fundición y de mecanización, el pistón de aluminio comenzó a substituir al de acero de función, aunque en los años treinta se produjo en Estados Unidos un retorno al segundo tipo, por razones económicas y en parte técnicas.

(Race Car Academy, 2016) menciona: todos los preparadores de motores de competición confían en marcas consolidadas del sector automotriz para la selección de los pistones a la hora de diseñar un nuevo prototipo de motor. Durante el proceso de selección de los pistones, hay numerosas variables a tener en cuenta: peso de los mismos, dimensiones, relaciones de compresión que deberán de soportar o cargas térmicas y mecánicas, entre otras. Cada decisión es muy importante, ya que determinará el comportamiento y la vida útil del motor. Una de las mayores decisiones, y quizás la más compleja, suele ser la elección del material adecuado de los pistones.

(Sánchez Camarco, 2010, pág. 6) en su investigación aclara que la industria de producción en pistones se encuentra en un largo proceso en el vaciado y maquinado de los pistones para motores a gasolina y diésel, así como otras aplicaciones náuticas y en motores pequeños; ya que éstos requieren tolerancias de milésimas de pulgada

para compensar la detonación del combustible y proporcionar un buen sellado y duración del motor.

(Víctor Hernández, Rodrigo Cruz ,Otero Tinajero, Ismael Harris, Osiel Morales, Carlos Aguilar, Vázquez N, Omar Aguilar , Alfaro Mario, Jorge Silva, Sinhué López, 2010) aseveran que el pistón trabaja a temperaturas y presiones muy elevadas, la temperatura de funcionamiento del pistón es diferente en todas sus partes ya que en la cabeza, así como en la zona de alojamiento del pistón, se alcanza una temperatura que oscila de los 250 a los 350°C mientras que en la falda del pistón se alcanza una temperatura de unos 150°C ,la temperatura es disipada de los anillos de compresión hacia las camisas del motor, realizando una función de puente térmico, mientras que otra parte del calor es evacuado por la falda del pistón ,los pistones que alcanzan una temperatura por encima de los 350°C tienen un sistema de refrigeración adicional al pistón, que consiste en bañar la parte inferior del mismo con un chorro de aceite constante.

(Race Car Academy, 2016) menciona que: la ventaja de utilizar silicio en este tipo de aleaciones es que permite reducir la expansión de la cabeza del pistón al alcanzar su temperatura de funcionamiento y aporta una alta resistencia al componente. La no expansión de la cabeza del pistón permite utilizar tolerancias más justas entre pistones y cilindros al mismo tiempo que reducimos los rozamientos de dichos componentes.

1.2. Justificación e importancia.

Los métodos de construcción de autopartes en la industria automotriz han ido evolucionando y mejorando cada vez más, gracias a los adelantos tecnológicos, en especial en el campo de la manufactura para dichas autopartes; estos procesos actualmente se los puede realizar en nuestro país pudiéndose diseñar, manufacturar y verificar el desempeño de las autopartes generadas gracias a pruebas para saber el nivel de desempeño.

Al realizar esta investigación se podrá obtener una visión sobre las fallas y aciertos que generará la manufactura de una autoparte, en este caso el pistón que se pretende diseñar y ponerlo a prueba para obtener datos que ayudará a identificar el comportamiento del mismo bajo carga.

Inicialmente se efectuará el modelado del pistón por medio de un software CAD; para que luego, con un software CAE generar una simulación que pueda mostrar el funcionamiento del pistón y obtener los parámetros para saber dónde se producirán más esfuerzo al realizar su trabajo.

Teniendo los parámetros de diseño se procederá con el mecanizado del pistón con ayuda del control numérico computarizado (CNC) en Aluminio 7021, para posteriormente someter al pistón a los tratamientos térmicos necesarios y acondicionarlo al ciclo de trabajo.

Es posible analizar los parámetros de rendimiento del elemento generado con pruebas dinámicas y un análisis físico del pistón después de realizar una prueba de ruta de 500Km

para observar su desempeño y comparar con los de un pistón de refacción regular, y así presenciar posibles mejorías y dar factibilidad a esta investigación y poder introducirse más a fondo en este campo y generar avances tecnológicos.

Con esta investigación se da la iniciativa para alcanzar la capacidad de generar nuevos métodos de producción, en el campo del diseño y mejora de partes automotrices.

1.3. Objetivo.

1.3.1. Objetivo general.

- Analizar el comportamiento de un pistón diseñado y manufacturado por medio de control numérico en aluminio 7021 para realizar pruebas de potencia torque y rendimiento en el motor de una motocicleta ICS 150s monocilíndrico de 4 tiempos.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Investigar sobre los procesos de manufactura de pistones para motores de ciclo Otto.
- Identificar las características favorables que obtiene el aluminio 7021 al ser sometido a tratamientos térmicos.
- Modelar el pistón con ayuda de un software CAD para posteriormente realizar simulaciones de comportamiento con un software CAE e identificar esfuerzos.
- Manufacturar un pistón a partir de un bloque de aluminio 7021 gracias al uso de control numérico computarizado y un programa CAM.

- Realizar los tratamientos térmicos necesarios al pistón para acondicionar al pistón al ciclo de trabajo dentro del motor.
- Efectuar pruebas dinamométricas al motor con el pistón de fábrica y realizar un análisis de su comportamiento después de funcionar bajo carga.
- Efectuar pruebas dinamométricas y de ruta al motor con el pistón diseñado y realizar un análisis de su comportamiento después de funcionar bajo carga.
- Evaluar la viabilidad del proyecto en sí (diseño, modelado, manufactura y desempeño del pistón)

1.4. Descripción general del proyecto.

Se realizará la búsqueda en bases digitales de investigaciones pertinentes, páginas web de empresas dedicadas a la construcción de pistones y publicaciones de sitios web confiables, con lo cual se podrá obtener información base para desarrollar un correcto manufacturado del pistón.

Se investigará características físicas y mecánicas del aluminio 7021, ya que el acero después del aluminio, resulta ser el material más utilizado en la industria automotriz y de esta manera determinar la factibilidad del aluminio 7021 en la utilización de pistones.

Se colocará en una motocicleta ICS el pistón de aluminio 7021 y se realizará un análisis del rendimiento del motor específicamente torque y potencia, para efectuar comparaciones entre los valores producidos del pistón de fábrica en comparación con el pistón de aluminio 7021.

Se trabajará con programas informáticos CAD de modelado en 3D, así como programas CAM para programación de máquinas de CNC.

Para la comprobación del diseño o modelado, se utilizará un software de simulación CAE, el mismo que contemplará parámetros requeridos para que los resultados de verificación de fuerzas y pesos sean los adecuados, tomando en cuenta que, una vez verificado las cargas del pistón en las pruebas de simulación, se procederá a la construcción del mismo utilizando aluminio 7021.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Torque.

El torque, según (Todo Autos, 2018), es la fuerza torsional que es capaz de proporcionar el motor desde su eje principal, es decir la fuerza de la explosión aplicada a la biela y transmitida por esta al codo del cigüeñal, para hacerle girar y producir un esfuerzo de rotación como se observa en la figura [1] los elementos que interactúan en el movimiento del cigüeñal. Se mide en kilogramos-metro (Kg-m), Newton-metro (N-m) o pie-libras (pie-lb). Por lo tanto, generalizando se puede decir que el torque es la medida del trabajo que es capaz de realizar el motor.

Intuitivamente se entiende que la fuerza (F) que produce el par motor es una fuerza variable, que en el caso de un motor de 4T es máximo en el momento que se produce la combustión de la mezcla y su posterior expansión en el cilindro, siendo negativa, esto es, no genera par motor en las demás fases (expulsión de gases, aspiración o llenado y compresión de la mezcla) y dentro de la fase donde se genera par motor (es decir, en la fase de combustión), el rendimiento del motor no es el mismo dependiendo del régimen de giro, y por ende el valor de la fuerza (F) de empuje que se genera así, a bajas revoluciones la combustión de la mezcla no resulta óptima debido a la escasa inercia que poseen los gases, que provoca que el llenado del cilindro no sea el óptimo, al igual que su vaciado y por otro lado, si el motor funciona a un elevado régimen,

tampoco el llenado de los cilindros es completo, y ello es debido al escaso tiempo que dispone el gas para ocupar todo el recinto. En consecuencia, la curva de par (T), que debería ser una recta horizontal, se convierte en una curva, con un tramo central casi recto que proporciona el máximo par, y las zonas extremas donde el par motor decrece según lo comentado anteriormente a continuación, se adjunta una gráfica con la curva par motor-potencia frente a las revoluciones de giro del motor, que puede responder a un caso general de vehículo. (Rodríguez, 2019)

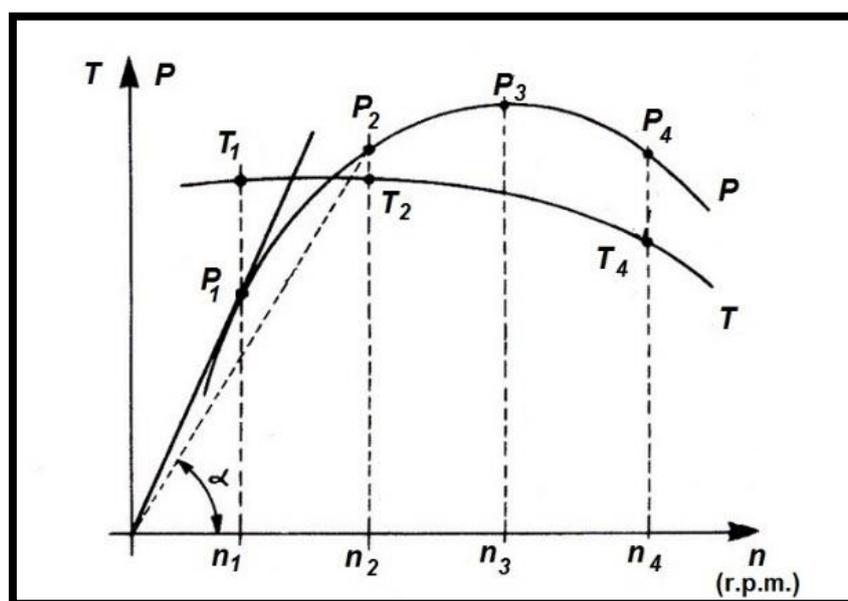


Figura No. 1. Gráfica de potencia y par motor.

Fuente: (Rodríguez, 2019)

2.2. Potencia.

Se define como la energía liberada por una máquina en la unidad de tiempo, esta determina el caballaje de un motor y se mide en HP (medida utilizada para vehículos de USA y la más estandarizada) o CV (medida utilizada para vehículos europeos y

asiáticos). (Eraso, 2019)

HP (Horse Power) es una unidad de medida de la potencia que toma como referencia la fuerza producida por el caballo como animal de trabajo. Y es equivalente al esfuerzo necesario para levantar 55 libras de peso en un segundo, a un pie de altura, un CV (Caballo de Vapor) unidad de medida de la potencia que toma como referencia la fuerza que produce el vapor de agua en un recipiente que acumula su presión. Pero el HP y el CV no son iguales; para explicarlo, nada mejor que decirlo apoyándome en las palabras que decía mi profesor Salvador López cuando me lo explico: “...el caballo americano (HP) es alto, pero tan delgado que se ve raquíto, contrario al caballo europeo (CV) que es un caballo de estatura media pero corpulento...” de allí la diferencia. El HP siempre va a tener un número mayor que su equivalente en CV. Pero no se deje engañar; esta confusión ha sido planeada ya que con este “truco” sólo se busca confundir y aparentar superioridad por parte de los americanos, ya que al ser más débil su caballo, necesitan más de estos para alcanzar la equivalencia con los CV. (Eraso, 2019)

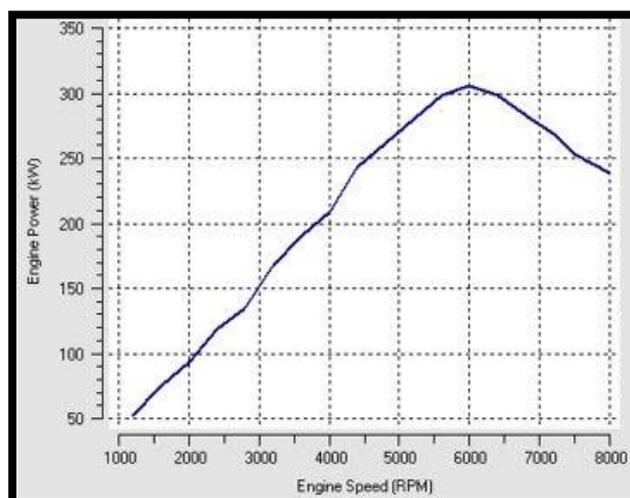


Figura No. 2. Gráfica de potencia.

Fuente: (El automóvil al desnudo, 2012)

2.3. Consumo másico de combustible.

El consumo específico (C), se define como el caudal de combustible que consume el motor o consumo horario por la potencia que proporciona. El consumo específico se mide en g/kWh . El consumo específico proporciona información sobre el rendimiento del motor. Cuanto menor sea su consumo específico, mejor es su rendimiento, el rendimiento de un motor indica la proporción de energía útil empleada en mover el vehículo de la total obtenida con la combustión en el motor. En los mejores motores diésel, este rendimiento apenas supera el 40%, mientras que en los motores de gasolina se queda por debajo de esa cifra. (Rodríguez, 2019)

Las causas de este rendimiento tan bajo en los vehículos actuales son debidas, entre otros factores, a que se emplea gran parte de la energía producida en el motor en aspectos como vencer la resistencia a la rodadura del vehículo sobre la carretera (rozamiento del neumático con el asfalto...), pérdidas en la cadena de transmisión (embrague, caja de cambios, cojinetes), consumo de elementos auxiliares del vehículo (aire acondicionado, iluminación). (Rodríguez, 2019)

Es la rapidez de consumo de combustible del motor en masa, como se observa en la figura [3] el consumo de combustible (línea roja) está directamente relacionado con el número de revoluciones en las que se encuentra girando el motor de combustión interna. (Mena Rodríguez, 2014)

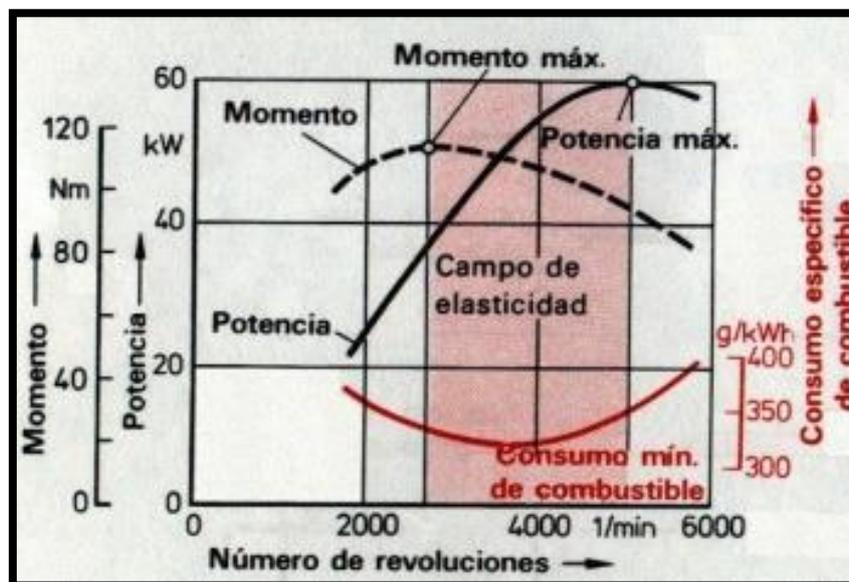


Figura No. 3. Gráfica de consumo de combustible.

Fuente: (El automóvil al desnudo, 2012)

2.4. Características de un pistón automotriz.

El pistón es de forma cilíndrica y suele estar fabricado con una aleación de aluminio, su fabricación implica el uso de altas tecnologías para lograr una máxima precisión en cuantos a medidas y lograr la resistencia adecuada para soportar el desgaste causado por la temperatura y movimiento. (MecanicaFacil, 2019)

Al girar la llave cuando se enciende el carro, se envía un impulso eléctrico al motor de arranque que hace girar el cigüeñal y en su giro hace que los pistones suban y bajen para comprimir la mezcla de aire-combustible que ayudada por la chispa que aporta la bujía crea una explosión que empuja nuevamente el pistón para que se inicie otro ciclo de funcionamiento. El movimiento del pistón es hacia arriba y abajo en el interior del cilindro, comprime la mezcla, transmite la presión de combustión al cigüeñal a través

de la biela y fuerza la salida de los gases resultantes de la combustión hacia el escape produciendo un vacío en el cilindro que aspira la mezcla. (AutoLab, 2018)

$$F_e = Pz \frac{N}{m^2} \cdot \text{Àrea}_{\text{pistòn}} (m^2)$$

Ecuación 1. Fuerza en la parte superior del pistón

Generalmente está constituido por una sola pieza [figura 4] que puede considerarse dividida en dos partes fundamentales: la cabeza (10), que soporta directamente las presiones y temperaturas del gas, y la falda (5), que sirve de guía al pie de la biela y soportar el empuje lateral y el rozamiento contra las paredes del cilindro en la falda va practicado un orificio (9) que aloja a un eje llamado bulón, que realiza la unión del pistón a la biela. En la cabeza del pistón se practican unas gargantas (1, 2 y 3), donde se alojan unos anillos circulares y elásticos llamados segmentos, que ajustan perfectamente a las paredes del cilindro evitando las fugas del gas. El alojamiento del eje del bulón (4) se une a la cabeza del pistón por medio de nervaduras que dan consistencia al conjunto y favorecen la evacuación del calor. (Alonso, 1996)

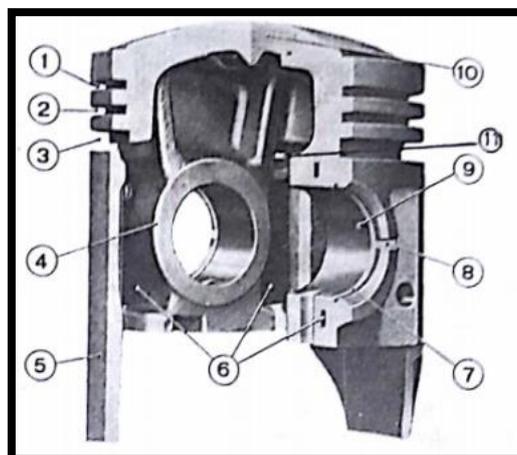


Figura No. 4. Partes del pistón.

Fuente: (Alonso, 1996)

La forma del émbolo y el tipo de transmisión de la fuerza de gas a través del perno de émbolo a la biela también dependen gran medida de la forma de la cámara de combustión y por tanto del fondo del embolo, así como del proceso de combustión utilizado y las presiones máximas de combustión. (Bosch, 2005)

(Bosch, 2005) menciona, las fuerzas que se producen, la exigencia de un peso lo más reducido posible y las temperaturas que se originan en el émbolo, que pueden acercarse al límite de resistencia del material, requieren un cuidadoso dimensionamiento del émbolo, del perno del émbolo y del cojinete del perno del émbolo.

2.4.1. Dimensiones de los pistones.

Las medidas principales del émbolo son aquellas que deben coincidir con las de los émbolos de origen, sea cual sea la marca de los émbolos que se van a montar en la reparación, excepto el diámetro si se trata de émbolos sobre medida. De las medidas principales las más importantes son: el diámetro del émbolo, diámetro del alojamiento del bulón y la altura de compresión. (CEAC, 2004)

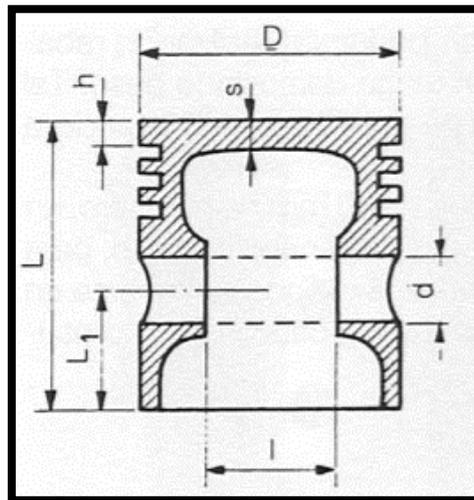


Figura No. 5. Cotas a considerar en un pistón.

Fuente: (Gillieri, 2005)

- L = longitud del pistón
- $L1$ = longitud de la falda del pistón desde su extremo inferior al centro de alojamiento del eje.
- s = espesor de la cabeza.
- h = altura desde el borde superior del cuerpo hasta la primera garganta.
- d = diámetro de los alojamientos del eje del pistón.
- l = distancia entre los alojamientos del eje de pistón. (Gillieri, 2005)

En la tabla 1 se puede observar las dimensiones que conforman la armónica geometría de los pistones que son fabricadas para vehículos, cabe recalcar que todas las dimensiones tienen relación con el diámetro.

Tabla No. 1.

Relación con respecto al diámetro.

Cota	Relación con respecto al diámetro
L	De 1.1 a 1.5 x D
L1	De 0.55 a 0.7 x D
s	De 0.1 a 0.2 x D
h	De 0.06 a 0.1 x D
d	De 0.25 a 0.3 x D
l	De 0.32 a 0.44 x D

Fuente: (Gillieri, 2005)

2.4.2. Formas de pistones.

Los materiales más utilizados para la camisa del cilindro y el émbolo son la fundición gris y el aluminio. Para mantener reducida la holgura del émbolo en el cilindro por motivos de hermeticidad y acústicos (inclinación defectuosa del émbolo) a pesar de los distintos coeficientes de dilatación se incrustarán por fundición tiras de acero similar, que limitan la dilatación del émbolo. (Gillieri, 2005)

- a) Émbolo de aluminio para motor Diésel de vehículos industriales, con soporte de anillos y canal de refrigeración
- b) Émbolo de acero de forja para vehículos industriales
- c) Émbolo de aluminio para motor Diésel de turismo con soporte de anillos y canal de refrigeración.
- d) Émbolo de aluminio para motor Diésel de turismo con soporte de anillos refrigerado.
- e) Émbolo de aluminio para motor Otto de inyección multipunto de turismos.
- f) Émbolo de aluminio para motor Otto de inyección directa turismo. (Bosch, 2005)

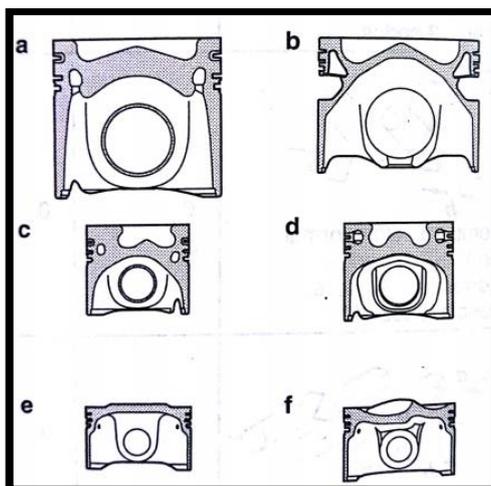


Figura No. 6. Formas de émbolos.

Fuente: (Bosch, 2005)

2.4.3. Dilatación del pistón.

Los pistones de cualquier motor de combustión interna, ya sean de dos o de cuatro tiempos, son cónicos y ovalados, de ese modo se controla la dilatación en su funcionamiento. Para conseguir su medida máxima hay que medir entre 10-12 mm de la falda, en la parte contraria al bulón. (Greenlandmx, 2017)

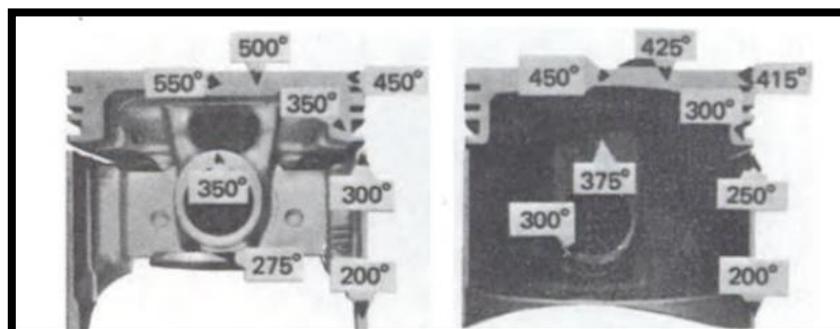


Figura No. 7. Sección de un pistón forjado y fundido.

Fuente: (Crouse, 1993)

Los pistones de aluminio pueden ser fundidos o forjados, los pistones fundidos se obtienen vertiendo aluminio fundido en el interior de moldes. Los pistones forjados son obtenidos por “martilleo” de bloques de una aleación de aluminio, esta aleación, cuando está sometida a las altas presiones propias del forjado, fluye o se estira, dentro de matrices para formar los pistones, ambos tipos de pistones deben ser tratados térmicamente. El pistón forjado es más compacto y ofrece mejor conductibilidad del calor, evitando así su concentración en la cabeza del mismo, en la figura están indicadas las temperaturas en puntos similares de ambos pistones trabajando en las mismas condiciones. (Crouse, 1993)

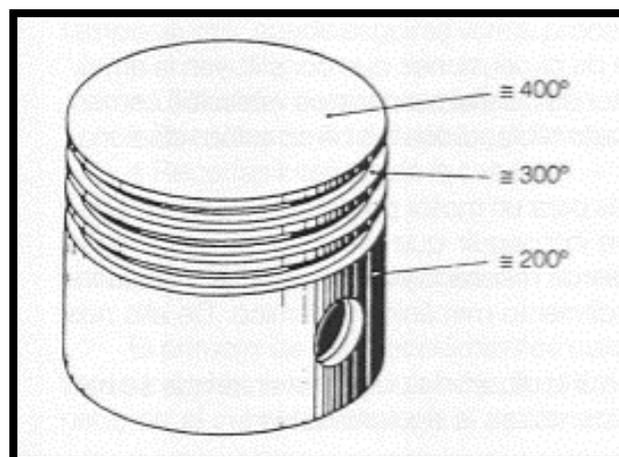


Figura No. 8. Temperaturas de un pistón en sus principales zonas de trabajo.

Fuente: (Gillieri, 2005)

Para los motores de serie esta solución puede ser la más corriente, pero para los motores de competición hay que acudir el forjado de los pistones para conseguir dotarlos de la mayor resistencia, de modo que las fibras del material se mantengan en las condiciones más favorables para dotarlos de la mayor resistencia. (Gillieri, 2005)

En la actualidad la mayoría de pistones se construyen de manera que tienen una forma ligeramente ovalada cuando están fríos estos pistones se esmerilan con una máquina que utiliza una leva para acercarse y alejarse de la rueda rectificadora el pistón mientras gira. Cuando un pistón así mecanizado se calienta adquiere una forma redonda y entonces su superficie de contacto con la pared del cilindro aumenta, la palabra contacto no significa que se encuentra metal con metal, como ya hemos mencionado existe un huelgo o juego entre el pistón y la pared del cilindro. (Crouse, 1993)

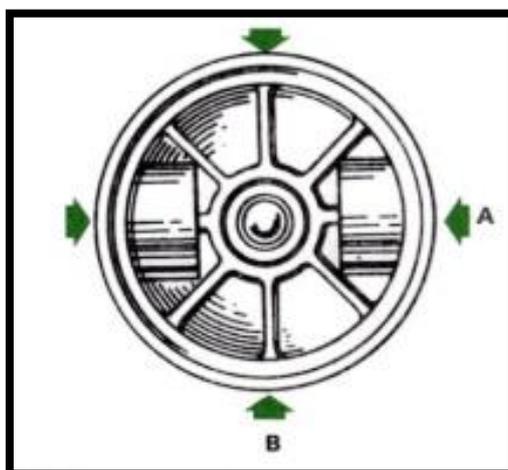


Figura No. 9. Pistón ovalado visto por su parte inferior.

Fuente: (Crouse, 1993)

Por tanto, significa que cuando esté frío la forma ovalada del pistón permite el huelgo normal solo en una pequeña superficie (con huelgo excesivo en cualquier otra parte). Pero cuando el pistón se calienta, aumenta la superficie de huelgo normal, veamos lo que ocurre: la cabeza del pistón se dilata uniformemente en todas direcciones, pero la rigidez de los apoyos de los bulones (las secciones redondas que soportan estos) son más eficaces en la transmisión de este empuje exterior y, por tanto, al desplazarse estos apoyos hacia fuera, hacen que el pistón adopte la forma redonda. (Crouse, 1993)

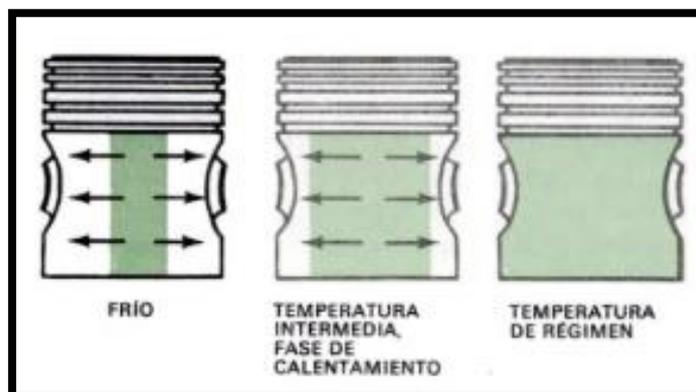


Figura No. 10. Dilatación de la falda del pistón

Fuente: (Crouse, 1993)

2.4.4. Tolerancias de los pistones.

(Greenlandmx, 2017) menciona que, el conjunto de pistón y cilindro es una de las partes vitales del motor. De la perfecta adecuación de ambos elementos obtendremos el correcto funcionamiento del motor y con ello la consiguiente ganancia de prestaciones alejando de nuestro motor las temidas e inoportunas averías

Los pistones trabajan con tolerancias de 4 a 6 centésimas (0,04-0,06) en los motores de dos tiempos, y de 3 a 4 centésimas en los motores de cuatro tiempos (0,03-0,04). Para recuperar un cilindro deformado, se pule o bruñe el interior del cilindro ajustando la tolerancia con el diferente sobremedida de pistón disponible para este fin. Los pistones se marcan con las letras de la A a la D, siendo la de menor medida la A, y va aumentando 1 centésima por cada letra consecutiva, es decir: la selección B es 0,01 mm mayor que la A, la C es 0,02 mm mayor que la A, y así sucesivamente. (Greenlandmx, 2017)



Figura No. 11. Pistón con ruptura en la falda.

Fuente: (Greenlandmx, 2017)

Ejemplos:

- Un cilindro nuevo de $\text{Ø } 80.00$ mm. monta un pistón de $\text{Ø } 79,97$ A (Tolerancia fábrica 0.03 mm)
- Un cilindro pulido de $\text{Ø } 80,01$ mm. monta un pistón de $\text{Ø } 79,98$ B (Tolerancia fábrica 0,03 mm)
- Un cilindro pulido de $\text{Ø } 80,02$ mm. monta un pistón de $\text{Ø } 79,99$ C (Tolerancia fábrica 0,03 mm)
- Un cilindro pulido de $\text{Ø } 80,03$ mm. monta un pistón de $\text{Ø } 80,00$ D (Tolerancia fábrica 0,03 mm)

2.4.5. Temperaturas de funcionamiento en émbolos de motores de automóviles a plena carga.

Valores en Combustión:

- Émbolo de motor Diésel de turismo, presión de encendido de 16 Mpa ,58 KW/l.
- Émbolo de motor Otto para turismo, presión de encendido de 7.3 Mpa ,53 KW/l.

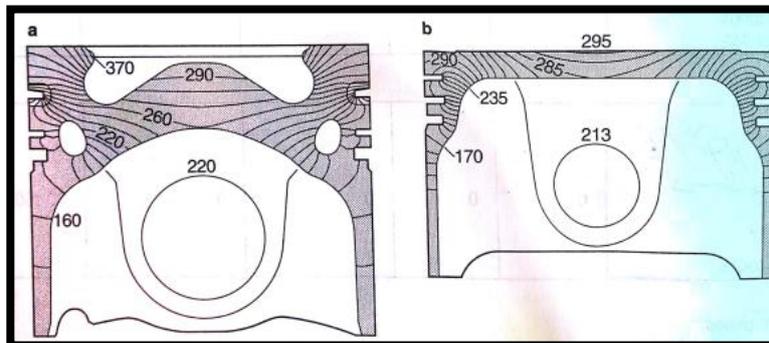


Figura No. 12. Temperatura de funcionamiento en émbolos.

Fuente: (Bosch, 2005)

2.5. Trabajos y características en los ejes de pistón o bulones.

El bulón es un tornillo de acero o acero cincado con centro hueco que sirve para articular el embolo con la biela siendo este el eje donde oscilara el embolo, esta es la pieza que está sometida a más desgaste en el motor ya que tiene que aguantar mucha tensión. También está sometida a carga térmica debido a la transmisión de calor desde la cabeza del embolo y al rozamiento del bulón con el pie de la biela, debido a todo esto es la pieza que recibe más desgaste en todo el motor junto a los componentes con los que tiene contacto. (Motores, 2019)

2.5.1. Descentrado del bulón.

En algunos motores el bulón está desplazado de la línea central del pistón hacia la cara cuyo empuje es mayor. Esta es la cara que ejerce mayor presión contra la pared del

cilindro durante la carrera motriz. Si el bulón está centrado, la cara de menor empuje permanece en contacto con la pared del cilindro hasta el final del tiempo de compresión. Luego, cuando se inicia la carrera motriz, el ángulo que forma la biela varía de izquierda a derecha, siendo ello causa de un repentino cambio de empuje lateral sobre el pistón, desde la cara de menor empuje a la opuesta en que el empuje ejercido es mayor. Si el huelgo es excesivo se producirán golpes del pistón. (Crouse, 1993)

Sin embargo, si el bulón o perno del pistón está descentrado, la presión debida a la combustión da lugar a la inclinación del pistón cuando este se acerca al PMS, según puede verse. El extremo inferior de la cara de mayor empuje es por donde primeramente se establece contacto con la pared del cilindro. Después cuando el pistón ha pasado por el PMS y tiene lugar la inversión del empuje, se realiza el total contacto con la cara de mayor empuje, siendo menor la probabilidad de que el pistón no golpee, la inclinación es debida a que la presión motivada por la combustión es mayor sobre la parte derecha del pistón (la cual mide $R+O$, o sea el radio del pistón más el descentrado) que sobre la parte izquierda (la cual mide $R-O$). (Crouse, 1993)

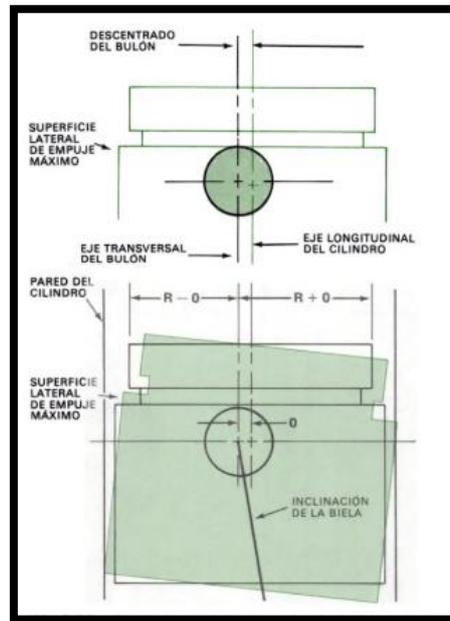


Figura No. 13. Bulón descentrado.

Fuente: (Crouse, 1993)

En la figura [14] tenemos un ejemplo gráfico del comportamiento del pistón, con sus tendencias al campaneo, durante el desarrollo de una fase de la carrera en la que el pistón cambia de posición. En esta figura se nos muestra esta tendencia al campaneo del pistón a la que nos referimos, y que en la figura se muestra, por su puesto, muy exagerada, para expresar mejor el concepto. (Gillieri, 2005)

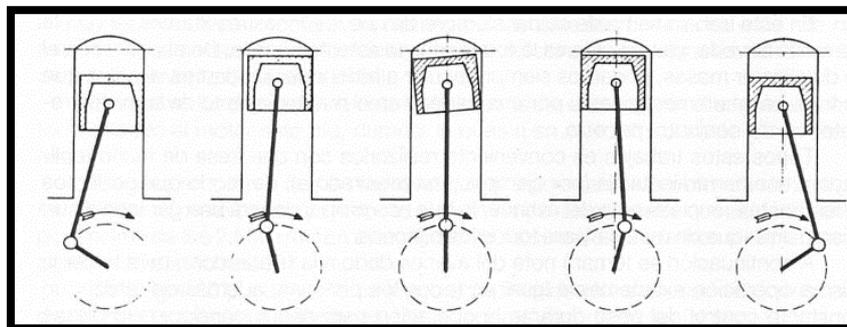


Figura No. 14. Diferentes fases angulares del proceso final del tiempo de compresión y principio de tiempo de explosión.

Fuente: (Gillieri, 2005)

2.6. Segmentos del pistón.

Los segmentos, o también conocidos como rines, aros o anillos de pistón, etc., es un aro metálico, por lo general de una aleación entre hierro dúctil con molibdeno y cromo, de sección rectangular que se aloja en las ranuras que se encuentran en la superficie exterior del pistón.

La principal función de los segmentos es reducir lo más que se pueda las fugas de los cilindros, haciendo que el cilindro sea lo más hermético posible.

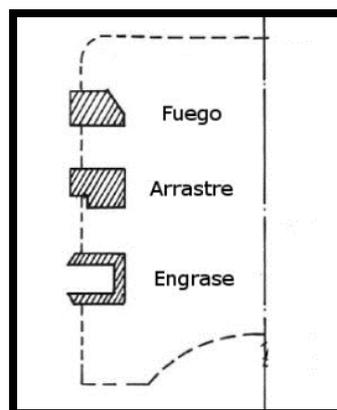


Figura No. 15. Segmentos de pistón.

Fuente: (García, 2018)

2.6.1. Tipos de segmentos según su función.

a) Segmento de fuego.

Su perfil es axial para facilitar la lubricación hidrodinámica. Suelen tener una sección rectangular con cantos apropiados para evitar el pegado en los alojamientos y con

forma de barrilete en la zona de trabajo para que pueda acomodarse a la rotación del segmento tal como ocurre con los pistones de falda corta. Los tratamientos superficiales más usados son el cromado y el tratamiento con molibdeno para reducir el desgaste. El disulfuro de molibdeno (MoS_2) es un buen lubricante por sí mismo y brinda propiedades de tolerancia de presiones extremas a los lubricantes al reaccionar con el metal, de manera que se forma una capa cristalina en la superficie de éste. Gracias a ello, el contacto metal-metal, destructivo a largo plazo, se reduce al mínimo y se puede emplear a altas temperaturas. (García, 2018)

b) Segmento de compresión.

Se usa para reducir la presión tras el segmento de fuego, tiene una menor sollicitación por lo que puede ser más flexible para un mejor control del consumo de aceite. El objetivo de este segmento es compensar la deflexión torsional del segmento bajo la carga, de manera que en la zona superior tiende a evitarse el contacto con la camisa. La zona superior del segmento tiende a bombear aceite hacia la cámara de combustión y el contacto de la zona inferior favorece una acción de rascado del aceite en la carrera descendente. (García, 2018)

c) Segmento de rascado (engrase).

Suministra y distribuye el aceite sobre la camisa directamente, devolviendo el exceso de aceite hacia el cárter. El segmento rascador debido a su mayor tensión radial opera bajo condiciones de lubricación límite, con lo que contribuye aproximadamente al

doble de fricción que los segmentos de compresión. (García, 2018)

2.6.2. Tipos de segmentos según su forma y características.

a) Segmento cilíndrico de sección rectangular.

Se utiliza como segmento de fuego, al cual se le da un revestimiento de cromo con un espesor de 0,06 a 1 mm, según las características del motor. Presenta gran superficie de contacto que facilita la estanqueidad y la evacuación del calor. (Dani Meganeboy, 2014)

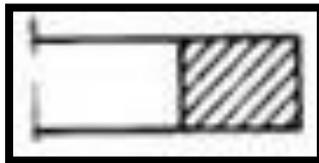


Figura No. 16. Segmentos se sección rectangular.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

b) Segmento cónico.

Se emplea como segmento de compresión y se sitúa debajo del segmento de fuego. Su forma acelera el asiento circular durante el rodaje como consecuencia de su conicidad. La cara superior debe venir marcada para no invertir su posición en el montaje ya que, en este caso, aumentaría considerablemente el paso de aceite. (Dani Meganeboy, 2014)

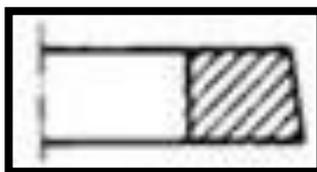


Figura No. 17. Segmentos se sección cónica.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

c) Segmento de torsión.

Este tipo de segmento conserva su forma cilíndrica en la parte exterior o superficie de asiento, pero tiene una cierta conicidad en la parte interior. A cada variación de sentido del émbolo tiende a bascular en su ranura, lo cual aumenta la estanqueidad durante la carrera de ascenso y durante el descenso hace las veces de segmento rascador. (Dani Meganeboy, 2014)

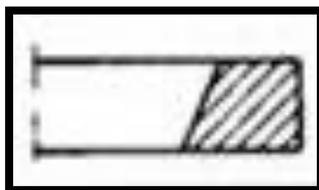


Figura No. 18. Segmentos de torsión.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

d) Segmento trapecial.

Se utiliza en motores con elevada temperatura interna, como en los Diésel. La menor dimensión de la cara interna, debido a la forma trapecial, les permite bascular en ambos sentidos y evita que se queden clavados en la ranura por efecto de la mayor dilatación en esa zona. Se utiliza como segmento de fuego. (Dani Meganeboy, 2014)

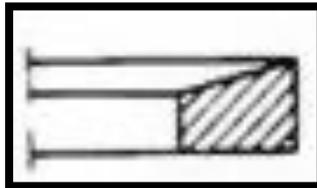


Figura No. 19. Segmentos se sección trapecial.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

e) Segmento con expansor (F).

Conserva las características de fundición en cuanto a la cara de deslizamiento, pero lleva sobre el fondo del alojamiento un resorte de banda de acero que le permite aumentar la presión superficial sobre el cilindro. (Dani Meganeboy, 2014)

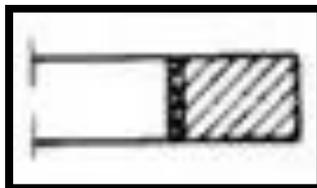


Figura No. 20. Segmentos con expansor.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

f) Segmentos recogedores de aceite.

Se emplean como segmentos de engrase. Tienen forma de U, con unos orificios o ranuras centrales a través de las cuales pasa el aceite al interior del pistón para su retorno al cárter. (Dani Meganeboy, 2014)

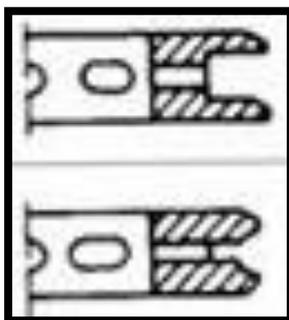


Figura No. 21. Segmentos recogedores de aceite.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

g) Segmento compuesto.

Se emplea también como segmento de engrase. Está formado por una arandela guía (1) a cada lado del segmento, un espaciador hueco (2) y un expansor (3) de lámina de acero. (Dani Meganeboy, 2014)

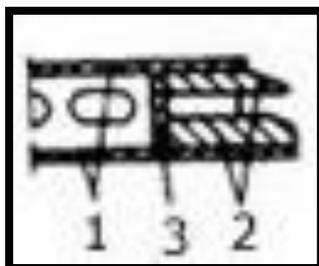


Figura No. 22. Segmento compuesto.

Fuente: (Dani Meganeboy, 2014)

2.6.3. Especificaciones de trabajo de segmentos del pistón.

Durante el ciclo de trabajo de la presión de combustión se genera hasta el 90 % de la fuerza total de presión de los segmentos de compresión, los gases de combustión entran en las ranuras para segmentos y penetran así en los reversos de los segmentos de los pistones.

Ahí, “la presión de combustión intensifica la fuerza de presión de los segmentos de pistones contra la pared del cilindro este aumento influye en el primer segmento de compresión y con menor fuerza en el segundo segmento de compresión”. (MS Motorservice International GmbH, 2019)

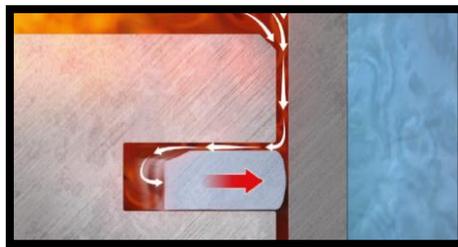


Figura No. 23. Segmento de compresión.

Fuente: (MS Motorservice International GmbH, 2019)

El espesor radial se verifica con precisos micrómetros en diezmilésimas. Se puede comprobar la pared del aro invirtiéndolo e insertándolo en la ranura del pistón y comprobando que el aro no sobresalga de la ranura considerando que se debe limpiar el carbón del pistón usado, o su comprobación no será precisa. La luz entre puntas se determina en la fábrica, usando instrumentos de precisión dentro de una tolerancia, mayor o menor de cinco diezmilésimas de pulgada, para el diámetro standard indicado por el fabricante del motor”. (Yasaca, 2018)

ESPECIFICACIONES	
Diámetro del cilindro	Luz entre puntas
1" a 1-31/32"	0.005" a 0.013"
2" a 2-31/32"	0.007" a 0.017"
3" a 3-31/32"	0.010" a 0.020"
4" a 4-31/32"	0.013" a 0.025"
5" a 5-31/32"	0.017" a 0.032"
7" a 8"	0.023" a 0.040"

Figura No. 24. Especificaciones de aros de pistón.

Fuente: (Yasaca, 2018)

2.6.4 Reemplazo y montaje de segmentos de pistón.

El montaje de los segmentos de pistón es uno de los procesos de más cuidado y precisión que se debe tener, teniendo siempre en presente los ajustes y las tolerancias de manera precisa.

En los motores modernos, los aros de cada cilindro recorren aproximadamente 457 metros por minuto a velocidades de crucero en carretera. (Yasaca, 2018)

La limpieza durante el proceso de montaje es muy importante ya que cualquier elemento o partícula extraña que entrase, podría causar desgaste prematuro y excesivo de los componentes internos que están sometidos a fricción por lo que desencadenaría a una falla del motor.

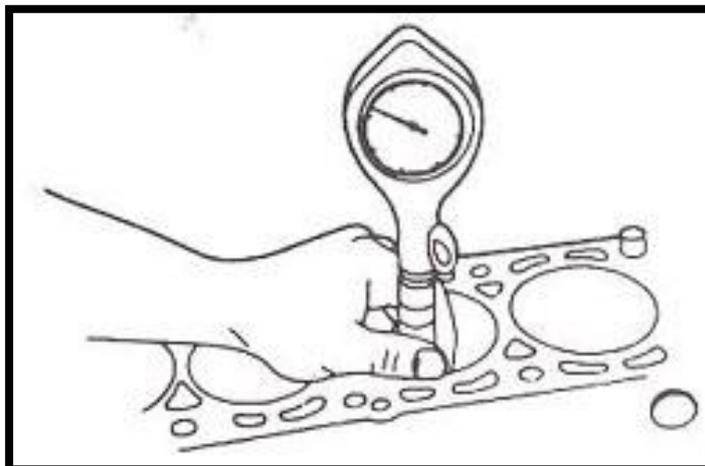


Figura No. 25. Cortador de reborde.

Fuente: (Yasaca, 2018)

Previo al montaje del pistón con los segmentos se debe eliminar el borde superior del cilindro o camisa para evitar que los pistones se dañen provocando fracturas del pistón o una posible deformación en la falda.

El diámetro de los cilindros también es muy importante al momento del montaje de los segmentos, con la ayuda de una alesómetro se debe verificar el ovalamiento de la camisa, realizando mediciones en las partes central, superior e inferior del recorrido del segmento.

Muchos fabricantes de motores establecen límites permisibles, pero una buena regla empírica es un máximo de tres milésimas de ovalización. (Yasaca, 2018)

No hay que descuidar la limpieza de las ranuras de los segmentos del pistón, en caso de que se ocupen los mismos pistones se debe limpiar toda la carbonilla de las ranuras y comprobar la luz con un segmento nuevo.

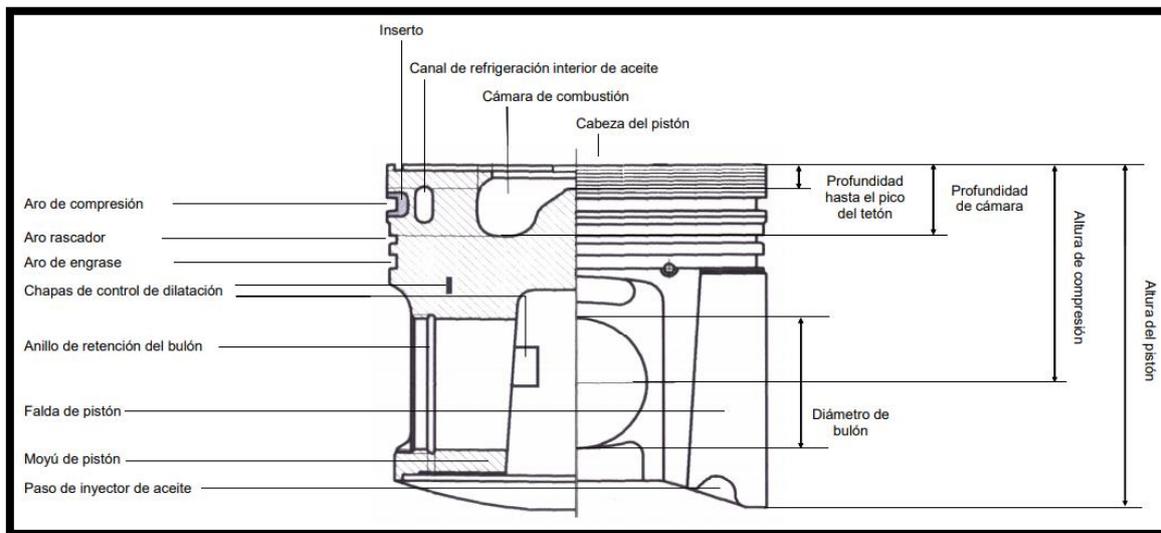


Figura No. 26. Acotación de la vista frontal del pistón.

Fuente: (Mundo Pistón, 2018)

Es importante también verificar la luz entre la punta de los segmentos, utilizando el pistón para cuadrar el segmento en el interior del cilindro haciendo que se encuadre y medir la luz que especifique el fabricante.

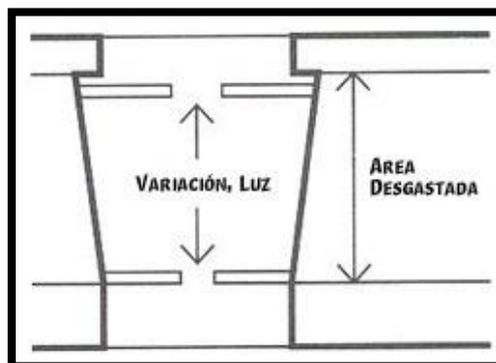


Figura No. 27. Rango de variación de luz.

Fuente: (Yasaca, 2018)

2.7. Fuerzas que actúan sobre el mecanismo biela – manivela.

La presión del gas origina la fuerza del pistón P . La fuerza del pistón, por la inclinación de la biela, se descompone en una fuerza lateral F_n (perpendicular a las paredes del cilindro) y otra F_b en el sentido de la biela (Fuerza en la Biela). En el muñón del cigüeñal, según la posición de éste, la fuerza de la biela se descompone en una fuerza tangencial F_t , y otra de compresión hacia el eje del cigüeñal llamada fuerza de la línea de bancada F_{rad} las mismas que se representan en la Figura [28]. (Mena Rodríguez, 2014).

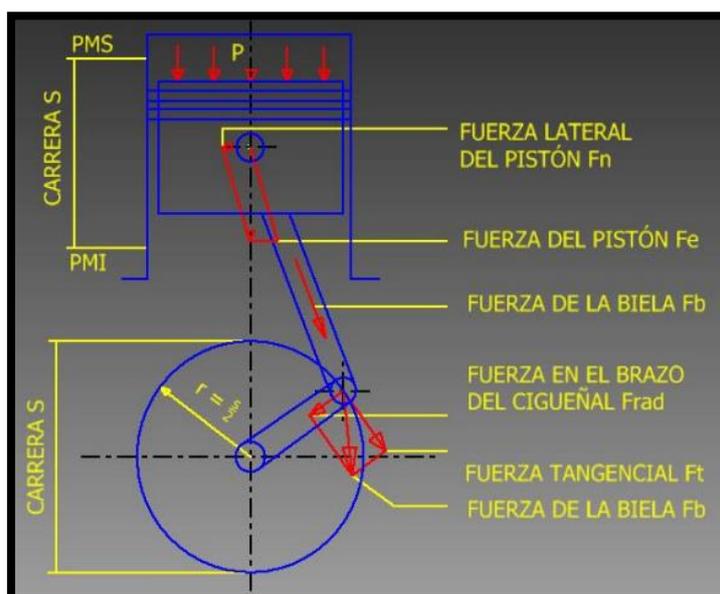


Figura No. 28. Fuerzas en el Mecanismo Biela – Manivela.

Fuente: (Mena Rodríguez, 2014)

2.8. Trabajos prácticos de reducción de peso de los pistones.

Supuesta una misma cilindrada, para aumentar la potencia es necesario aumentar el régimen de giro de un motor y para ello es preciso un aligeramiento de las masas que

están en constante movimiento para cumplir las exigencias del ciclo. Una de las masas más comprometida es precisamente, el pistón. (Gillieri, 2005)

Hay que considerar que, si al pistón se le llega a rebajar mucho peso, este puede llegar a debilitarse, por lo que representaría en una falla eventual por el motivo que van a estar sometidos a esfuerzos mayores, a más presión y a temperaturas elevadas.

2.8.1. Recortes de la falda del pistón.

El reducir de material de la falda en los pistones es una de los métodos más utilizados en la preparación de motores, con el que se consigue una reducción de peso considerable y eliminado una disminución significativa de las zonas de fricción contra las paredes del cilindro.

Como ejemplo ilustrativo se muestra la figura 29, en la cual se aprecia un pistón de estándar (A) el cual al ser rebajado la falda (B) se aliviana el peso del pistón.

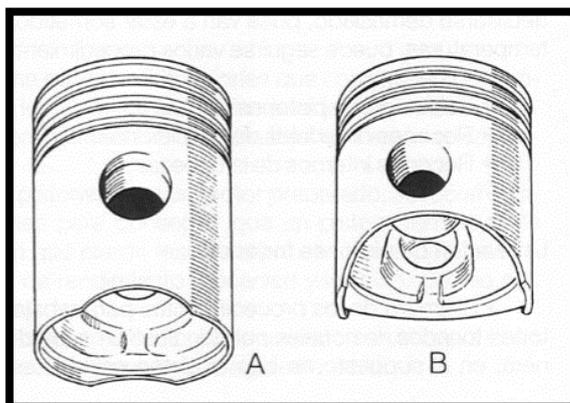


Figura No. 29. A: pistón estándar; B: el mismo pistón estándar después de haber sido trabajado para aliviarlo.

Fuente: (Gillieri, 2005)

(Gillieri, 2005) recalca varias consideraciones finales al trabajar la falda de un pistón, esta no debe ser rebajada a una distancia de 4 a 5 mm por debajo del eje del bulón, la longitud de la falda puede llegar a ser recortado 1.1 veces del diámetro del pistón.

Un trabajo adicional a la falda del pistón es de realizar orificios ciegos con el fin de mejorar la lubricación cuyo diámetro según (Gillieri, 2005) pueden ser de 2 a los 4 mm de diámetro. Con esto se logra conseguir una lubricación adicional mejorando las condiciones de funcionamiento del pistón.

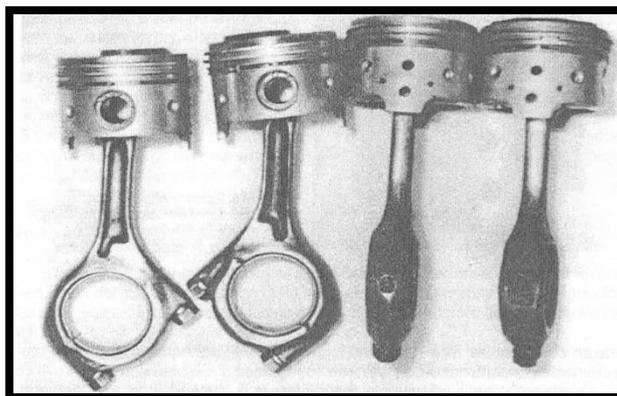


Figura No. 30. Conjunto de pistones y bielas después de haber sido aligerado y preparado para un motor de competición.

Fuente: (Gillieri, 2005)

2.8.2. Recortes internos de la cabeza del pistón.

Otra de las alternativas para aligerar el peso del pistón es el retirar el material excedente producido por el forjado o la fundición que se presentan en el interior de la cabeza del pistón.

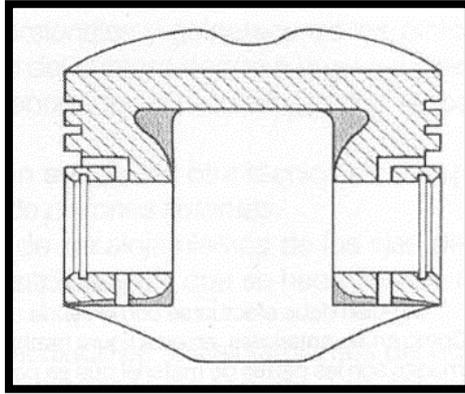


Figura No. 31. Las partes sombreadas son las partes de material que es posible rebajar.

Fuente: (Gillieri, 2005)

Con el fin de alivianar peso se puede optar por redondear las esquinas rectas o pulir secciones con irregularidades con la ayuda de una fresadora de mano.

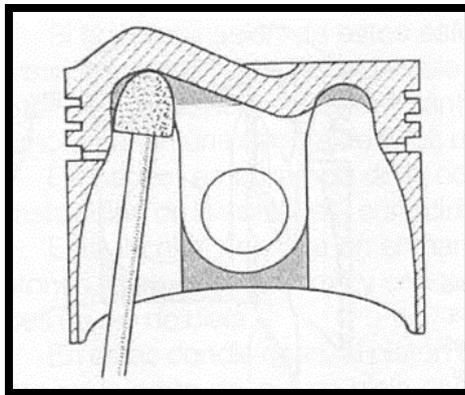


Figura No. 32. Forma de trabajar el aligeramiento de un pistón eliminando material interior con la ayuda de una fresa.

Fuente: (Gillieri, 2005)

Dependiendo de la dificultad del proceso y del modelo del pistón se puede incluso realizar el desbaste de material con ayuda de una broca y una taladradora.

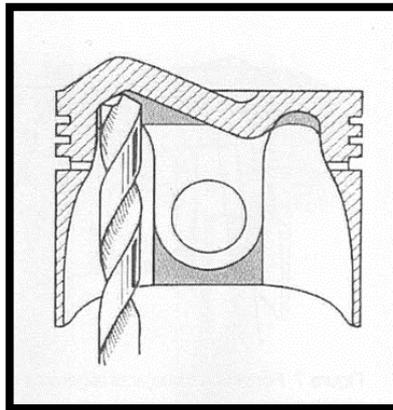


Figura No. 33. El rebaje interno también debe efectuarse con la ayuda de una broca.

Fuente: (Gillieri, 2005)

2.9. Fallas en la cabeza del pistón.

El pistón como uno de los componentes principales del motor, está siempre expuesto a soportar grandes cargas, calor y a presiones los cuales pueden provocar fallas en este elemento los cuales se los analizará a continuación

2.9.1. Gripado por recalentamiento:

El gripado es agarrotamiento entre dos elementos metálicos, pistón y camisa de cilindro, por causa de una fusión en las superficies de los materiales en contacto. Sus principales causas son según:

- Sobrecalentamiento debido a fallas de combustión
- Inyector de aceite doblado/obturado
- Montaje de pistones erróneos

- Fallas en el sistema de refrigeración
- Reducción de holgura en la parte superior de la superficie de rodadura. (MS Motorservice International GmbH, 2018)



Figura No. 34. Daños de gripado por calentamiento.

Fuente: (MS Motorservice International GmbH, 2018)

2.9.2. Fundiciones.

Cuando se presenta una deformación exagerada con obvia pérdida de material en la cabeza del pistón, según (Motorservice, Technical Market Support, 2014) esta son las causas más comunes:

- Bujías de encendido con un valor calorífico demasiado bajo.
- Mezcla demasiado pobre que provoca temperaturas elevadas de combustión.
- Válvulas dañadas o un juego de válvula insuficiente.
- Residuos incandescentes de la combustión en las cabezas del pistón.
- Combustible inapropiado con un índice octánico demasiado bajo.
- Combustible diésel en la gasolina:
- Sobrecalentamiento general del motor. (Motorservice, Technical Market Support,

2014)



Figura No. 35. Fundición de la cabeza del pistón.

Fuente: (Motorservice, Technical Market Support, 2014)

2.9.3 Huellas de golpes.

Encontrar golpes en el cuerpo del pistón son muy comunes, (MS Motorservice International GmbH, 2018) da las causas más comunes de esta falla:

- Saliente del pistón excesivo
- Re mecanización excesiva de la superficie refrentada plana de la culata
- Distancia incorrecta entre la culata y la válvula
- Junta de culata incorrecta
- Sedimentación de aceite carbonizado en la cabeza del pistón
- Juego de válvula demasiado pequeño
- Tiempos de mando de la válvula incorrectos debido un mal ajuste o saltos en las correas de distribución. (MS Motorservice International GmbH, 2018)



Figura No. 36. Huellas por golpes.

Fuente: (MS Motorservice International GmbH, 2018)

2.9.4 Grietas en la cabeza y la cavidad de fondo.

Se presenta fisuras en la cabeza del pistón en ocasiones hasta la falda o hasta el eje del bulón. Las posibles causas según (Motorservice, Technical Market Support, 2014) son:

- Fallo en la preparación de mezcla por inyectores incorrectos
- Temperaturas elevadas debido a sistema de refrigeración defectuoso.
- Oscilaciones de temperatura en motores con carga continuamente cambiante.
- Pistones con especificación incorrecta. (MS Motorservice International GmbH, 2018)



Figura No. 37. Grietas en la cabeza y cavidad el fondo.

Fuente: (Motorservice, Technical Market Support, 2014)

2.9.5. Daños en segmentos de pistón.

En este caso las ranuras de los segmentos presentan agrietamiento y desprendimiento de material. (MS Motorservice International GmbH, 2018) muestra algunas de las principales causas:

- Montaje incorrecto del pistón
- Derrame de combustible
- Fuerte desgaste axial de las ranuras para segmentos y los segmentos de pistones
- Bamboleo de los segmentos. (MS Motorservice International GmbH, 2018)



Figura No. 38. Daños en el segmento del pistón.

Fuente: (MS Motorservice International GmbH, 2018)

2.9.6. Desgaste debido a derrame de combustible.

Se presentan huellas muy notables de desgaste en las paredes de los segmentos de fuego y la falda. Las causas más comunes según (Motorservice, Technical Market Support, 2014) son:

- Mezcla de líquido refrigerante en el aceite de motor.

- Calidad insuficiente del aceite del motor.
- Derrame de combustible por combustión incompleta debido a fallas durante la preparación de mezcla.
- Fallas en el sistema de encendido (fallas de ignición).
- Dimensionamiento incorrecto del saliente del pistón
- Llenado incorrecto por un filtro de aire atascado.
- Inyectores averiados y no estancos.
- Mala calidad del combustible (autoencendido deficiente y combustión). (MS Motorservice International GmbH, 2018)



Figura No. 39. Desgaste radial debido a derrame de combustible.

Fuente: (Motorservice, Technical Market Support, 2014)

2.9.7. Desgaste axial debido a la suciedad.

Se presentan canales o rayaduras a lo largo de pistón desde la cabeza hasta la falda. Según (MS Motorservice International GmbH, 2018) estas son las causas más comunes:

- Partículas abrasivas de suciedad debido a una filtración insuficiente.
- Partículas de carbonilla que se producen durante el rodaje. (MS Motorservice

International GmbH, 2018)



Figura No. 40. Desgaste axial debido a la suciedad.

Fuente: (MS Motorservice International GmbH, 2018)

2.10. Características de la motocicleta ICS 150s.

Esta motocicleta de origen chino ha sido elegida para este estudio, por ser un vehículo ligero de fácil movilización y con la ventaja de tener un motor accesible para su rápido y fácil desmontaje.



Figura No. 41. Motocicleta ICS 150s.

Tabla No. 2.

Ficha técnica de la motocicleta ICS 150 cc.

Marca	ICS
Modelo	150s
Tipo	Panadera
Cilindraje	150 CC.
Motor	mono cilíndrico 4 tiempos
Trasmisión	5 velocidades
Refrigeración	Por aire
Suspensión delantera	Hidráulica
Suspensión Trasera	Doble amortiguar telescopio
Frenos	Disco delantero. / tambor posterior
Sistema de encendido	Electico y pedal
Velocidad Max	110 km/ h
Capacidad combustible	3.8 galones
Consumo combustible	1.9 gal
Peso	120kgs
Alimentación	Carburador

Fuente: Ficha técnica de la motocicleta.

2.11. Características del aluminio 7021.

El Aluminio por ser ligero, duradero y con buena estética de acabado le ha permitido tener una amplia gama de aplicaciones en la industria automotriz, por lo que el aluminio es el metal más utilizados en todo el mundo. (AlumiCopper, 2018)

El Aluminio 7021 fue elegido para esta investigación por ser unos de los mejores duraluminios aleados que se encuentran en el país, este se lo puede encontrar por bloques, las características importantes que cumple este aluminio son las siguientes:

- Tensiones internas extremadamente bajas
- Buena estabilidad de forma
- Alta resistencia
- Buena homogeneidad

2.11.1. Mecanizado del aluminio 7021.

Este aluminio se lo encuentra en el mercado por bloques o cilindros por lo que los procesos de mecanizado para trabajarlo deben tomarse en cuenta, de acuerdo con (AlumiCopper, 2018) el proceso de mecanizado de este Aluminio es 2 a 8 veces más rápido que de las otras familias de aleaciones de aluminio, y con ello se lleva a un menor desgaste de las herramientas y a una fabricación de molde más rápida.

2.11.2. Composición química del aluminio 7021.

La composición química de un material es la combinación de varios elementos para formar otro con otras características, en este caso el aluminio 7021, la cantidad de estos elementos se los presentan en porcentajes como se muestra en la tabla:

Tabla No. 3.

Composición química del aluminio 7021

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Otros	Al
0.05	0.25	0.40	1.2-1.8	0.10	0.25	0.10	5.0 - 6.0	0.15	restante

Fuente: (AlumiCopper, 2018)

2.11.3. Propiedades mecánicas y físicas del aluminio 7021.

Estas propiedades son las más importantes, ya que muestran las características y propiedades para las cuales fueron ideados. En las siguientes tablas se pueden apreciar las propiedades tanto físicas como mecánicas del Aluminio 7021:

Tabla No. 4.*Propiedades mecánicas del aluminio 7021.*

PROPIEDADES MECÁNICAS		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Límite Elástico (Rp)	0,2	MPa
Resistencia a la Tracción (Rm)	370	MPa
Alargamiento (A)	4	%
Dureza HBW (2,5/62,5)	100	

Fuente: (Suminox, 2018)

Tabla No. 5.*Propiedades Físicas del Aluminio 7021*

PROPIEDADES FÍSICAS		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDADES
Densidad	2.8	g/m^3
Coefficiente dilatación por calor (K^{-1})	23	
Conducción electricidad.	17 – 21	$M/\Omega.mm^2$

Fuente: (Suminox, 2018)

2.12. Programas computacionales aplicados en la ingeniería.

Actualmente en la ingeniería se ha visto lo indispensable de la asistencia computacional en el diseño, análisis y manufactura de partes y elementos para la industria en general, gracias a estos programas se optimiza tiempo, materiales y dinero, al momento de la producción de partes para la ingeniería.

2.12.1. Software CAD.

Un software CAD es una herramienta informática que ayuda al modelado o diseño de elementos y partes para la ingeniería generando dibujos o bosquejos ya sean bidimensionales o

tridimensionales, los cuales se guardan en un procesador con la ventaja de realizar cambios de acuerdo a la necesidad del diseñador.

La fabricación de productos por medio del diseño asistido por computadora tiene muchas ventajas respecto a la fabricación con operarios humanos. Entre estas están la reducción de coste de mano de obra, o la eliminación de errores humanos. (EcuRed, 2019)

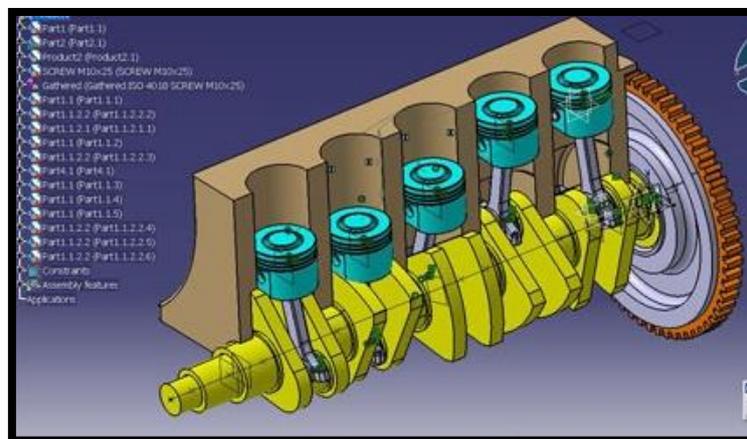


Figura No. 42. El software CAD para el diseño mecánico.

Fuente: (3DCadPortal, 2019)

a) **Ventajas del CAD.**

- Agilizar el proceso de diseño, mejorar la visualización de los subensambles, de las piezas y del producto final.
- Obtener una documentación más sólida y sencilla del diseño, que incluye geometrías, dimensiones y listas de materiales.
- Reutilizar fácilmente los datos de diseño y las mejores prácticas.
- Lograr una mayor precisión para reducir los errores. (Siemens, 2019)

2.12.2. Software CAE.

Un software CAE permite simular y analizar modelados realizados en ordenador con un software CAD, con el fin de determinar sus características y propiedades en un ambiente simulado y poder determinar su rentabilidad.

Su finalidad es optimizar su desarrollo y costos de fabricación, y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto final. La base de todas ellas se presenta como módulos o extensiones de aplicaciones CAD, que incorporan: – Análisis cinemático – Análisis por el método de elementos finitos (FEM, Finite Elements Method) (ELECTRIC, 2017).

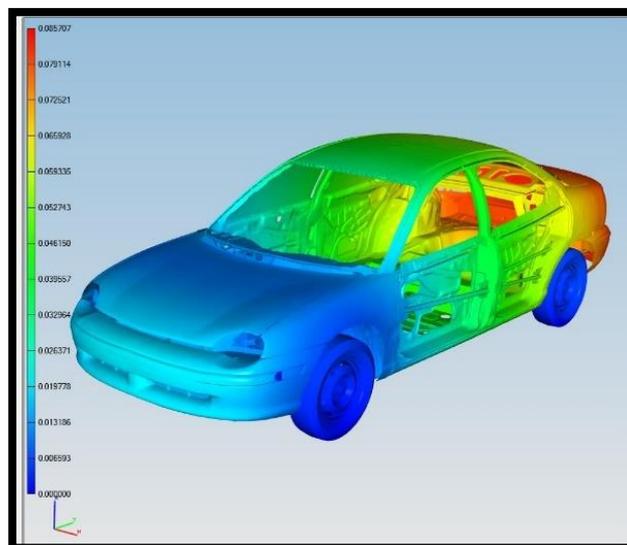


Figura No. 43. Análisis asistido por computadora.

Fuente: (Engineering, 2019)

a) Ventajas del CAE.

- Las decisiones de diseño se pueden tomar sobre la base de su impacto en el rendimiento.
- Los diseños se pueden evaluar y perfeccionar gracias a las simulaciones por ordenador en lugar de realizar pruebas con prototipos físicos, lo cual permite un ahorro de tiempo y dinero.
- La CAE puede proporcionar información sobre el rendimiento en etapas más tempranas del proceso de desarrollo, cuando resulta más económico efectuar cambios en el diseño
- La CAE ayuda a los equipos de ingeniería a gestionar el riesgo y a comprender las implicaciones en el rendimiento de sus diseños.
- La gestión integrada de datos y procesos de CAE amplía la capacidad de utilizar de forma efectiva la información sobre el rendimiento, así como de mejorar los diseños para una comunidad más amplia.
- Los problemas relativos a la garantía se reducen gracias a la identificación y a la eliminación de posibles problemas. Si se integra correctamente en el desarrollo de productos y de la fabricación, la CAE puede permitir una resolución más temprana de los problemas, lo que puede reducir significativamente los costes asociados con el ciclo de vida del producto. (Siemens, 2019)

2.12.3. Software CAM.

La fabricación asistida por ordenador, también conocida por las siglas en inglés CAM

(computer-aided manufacturing), implica el uso de computadores y tecnología de cómputo para ayudar en la fase directa de manufactura de un producto, es un puente entre el Diseño Asistido por Computadora CAD y el lenguaje de programación de las máquinas herramientas con una intervención mínima del operario. Debido a sus ventajas, se suele combinar el diseño y la fabricación asistidos por computadora en los sistemas CAD/CAM. (Información CAD/CAM, 2016)

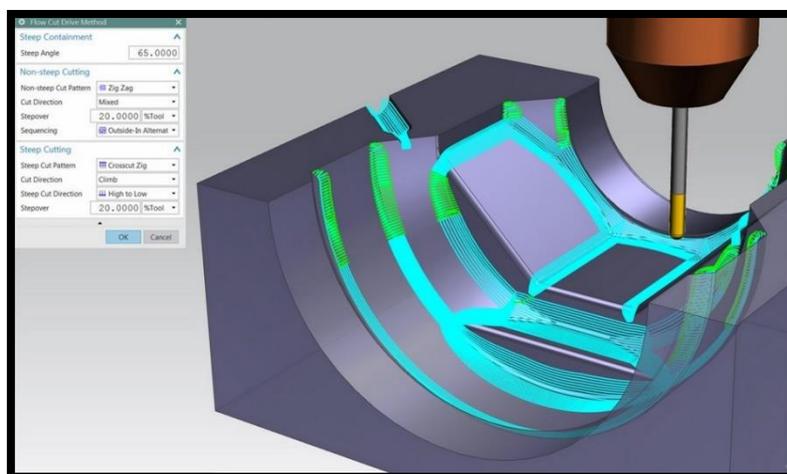


Figura No. 44. Fabricación asistida por computadora.

Fuente: (Información CAD/CAM, 2016)

a) **Software CAM y su empleo en las máquinas de control numérico (CNC).**

El software CAM es el encargado de generar el código o líneas de comandos que son interpretados por la máquina de control numérico o CNC para realizar los procesos de manufactura programados, utilizando las distintas herramientas que estas disponen. Las máquinas CNC incluyen:

- Fresadoras.

- Tornos.
- Grabadoras.
- Lijadoras de superficies.
- Soldadoras.
- Electroerosión o manufactura por descarga eléctrica. (Leão, 2017)

CAM provee instrucciones paso a paso para las máquinas herramienta, de manera que se complete la fabricación del producto. Antes de CAM, un maquinista tenía que capturar las instrucciones en el código antes de implementar el programa. Esta introducción manual podía ser muy laboriosa, dependiendo de la complejidad del producto final. CAM simplificó el proceso gracias a la incorporación de un programa inteligente que desarrollara el código basado en la plataforma de interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés). (Leão, 2017)

Todas las máquinas CNC poseen códigos de funciones misceláneas o secundarias, estas funciones son identificadas por una letra M acompañada de un número, estas funciones complementan el proceso de manufactura, la selección de herramienta, giro de la herramienta, detención del husillo y uso del refrigerante, etc. En la siguiente tabla se observa todas las funciones con sus respectivos códigos.

Tabla No. 6.

Datos recolectados del listado de funciones "M":

Código	Función
M00	Parada del programa
M02	Parada del programa con vuelta la inicio
M03	Giro del husillo en sentido horario
M04	Giro del husillo en sentido anti horario
M05	Parada del husillo
M08	Refrigeración exterior
M09	Desconexión Refrigerante Exterior
M10	Activar sonda de palpado

M11	Desactivar sonda de palpado
M1	Posición de cambio de herramientas en Z
M13	M03+M08
M14	M04+M08
M15	Soltar herramientas
M16	Atar herramienta
M17	Conexión de salida disponible
M18	Desconexión salida disponible
M19	Orientación del husillo mediante ciclo 13 orientación
M30	Final de programa
M50	Almacén adelante
M51	Almacén atrás
M52	Posición de giro almacén en el eje Z
M77	Activación de parámetros para sistema Palpado

Fuente : (ANAYAK)

CAPÍTULO III

3. CÁLCULOS DE ESFUERZOS SOMETIDOS AL PISTÓN

El pistón siendo uno de los elementos más importantes del tren alternativo, es sometido a esfuerzos y a altas temperaturas en los ciclos de trabajo dentro del motor, por lo que el cálculo de estos parámetros es de suma importancia para el análisis del comportamiento del pistón en la simulación en el software CAE.

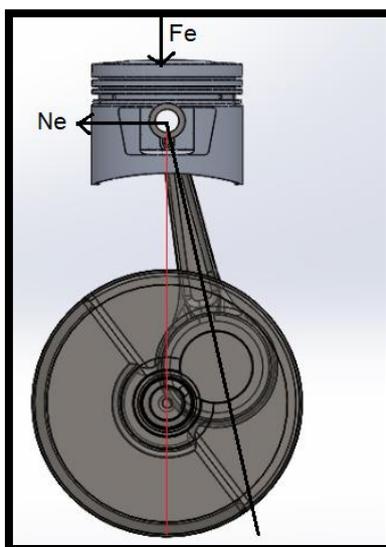


Figura No. 45. Fuerzas que actúan en el pistón.

3.1. Datos obtenidos de la Motocicleta.

La motocicleta carece de una ficha técnica de su motor, por lo que es necesario obtener ciertos datos de manera directa con herramientas de medición; realizando un despiece del motor se podrá obtener valores necesarios para los cálculos, tales como: la carrera, diámetro del pistón

y el volumen de la cámara de combustión.

3.1.1. Medición de la cámara de combustión.

Para obtener el valor de la cámara de combustión se procede a realizar una práctica sencilla pero efectiva; se llena la cámara de combustión con algún líquido, de recomendación aceite, con la ayuda de una jeringa graduada y cuantificar la cantidad de líquido que alberga la cámara, de esta forma se llega a conocer el volumen de la misma.



Figura No. 46. Medición del volumen de la cámara.

El volumen que se obtuvo de la medición de la cámara fue de **19.56 cm³**.

3.1.2. Medición del diámetro del pistón.

Se debe considerar que el pistón no es un elemento totalmente cilíndrico, este es ovalado o cónico, lo que significa que no tiene un diámetro específico, pero para el cálculo se toma la medida del diámetro de la cabeza del pistón.



Figura No. 47. Medición del diámetro de cabeza del pistón.

La medida que se obtuvo del pistón fue de **61.30 mm o 6.13cm**

3.1.3. Medición de la carrera del pistón.

La carrera del pistón es uno de los datos que también pueden ser medidos, con la ayuda de un calibrador pie de rey se realiza la medición de la distancia recorrida hacia abajo del pistón en el PMI.



Figura No. 48. Medición de la carrera del pistón.

La medida obtenida fue de **49.4 mm o 4.94cm**.

Con los datos medidos se puede proceder a realizar los cálculos básicos para un motor, cálculos de esfuerzos y de temperaturas para todos los ciclos de trabajado.

- Diámetro del Pistón = 61.30 mm → 6.13cm
- Carrera = 49.4 mm → 4.94cm
- Volumen de la cámara = 19.56 cm³

3.2. Cilindrada unitaria.

Para la resolución de los cálculos es necesario conocer la cilindrada real del motor, ya que el valor dado por la ficha técnica es un valor aproximado:

$$Vh = \frac{\pi\phi^2S}{4}$$

Ecuación 2. Cilindrada unitaria

Donde:

Vh =Cilindrada unitaria (cm³).

ϕ =Diámetro del pistón (cm).

S = Carrera del pistón (cm).

Remplazando los datos se tiene:

$$Vh = \frac{\pi(6.13cm)^2(4.94cm)}{4}$$

$$Vh = 145.79 \text{ cm}^3$$

3.3. Cilindrada total.

En un motor mono cilindro la cilindrada total es equivalente a la cilindrada unitaria.

$$VH = n * Vh$$

Ecuación 3. Cilindrada total

Donde:

n =Número de cilindros.

Vh =Cilindrada unitaria (cm^3).

Remplazando los datos se tiene:

$$VH = 1 * 145.79\text{cm}^3$$

$$VH = 145.79 \text{ cm}^3$$

3.4. Relación de compresión.

Es la relación volumétrica del volumen de la cámara de combustión contenida en el cilindro.

$$\varepsilon = \frac{Vh + Vc}{Vc}$$

Ecuación 4. Volumen de la cámara

Donde:

ε =Relación de compresión (adimensional).

V_c =Volumen de la cámara (cm^3).

V_h =Cilindrada unitaria (cm^3).

Remplazando los datos se tiene:

$$\varepsilon = \frac{(145.79 \text{ cm}^3) + (19.56 \text{ cm}^3)}{19.56 \text{ cm}^3}$$

$$\varepsilon = \mathbf{8.45}$$

Por lo tanto, el motor de la motocicleta tiene una relación de compresión de **8.45:1**.

3.5. Volumen total del cilindro.

Es el volumen de la cámara de combustión sumado el volumen del cilindro.

$$V_a = V_c + V_h$$

Ecuación 5. Volumen total de los cilindros.

Donde:

V_a =Volumen total de los cilindros (cm^3)

Remplazando los datos se tiene:

$$V_a = 19.56 \text{ cm}^3 + 145.79 \text{ cm}^3$$

$$\mathbf{V_a = 165,35 \text{ cm}^3}$$

3.6. Área del pistón.

Es la superficie en donde actúa la fuerza de explosión.

$$A = \frac{\pi\phi^2}{4}$$

Ecuación 6. Área del pistón.

Donde:

A = Área del pistón (cm^2).

Remplazando los datos se tiene:

$$A = \frac{\pi(6.13cm)^2}{4}$$

$$A = 29.51 cm^2$$

3.7. Presión de admisión.

El motor mono cilíndrico es atmosférico, por lo cual la presión del medio ambiente es semejante a la presión de admisión en este caso se consideró la presión atmosférica de Quito, donde se realizarán las pruebas dinamométricas.

$$P_a = P_0 - (\beta^2 + \xi) \frac{wad^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}$$

Ecuación 7. Presión de admisión.

Donde:

P_a = Presión de admisión (MPa).

P_0 = Presión inicial (Pa).

β = Coeficiente de amortiguación de la velocidad de la sección examinada del cilindro (adimensional).

ξ = Coeficiente de resistencia del sistema de admisión referida a su sección más estrecha (adimensional).

wad = La velocidad del aire en la entrada del sistema de admisión (m/s).

ρ_0 = Densidad de la carga de admisión (kg/m^3).

Siendo:

$P_0 = 1016hPa$ ($101600Pa$), valor promedio tomado de la figura 49 que corresponde el peso del aire sobre unidad de superficie a nivel de la ciudad de Quito.

Hora	Predicción	Viento	Precipitaciones	Nubes	Prob. tormenta	Humedad relativa	Presión
07.00 h	 16°	↓ 5 km/h	0,1 mm	99%	0%	87%	1020 hPa
08.00 h	 14°	↓ 5 km/h	0,1 mm	99%	0%	82%	1020 hPa
09.00 h	 13°	↓ 5 km/h	0,1 mm	99%	0%	77%	1020 hPa
10.00 h	 11°	↓ 6 km/h	0,1 mm	100%	0%	72%	1020 hPa
11.00 h	 13°	↓ 6 km/h	0,1 mm	99%	0%	69%	1019 hPa
12.00 h	 15°	↓ 7 km/h	0,1 mm	99%	0%	67%	1017 hPa
13.00 h	 18°	↓ 8 km/h	0,1 mm	99%	0%	65%	1016 hPa
14.00 h	 18°	↓ 7 km/h	0,1 mm	97%	0%	66%	1015 hPa

Figura No. 49. Datos de la temperatura y la presión atmosférica.

Fuente: (Foreca, 2018)

La densidad de la carga en la admisión está determinada por:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}$$

Ecuación 8. Densidad de la carga en la admisión.

Donde:

T_0 =Es la temperatura inicial, la cual es 21°C (294.15°K) .Temperatura ambiente asumida.

R = Constante universal de los gases ($286.9 \frac{\text{N.m}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}}$).

Remplazando los datos se tiene:

$$\rho_0 = \frac{101600 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]}{286.9 \frac{\text{N.m}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K}} (294.15^\circ\text{K})}$$

$$\rho_0 = 1.20 \text{ kg/cm}^3$$

“Según datos experimentales obtenidos al investigar motores de automóviles, para la apertura completa de la válvula en el régimen nominal, la velocidad de movimiento de la carga en la sección de paso es igual a 50 - 30 m/s”. (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

(Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982) determina una gráfica para determinar la velocidad del aire en la entrada del sistema de admisión (wad) que abarca hasta motores de 3000 cm^3 , con lo cual gracias a una interpolación en 150 cm^3 correspondiente a la cilindrada de la motocicleta se podrá determinar el wad para este cilindraje.

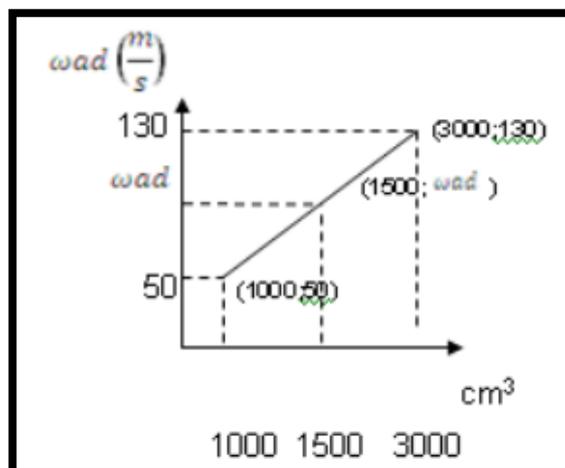


Figura No. 50. Velocidad del aire en la entrada de la admisión.

Fuente: (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

$$m = \frac{y - y_1}{x - x_1}$$

Ecuación 9. Pendiente de una recta

Reemplazando los puntos en la Ec.9 tenemos:

$$m = \frac{50 - 130}{1000 - 3000} = \frac{1}{25}$$

$$(y - y_1) = m(x - x_1)$$

Ecuación 10. Recta punto pendiente

Reemplazando en la Ec. 10 tenemos:

$$(y - 50) = \frac{1}{25}(x - 1000)$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{x + 250}{25}$$

Ecuación 11. Velocidad del aire en la entrada del sistema de admisión.

Donde:

$$x = \text{cilindrada total (cm}^3\text{)}.$$

$$y = wad \text{ (m/s)}.$$

Remplazando los datos se tiene:

$$wad = \frac{150\text{cm}^3 + 250}{25}$$

$$wad = 16 \text{ (m/s)}$$

“Según datos experimentales obtenidos al investigar motores de automóviles, para la apertura completa de la válvula en el régimen nominal, la velocidad de movimiento de la carga en la sección de paso es $\beta^2 + \xi = 2.5$ a 4 m/s”. (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

De acuerdo a la figura 51 se determina la velocidad de apertura de la válvula de admisión hasta cilindradas de 3000 cm^3 con lo cual gracias a una interpolación en 150 cm^3 correspondiente a la cilindrada de la motocicleta se podrá determinar este coeficiente para este cilindraje.

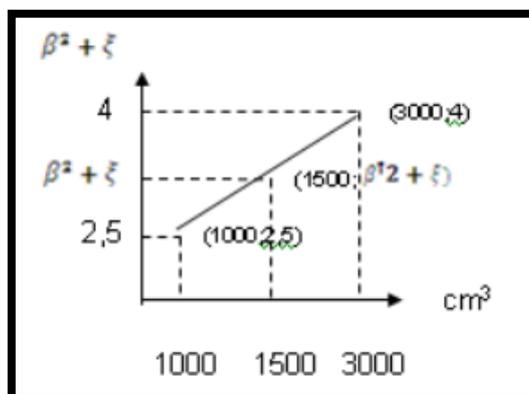


Figura No. 51. Velocidad de apertura de la válvula de admisión.

Fuente: (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

Ecuación de la pendiente de una recta $m = \frac{y-y_1}{x-x_1}$

Reemplazando los puntos en la Ec.9 se tiene:

$$m = \frac{2.5 - 4}{1000 - 3000} = \frac{3}{4000}$$

Ecuación de la recta punto pendiente $(y - y_1) = m(x - x_1)$.

Reemplazando en la Ec. 10 se tiene:

$$(y - 4) = \frac{3}{4000}(x - 3000)$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{3x + 7000}{4000}$$

Ecuación 12. Constante ($\beta^2 + \xi$).

Donde:

$$x = \text{cilindrada total (cm}^3\text{)}.$$

$$y = \beta^2 + \xi.$$

Reemplazando los datos se tiene:

$$\beta^2 + \xi = \frac{3(150 \text{ cm}^3) + 7000}{4000}$$

$$\beta^2 + \xi = 1.86$$

Reemplazando todos los datos en la Ec. 7 se tiene:

$$P_a = P_0 - (\beta^2 + \xi) \frac{w a d^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}$$

Ecuación 13. Presión de admisión.

$$P_a = \left[101600 \frac{kg \frac{m}{s^2}}{m^2} \right] - (1.86) \frac{\left[16 \frac{m}{s} \right]^2}{2} \left[1.20 \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 10^{-6}$$

$$P_a = 101599.99 \quad Pa$$

$$P_a = 0.10 \text{ MPa}$$

3.8. Temperatura de admisión.

El pistón desciende desde el punto muerto superior (PMS) hacia el punto muerto inferior (PMI), abriendo la válvula de admisión ingresando la mezcla aire combustible a una temperatura semejante al del medio ambiente.

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + Y_r T_r}{1 + Y_r}$$

Ecuación 14. Temperatura de admisión.

Donde:

T_a = Temperatura en el ciclo de admisión (°K).

T_0 = Temperatura inicial (°K).

ΔT = Incremento de temperatura en el proceso de calentamiento de la carga (°C).

Y_r = Coeficiente de gases residuales (adimensional).

Siendo:

$T_0 = 21^\circ\text{C} \rightarrow (294.15^\circ\text{K})$ Temperatura ambiente asumida.

$$\Delta T = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K}$$

“En los motores a gasolina y a gas sin sobrealimentación, a plena carga $Y_r = 0,06$ a $0,10$ ”,
(Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

De acuerdo a la figura 52 se determina el coeficiente de gases residuales (Y_r) hasta cilindradas de 3000 cm^3 , con lo cual gracias a una interpolación en 150 cm^3 correspondiente a la cilindrada de la motocicleta se podrá determinar este coeficiente para este cilindraje.

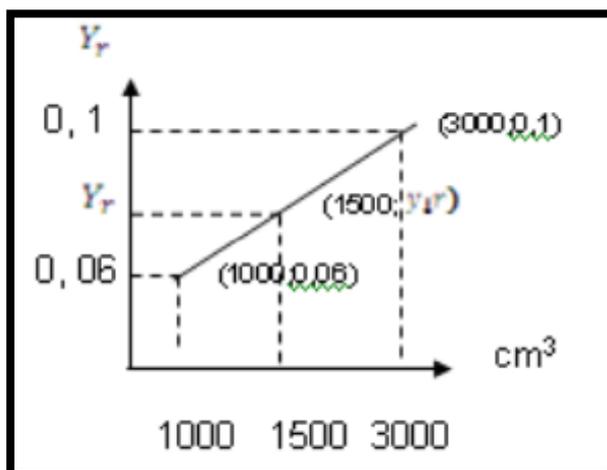


Figura No. 52. Coeficiente de gases residuales Y_r

Fuente: (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

Ecuación de la pendiente de una recta $m = \frac{y-y_1}{x-x_1}$

Remplazando los puntos en la Ec. 9 se tiene:

$$m = \frac{0,06 - 0,1}{1000 - 3000} = \frac{1}{5000}$$

Ecuación de la recta punto pendiente $(y - y_1) = m(x - x_1)$.

Reemplazando en la Ec. 10 se tiene:

$$(y - 0.1) = \frac{1}{50000}(x - 3000)$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{x}{50000} + \frac{1}{25}$$

Ecuación 15. Coeficiente de gases residuales.

Donde:

x = Cilindrada total (cm^3).

$y = Y_r$ = Coeficiente de gases residuales.

Remplazando los datos se tiene:

$$Y_r = \frac{150 \text{ cm}^3}{50000} + \frac{1}{25}$$

$$Y_r = \mathbf{0.04}$$

“Al calcular el coeficiente se puede asumir que la temperatura de los gases residuales en los motores a gasolina es $T_r = 900$ a $1000^\circ K$ ” (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982).

De acuerdo a la figura 53 se determina la temperatura de gases residuales hasta cilindradas de 3000 cm^3 con lo cual gracias a una interpolación en 150 cm^3 correspondiente a la cilindrada de la motocicleta se podrá determinar esta temperatura para este cilindraje.

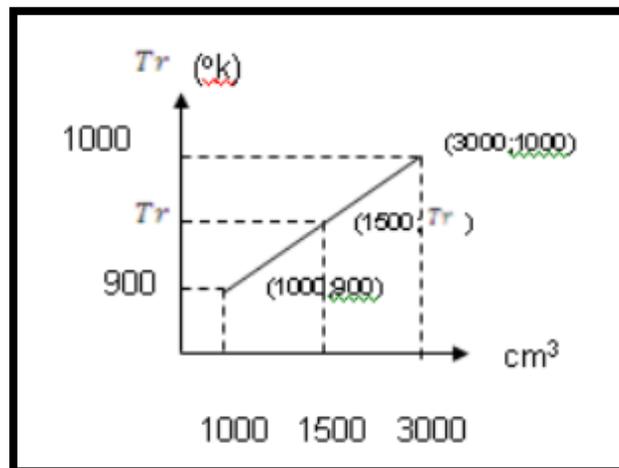


Figura No. 53. Temperatura de gases residuales.

Fuente: (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

Ecuación de la pendiente de una recta $m = \frac{y-y_1}{x-x_1}$

Reemplazando los puntos en la Ec.9 se tiene:

$$m = \frac{900 - 1000}{1000 - 3000} = \frac{1}{20}$$

Ecuación de la recta punto pendiente $(y - y_1) = m(x - x_1)$

Reemplazando en la Ec. 10 se tiene:

$$(y - 900) = \frac{1}{20}(x - 1000)$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{x + 17000}{20}$$

Donde:

x = cilindrada total (cm^3).

$y = Tr$ = Temperatura de gases residuales

Remplazando los datos se tiene:

$$Tr = \frac{150 \text{ cm}^3 + 17000}{20}$$

$$Tr = 857.5 \text{ }^\circ K$$

Remplazando los datos se tiene:

$$Ta = \frac{To + \Delta T + Y_r Tr}{1 + Y_r}$$

$$Ta = \frac{294.15^\circ K + 288 + 0.04(857.5 \text{ }^\circ K)}{1 + 0.04}$$

$$Ta = 592.74 \text{ }^\circ K$$

3.9. Presión de compresión.

Es la presión de la mezcla aire combustible, al terminar el recorrido del pistón del punto muerto inferior (PMI) hacia el punto muerto superior (PMS) comprimiendo la mezcla.

$$P_c = P_a \epsilon^{n1}$$

Ecuación 16. Presión de compresión.

Donde:

P_c = Presión en el ciclo de compresión (MPa).

P_a = Presión en el ciclo de admisión (MPa).

$n1$ = Exponente politrópico medido de compresión (adimensional).

ϵ = Presión de compresión (adimensional).

De acuerdo a la figura 54 se determina el exponente politrópico medido de compresión ($n1$)

hasta cilindradas de 3000 cm^3 con lo cual gracias a una interpolación en 150 cm^3 correspondiente a la cilindrada de la motocicleta se podrá determinar este exponente para este cilindraje.

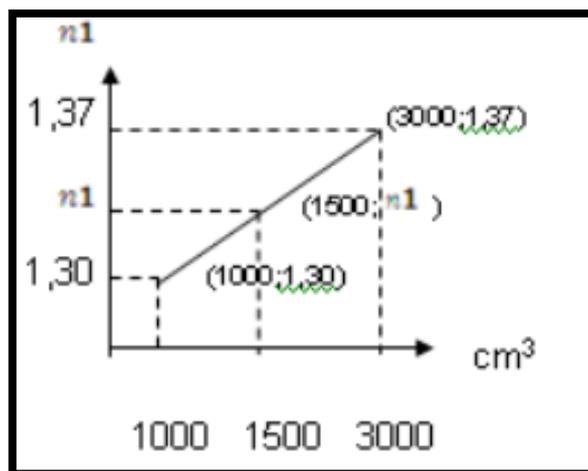


Figura No. 54. Exponente politrópico medio de compresión.

Fuente: (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

Ecuación de la pendiente de una recta $m = \frac{y-y_1}{x-x_1}$

Reemplazando los puntos en la Ec.9 se tiene:

$$m = \frac{1.30 - 1.37}{1000 - 3000} = \frac{7}{200000}$$

Ecuación de la recta punto pendiente $(y - y_1) = m(x - x_1)$

Reemplazando en la Ec. 10 se tiene:

$$(y - 1.30) = \frac{1}{200000}(x - 1000)$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{7x}{200000} + \frac{253}{200}$$

Ecuación 17. Exponente politrópico medido de compresión.

Donde:

x = cilindrada total (cm^3).

$y = n1$ = Exponente politrópico medido de compresión (adimensional).

Remplazando los datos se tiene:

$$n1 = \frac{7(150cm^3)}{200000} + \frac{253}{200}$$

$$n1 = 1.27$$

Remplazando los datos en la ecuación se tiene:

$$Pc = 0.10 MPa \cdot 8.45^{1.27}$$

$$Pc = 1.50 MPa$$

3.10. Temperatura en compresión.

Es la temperatura del segundo ciclo de trabajo de un motor de combustión interna de cuatro tiempos, se considera un proceso adiabático.

$$Tc = Ta * \epsilon^{n1-1}$$

Ecuación 18. Temperatura en compresión.

Donde:

T_c = Temperatura en el ciclo de compresión ($^{\circ}K$)

Así se tiene que:

$$T_c = 592.74 \text{ } ^{\circ}K * 8.45^{1.27-1}$$

$$\mathbf{T_c = 1054.66 \text{ } ^{\circ}K}$$

3.11. Temperatura de explosión.

La chispa de la bujía salta cuando el pistón está en el punto muerto superior (PMS) producto de esta combustión incrementando la temperatura, siendo la mayor de todo el ciclo de trabajo de un motor de combustión interna.

T_z = Temperatura en el ciclo de explosión ($^{\circ}K$).

μ_z = La energía interna de los productos de combustión $\mu_z = 68600 \frac{KJ}{Kmol}$

De acuerdo a la figura 55 mostrada por (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982) se puede determinar la temperatura de combustión con el dato de la energía interna de los productos de combustión (μ_z) en un rango hasta $2400^{\circ}C$ con la ayuda de una interpolación.

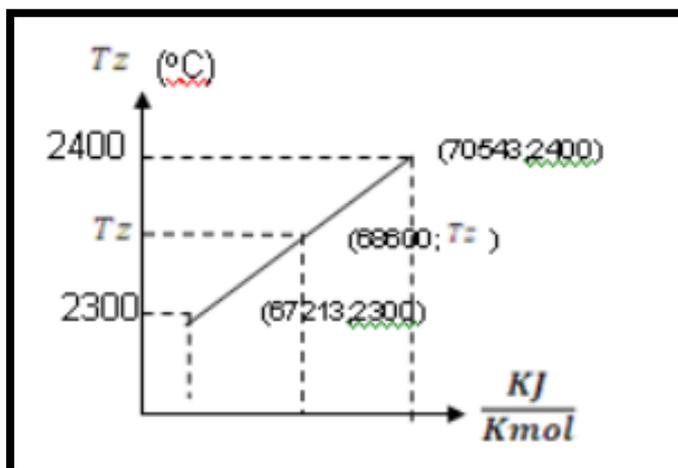


Figura No. 55. Temperatura de combustión.

Fuente: (Jóvaj, Motores de Automóvil, 1982)

Ecuación de la pendiente de una recta $m = \frac{y-y_1}{x-x_1}$

Reemplazando los puntos en la Ec. 9 se tiene:

$$m = \frac{2300 - 2400}{67213 - 70543} = \frac{10}{333}$$

Ecuación de la recta punto pendiente $(y - y_1) = m(x - x_1)$

Reemplazando en la Ec. 10 tiene:

$$(y - 2300) = \frac{10}{333}(x - 67213)$$

Por lo tanto:

$$y = \frac{10x + 93770}{333}$$

Ecuación 19. Temperatura en el ciclo de explosión.

Donde:

$$x = \mu_z = \text{La energía interna de los productos de combustión} = 68600 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}}$$

$$y = T_z = \text{Temperatura en el ciclo de explosión (}^\circ\text{K)}.$$

Remplazando los datos se tiene:

$$T_z = \frac{10(68600 \text{ KJ/Kmol}) + 93770}{333}$$

$$T_z = 2341.67^\circ\text{C} \quad (T_z = 2614.82^\circ\text{K})$$

3.12. Presión en la explosión.

Es la presión máxima de un motor de combustión interna ciclo Otto, con este valor se analizará el comportamiento del pistón sometido a esta presión.

$$P_z = \mu_r \frac{T_z}{T_c} P_c$$

Ecuación 20. Presión en la explosión.

Donde:

$$P_z = \text{Presión en la explosión (MPa)}.$$

$$\mu_r = \text{Coeficiente real de variación molecular (adimensional)}.$$

$$\mu_r = \frac{\mu_o + Y_r}{1 + Y_r}$$

Ecuación 21. Coeficiente real de variación molecular.

Donde:

μ_o =Es el coeficiente teórico de variación molecular.

$\mu_o = 1.08$ (adimensional).

Remplazando valores se tiene:

$$\mu_r = \frac{1.08 + 0.04}{1 + 0.04}$$

$$\mu_r = 1.076 \text{ (Adimensional)}$$

Remplazando en la Ec .19:

$$P_z = 1.076 * \frac{2614.82 \text{ }^\circ K}{1054.66 \text{ }^\circ K} * 1.50 MPa$$

$$P_z = 4.0015 MPa$$

3.13. Fuerza aplicada en la cabeza del pistón (F_e).

Es el esfuerzo que se aplica en el área de la cabeza del pistón, la que servirá para estudios en el software CAE.

$$F_e = P_z \cdot \text{Área}_{\text{pistón}}$$

Ecuación 22. Fuerza en la parte superior del pistón.

En donde:

F_e = Fuerza en la parte superior del pistón (N)

Remplazando los valores en la Ec.22:

$$F_e = 4001500 \frac{N}{m^2} * 0.002951(m^2)$$

$$F_e = 11808.42 \text{ N}$$

3.14. Presión de salida de gases de escape.

Una vez termina la explosión, los gases deben salir del cilindro se abre la válvula de escape y el pistón se desplaza desde el punto muerto interior (PMI) hacia el punto muerto superior (PMS) saliendo los gases productos de la combustión.

$$P_z = \frac{P_b}{\xi^{n2}}$$

Ecuación 23. Presión de escape.

Donde:

P_z : Presión de explosión (4.0015 MPa).

P_b : Presión de escape (MPa).

$n2$: Exponente politrópico medido de escape (adimensional).

Remplazando valores:

$$P_b = \frac{4.0015 \text{ MPa}}{8.45^{1.28}}$$

$$P_b = \frac{4.0015 \text{ MPa}}{8.45^{1.28}}$$

$$P_b = 0.26 \text{ MPa}$$

3.15. Temperatura de escape.

Es la temperatura de la mezcla aire combustible una vez finalizado el ciclo de explosión.

$$Tb = \frac{Tz}{\xi^{n2-1}}$$

Ecuación 24. Temperatura de escape.

Donde:

Tz : Temperatura de explosión (2614.82 °K).

Tb : Temperatura de escape (°K).

$n2$: Exponente politrópico medido de escape (adimensional).

Reemplazando valores:

$$Tb = \frac{2614.82 \text{ °K}}{8.45^{1.28-1}}$$

$$Tb = 1438.53 \text{ °K} \rightarrow 1165.38 \text{ °C}$$

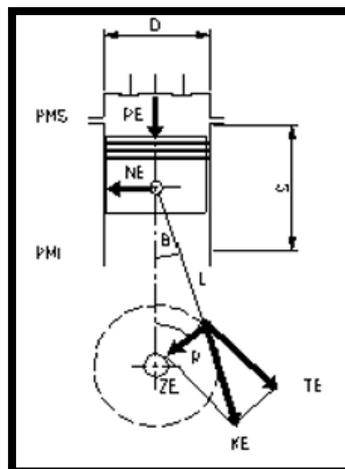


Figura No. 56. Fuerzas que actúan en el tren alternativo.

Fuente: (Imbaquingo Navarrete & Puente Chiluisa, 2011)

3.16. Radio del cigüeñal.

Es la distancia entre centros del muñón de bancada con el muñón de biela y se obtienen mediante la relación con la carrera del pistón.

$$s = 2 * r$$

Ecuación 25. Radio del cigüeñal.

Dónde:

s : Carrera 49.4 mm → 4.94 cm.

r : Radio del cigüeñal.

Remplazando los valores en la Ec 21.:

$$r = \frac{s}{2}$$

$$r = \frac{49.4 \text{ mm}}{2}$$

$$\mathbf{r = 24.7 \text{ mm}}$$

3.17. Lambda (λ).

Es la relación adimensional de la longitud del radio del cigüeñal sobre la distancia entre centros del pie y cabeza de biela.

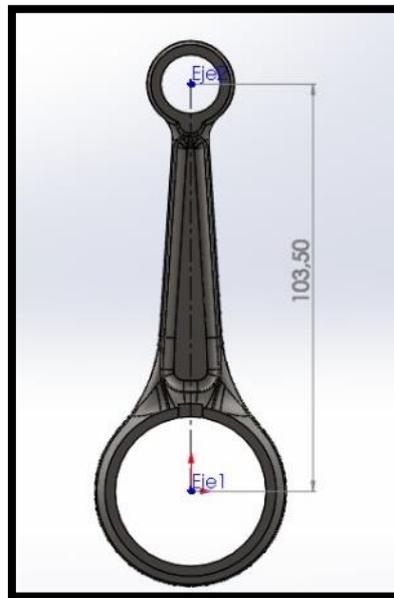


Figura No. 57. Longitud de la biela.

$$\lambda = \frac{R}{L}$$

Ecuación 26. Lambda.

R : Radio de giro del cigüeñal 24.7 mm.

L : Longitud de biela.

Remplazando los valores en la Ec. 22:

$$\lambda = \frac{24.7 \text{ mm}}{103.50 \text{ mm}}$$

$$\lambda = \mathbf{0.238}$$

3.18. Ángulo de biela.

Es la distancia angular entre el eje perpendicular del bulón y la línea de simétrica de la biela.

$$\beta = \sin^{-1}(\sin(a)\lambda)$$

Ecuación 27. Ángulo de biela.

β : Ángulo de Biela.

L : Ángulo del cigüeñal a 60°.

λ : Lambda (0.238).

Remplazando los valores en la Ec. 23:

$$\beta = \sin^{-1}(\sin(60)238)$$

$$\beta = 11.89$$

3.19. Fuerza lateral del pistón.

Es la fuerza que produce el pistón hacia las paredes del cilindro, varía en función de la posición de la biela.

$$N_e = F_e * \tan(\beta)$$

Ecuación 28. Fuerza lateral del pistón.

Donde:

F_e : Fuerza del pistón (11808.42 N).

β : Ángulo de la biela.

N_e : Fuerza lateral del pistón.

Remplazando los valores en la Ec.28:

$$N_e = 11808.42 \text{ N} * \tan(11.89)$$

$$N_e = 2486.27 \text{ N}$$

3.20. Eficiencia del ciclo termodinámico.

El rendimiento térmico en función a la relación de compresión de un motor de combustión interna de ciclo Otto ideal.

$$n_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Ecuación 29. Eficiencia del ciclo termodinámico.

n_t : Rendimiento térmico.

ε : Relación de compresión. (Adimensional).

K : Índice adiabático (Adimensional).

Remplazando valores:

$$n_t = 1 - \frac{1}{8.45^{1.23-1}}$$

$$n_t = 0.38$$

$$\mathbf{n_t = 38 \%}$$

CAPÍTULO IV

4. ENSAYOS Y PRUEBAS

4.1. Ensayo metalográfico del pistón de fábrica.

Los ensayos y pruebas que se realizaron fueron con el objetivo de conocer con qué tipo de aleación de aluminio está construido el pistón de fábrica, para saber su composición química y poder hacer una comparación con sus propiedades con el aluminio 7021.

Este análisis se realizó en los laboratorios de Ingeniería Civil y Mecánica en la Universidad Técnica de Ambato, bajo la supervisión del laboratorista encargado.



Figura No. 58. Instalaciones del laboratorio de ingeniería civil y mecánica.

Para conocer la composición química del material que está construido el pistón de fábrica se elaboró 5 probetas con el siguiente procedimiento.

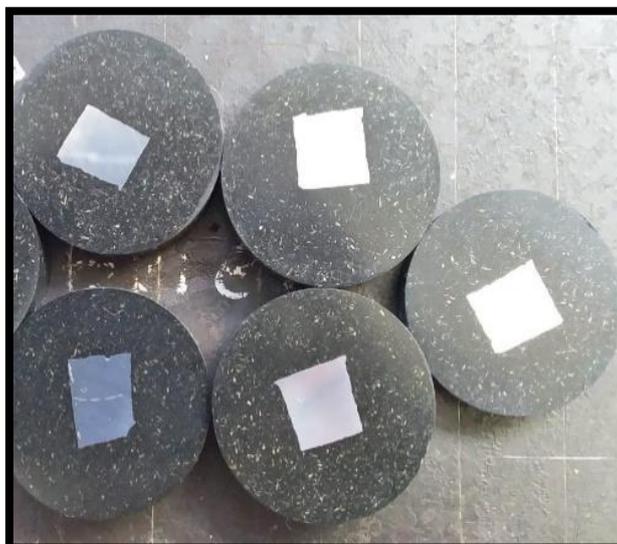


Figura No. 59. Probetas.

4.1.1. Corte del material.

Con ayuda de herramientas de corte se obtuvieron secciones cortadas del pistón con dimensiones establecida de 10 mm de ancho por 10 mm de largo aproximadamente.



Figura No. 60. Corte del material del pistón original.

4.1.2. Composición de la probeta.

La probeta contendrá a la sección de aluminio cortado en una de sus caras, para lograr esto

la probeta se compone en su mayoría de polvo fenólico de baquelita negro, el cual es un polímero sintético termoestable con la particularidad de moldearse a medida que es sometido a calor y presión.



Figura No. 61. Polvo fenólico de baquelita negro.

4.1.3. Compactado de la probeta.

La sección de aluminio y el polvo fenólico de baquelita se colocan dentro de la prensa hidráulica para probetas metalográficas, la probeta debe estar sometida a una presión de 200 bares y una temperatura de 180° durante 5 minutos.



Figura No. 62. Prensa hidráulica para probetas metalográficas.

4.1.4. Lijado de la probeta.

Para este proceso las probetas deben ser lijadas y pulidas en la cara donde se encuentre la sección de aluminio, por lo que se utilizó lijas de grano fino (250, 320), grano extrafino (400,600), grano ultrafino (1500) montadas en un banco de lijas en la cual con la ayuda de agua corriente se debe llegar a dejar la probeta totalmente lisa y sin imperfecciones.



Figura No. 63. Banco de lijas.

4.1.5. Pulido de la probeta.

La probeta debe mostrar su superficie totalmente pulida a modo de espejo, lo cual se logra gracias a una pulidora de paño con el abrasivo Alúmina Alfa de $1\mu\text{m}$.

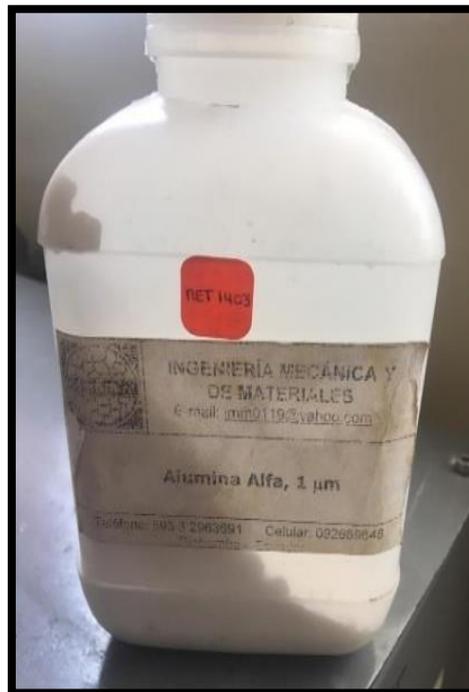


Figura No. 64. Abrasivo alúmina alfa.



Figura No. 65. Pulidora de paño.

4.1.6. Revelado químico.

El Keller ASTM E-407 compuesto de 2 ml (HF) ,3ml (HCL) ,5 ml (HN₃) ,190ml (H₂O) se utilizó como revelador químico durante unos 15 segundos en las probetas, después de este tiempo se procede a limpiar el revelador con agua.



Figura No. 66. Kellers ASTM E-407.

4.1.7. Fotografiado micrográfico.

El microscopio metalográfico de marca **Vanguard** fue utilizado para la obtención de fotografías micro estructurales de las probetas a analizar, con el objetivo de determinar el material del pistón de fábrica.



Figura No. 67. Microscopio metalográfico.

4.1.8 Resultados obtenidos.

El software Clemex Vision utiliza la normativa de la Asociación Americana de ensayos de Materiales ASTM E112-96 que usa métodos de prueba estándar para determinar el tamaño promedio de grano en los materiales.

En las 5 probetas se realizó una fotografía microestructura con un aumento de 40X, 100X, 200X, 400X, con la intención de tener una imagen aumentada para poder identificar las dendritas, eutéctico y fases de la microestructura del aluminio de pistón de fábrica.

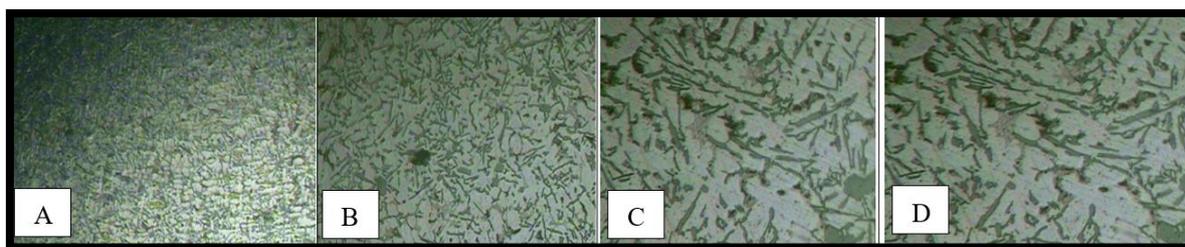
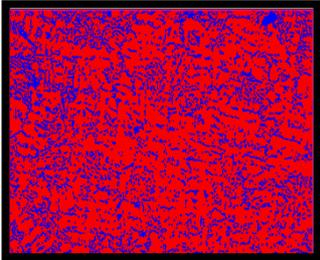
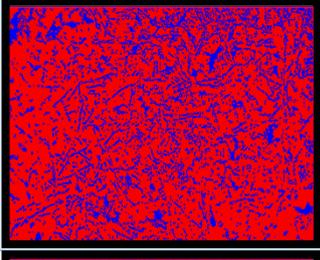
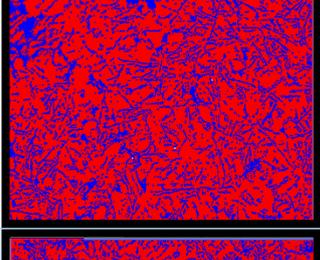
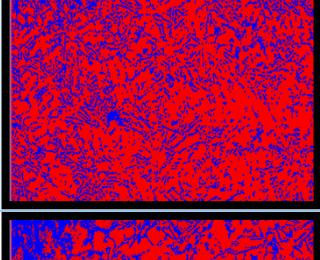
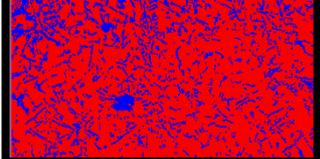


Figura No. 68. Fotografía estructural probeta 3; A: 40X, B: 100X, C: 200X, D: 400X.

En la tabla 7 se detalla los resultados del software Clemex Vision de las 5 probetas, donde se analiza el tamaño de grano y porcentajes de las fases alfa y beta, para determinar las aleaciones del aluminio del pistón de fábrica.

Tabla No. 7.

Grados y porcentajes de la fase alfa y beta en las probetas.

# probeta	Fase α		Fase β		Fotografía software
	Tamaño	%	Tamaño	%	
Probeta 1	10	72.6	12	27.4	
Probeta 2	11	75.4	12	24.6	
Probeta 3	10	72.3	12	27.7	
Probeta 4	11	74.5	12	25.5	
Probeta 5	9	77.6	12	22.4	

En el análisis microestructural se puede identificar partículas alargadas de silicio para las 5 probetas analizadas, se observa además la presencia de cristales de silicio y la presencia de Al_2Cu en la matriz α -Aluminio por lo cual, el material es caracterizado como una aleación Al-Si- Cu.

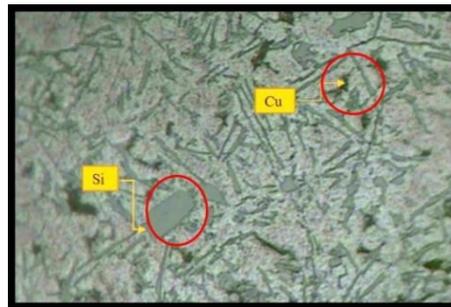


Figura No. 69. Fotografía estructural aleación Al- Si- Cu.

Tabla No. 8.

Designación de las familias de aluminio.

Aluminum $\geq 99.00\%$	1xx
Aluminum alloys grouped by major alloying elements: Copper	2xx.x
Silicon ,with added copper and /or magnesium	3xx.x
Silicon	4xx.x
Magnesium	5xx.x
Zinc	7 xx.x
Tin	8 xx.x
Other elements	9 xx.x
Unused series	6 xx.x

Fuente: (Handbook, 1988)

El material presenta una microestructura constituida por silicio (Si) y cobre (Cu) según la comparación realizada del Metal Handbook, el aluminio caracterizado en la fotografía es un **Aluminio A390**.

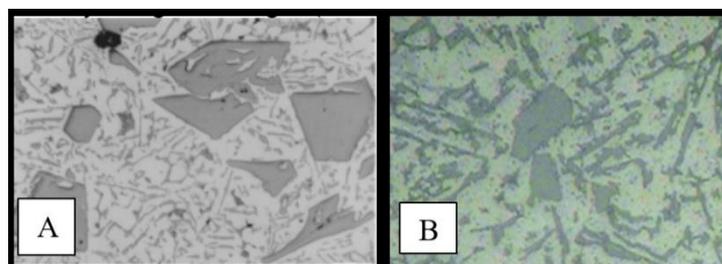


Figura No. 70. A: aleación A390 tomada del Metal Handbook; B: imagen del ensayo metalográfico del pistón de fábrica.

Fuente: (Handbook, 1988)

4.2. Ensayo a la compresión

Para la manufactura del pistón es muy indispensable conocer propiedades mecánicas del material necesarias para cumplir su función, para ello se realizó este ensayo en el pistón de fábrica A390 que nos determinará el límite de resistencia a la compresión utilizando una carga negativa.

4.2.1. Razón de esbeltez

Cuando comprimimos un elemento se puede se pueden presentar dos alternativas, se puede provocar aplastamiento (efecto de compresión) o se puede producir un pandeo (efecto de columna).

$$\rho = \frac{l}{rg}$$

$$\rho < 40 = \text{Compresión}$$

$$\rho > 60 = \text{Columna}$$

Ecuación 30. Razón de esbeltez.

Donde:

ρ = Razón de esbeltez.

rg = Radio de giro.

$l = 51.31 \text{ mm}$ (Longitud del pistón).

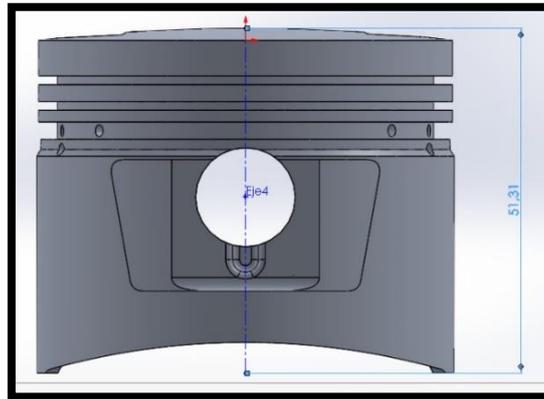


Figura No. 71. Vista frontal pistón dibujado.

$$rg = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Ecuación 31. Radio de giro.

Donde:

I = Momento de inercia de la probeta.

A = Área.

$$I = \frac{\pi * d^4}{64}$$

Ecuación 32. Momento de inercia de la probeta.

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Ecuación 33. Área del pistón.

$d = 61.30$ mm (Diámetro del pistón).

Remplazando en la Ecuación:

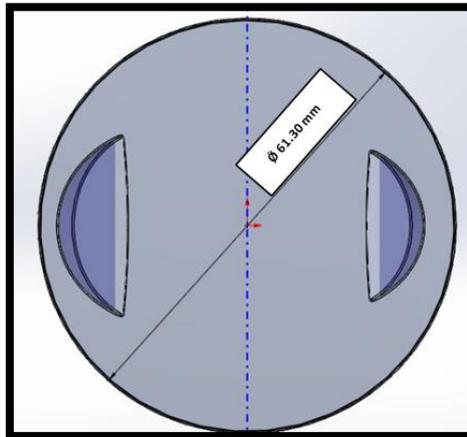


Figura No. 72. Vista superior del pistón dibujado.

$$rg = \sqrt{\frac{\frac{\pi * d^4}{64}}{\frac{\pi * d^2}{4}}}$$

$$rg = \sqrt{\frac{d^2}{16}}$$

$$rg = \frac{d}{4}$$

$$rg = \frac{61.30 \text{ mm}}{4}$$

$$rg = 15.325 \text{ mm}$$

Reemplazando los valores en la ecuación:

$$\rho = \frac{51.31 \text{ mm}}{15.325 \text{ mm}}$$

$$\rho = 3.34$$

Con el valor de $\rho = 3.34$ (Razón de Esbeltez) se determina que nuestro pistón se deformará

en forma de compresión ya que el valor es menor que 40.

4.2.2. Procedimiento del ensayo de compresión.

El ensayo se realizó en el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Técnica de Ambato, con la máquina de ensayo de compresión de la marca **Controls**, con una capacidad de hasta 5000 kN, bajo la supervisión del laboratorista encargado.



Figura No. 73. Máquina de ensayo de compresión marca Controls.



Figura No. 74. Placa de identificación máquina ensayo de compresión.

Se colocó al pistón dentro de la máquina y fue sometido a compresión hasta el punto de fractura, es decir hasta el instante en que el pistón presentó en su estructura deformación y fisuras.



Figura No. 75. Colocación del pistón en las planchas de la máquina.

El pistón fue sometido a una presión de 0 a 20.88 MPa durante un tiempo de 149.8 segundos, hasta el punto de la ruptura, soportando una fuerza total de 62 KN.

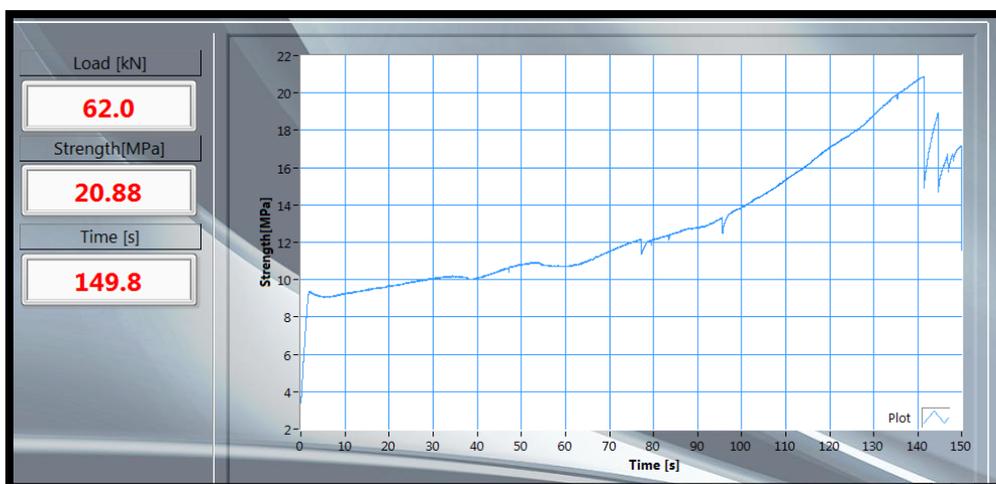


Figura No. 76. Curva fuerza (MPa) vs tiempo(s) módulo de la máquina.

4.2.3. Resultados de ensayo.

En la gráfica generada en el programa, se puede identificar el primer punto de fractura que sucede a los 12 MPa aproximadamente, que es evidentemente superior al esfuerzo calculado que recibe el pistón en el tiempo de explosión el cual es de $P_z = 4.0015 \text{ MPa}$.

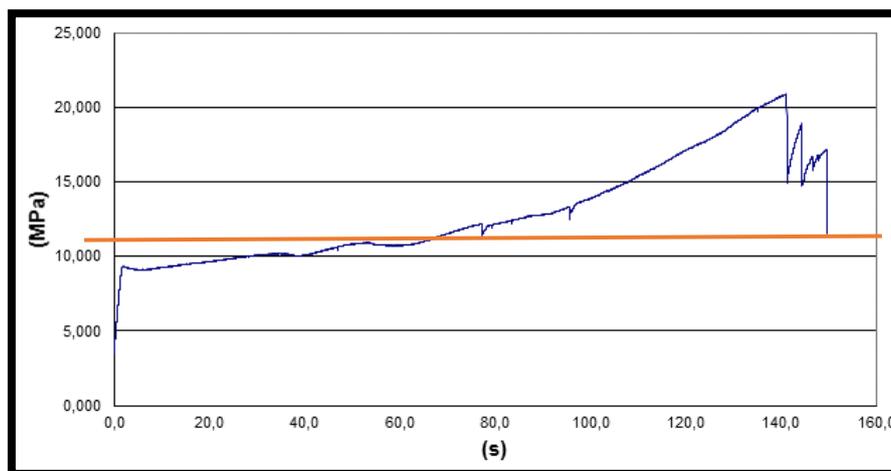


Figura No. 77. Curva fuerza (MPa) vs. tiempo(s) programa Excel.



Figura No. 78. Resultado de la prueba de compresión.

4.3. Proceso de tratamiento térmico del aluminio 7021.

Tratamiento térmico se considera al conjunto de operaciones térmicas a los que son sometidos los metales en estado sólido, sea a calentamiento y posterior enfriamiento, en condiciones supervisadas en las que se controla la temperatura, el tiempo de calentamiento o enfriamiento y la velocidad con la que son tratados, todo esto con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de los metales o acondicionar ciertos materiales a ciclos de trabajo a temperaturas altas, estos tratamientos por lo general son utilizados para mejorar especialmente la elasticidad, dureza y resistencia.

Los tratamientos térmicos recomendados para el aluminio 7021 fueron templado y envejecido, esperando que con estos procesos el pistón a mecanizar en este aluminio se acondicione al ciclo de trabajo dentro del motor de combustión interna.

Estos tratamientos se los realizó en el Centro de Fomento Metalmeccánico y Carrocero en la ciudad de Ambato bajo la supervisión del Ingeniero Esteban López, director de Área de Ensayos e Inspecciones.



Figura No. 79. Laboratorio de ensayos climáticos y tratamientos térmicos

Para este procedimiento fueron utilizadas 8 probetas de aluminio 7021 con, con una dimensión de 10x10x4 mm cada una, de las cuales dos probetas fueron utilizadas como material base y el resto de probetas fueron sometidas a los tratamientos térmicos para posteriormente ser comparadas y observar mejor comportamiento de sus propiedades mecánicas



Figura No. 80. Probetas del aluminio 7021.

4.3.1. Templado.

En este tratamiento se utilizó un horno marca TECNO PIRO modelo METALAR- 120 con un rango de trabajo de 0 a 1200 °C, el cual debe ser curado previo a cualquier tratamiento térmico.



Figura No. 81. Horno de tratamientos térmicos.

El proceso de curado se realiza con el fin de eliminar la humedad absorbido por el ladrillo refractario del interior del horno, ya que esto podría dar lecturas erróneas de temperatura.

Durante este proceso de curado se aprovecha para que el horno estabilice su temperatura y que evitar que durante el tratamiento térmico la temperatura no varíe de forma significativa. Terminado este procedimiento el horno debe enfriarse hasta temperatura ambiente.

Se ingresan las probetas al interior del horno a temperatura ambiente hasta alcanzar los 420 °C y permanecerán a esta temperatura por 90 min.



Figura No. 82. Parámetros del proceso de templado en el programador.

Para este proceso se utilizó agua desmineralizada y aceite SAE 40 como soluciones para el templado, en la cuales 3 de las probetas fueron sumergidas en el agua y 3 en el aceite para poder establecer una comparación en cuál de las dos soluciones se obtiene un mejor resultado.

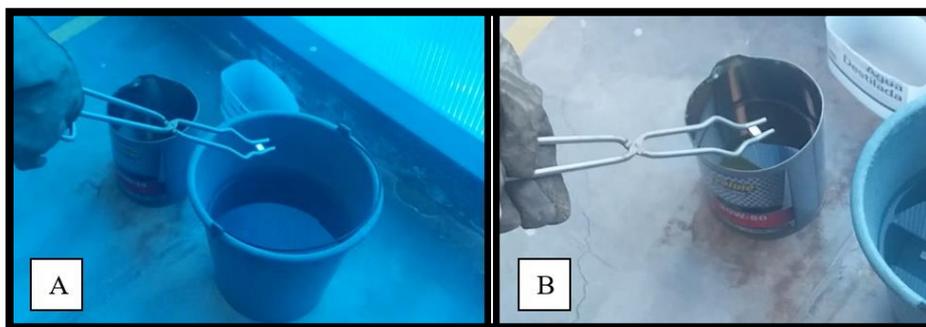


Figura No. 83. A: templado con agua desmineralizada; B: templado con aceite SAE 40.

4.3.2. Envejecido.

Para este tratamiento el horno debe estar a temperatura ambiente, el envejecido se realizará a distintas temperaturas para ver con cuál de estas se obtienen mejores resultados. Terminado cada intervalo, con las distintas temperaturas, las probetas se deben enfriar lentamente hasta llegar a temperatura ambiente.

Para el primer intervalo de temperatura, en el horno se ingresa 4 de las probetas previamente templadas para ser sometidas a una temperatura de 130°C durante un periodo de 300 minutos (5 horas).



Figura No. 84. Parámetros del proceso de envejecido en el programador.

En el segundo intervalo, en el horno se ingresan 2 de las 4 probetas previamente envejecidas a 130°C, pero en esta ocasión son sometidas a una temperatura de 210°C por un periodo de 300 minutos (5 horas).

4.4. Ensayo de dureza del aluminio 7021.

Los ensayos de dureza son realizados para poder determinar la resistencia de un material a ser penetrado o a ser rayado por otro material que sea distinto.

En metales aleados la dureza aumenta al ser sometidos a tratamientos térmicos o por endurecido al ser deformado, esta dureza está relacionada a la conducta del metal al ser sometidos a abrasión, desgaste y a la facilidad de mecanizado.

Las probetas de aluminio previamente tratadas térmicamente fueron sometidas a ensayo de dureza Brinell, por el rango de medición que posee este tipo de dureza. La dureza Brinell es también recomendada para este aluminio por tener tamaño de grano grande o irregular en su estructura.

Estos ensayos se los realizó en el Centro de Fomento Metalmeccánico y Carrocero en la ciudad de Ambato bajo la supervisión del Ingeniero Esteban López, director de Área de Ensayos e Inspecciones bajo la norma NTE INEN ISO 6506-1. Para este ensayo se utilizó un Durómetro digital marca ERNST con capacidad de realizar mediciones de dureza Brinell (HB) y dureza Rockwell (HR). Previo a realizar el ensayo, al durómetro debe comprobarse si esta calibrado realizando mediciones con metales muestra calibradas.



Figura No. 85. Durómetro digital ERNST.

Comprobado la calibración del durómetro, se realizó las respectivas mediciones de las probetas tratadas térmicamente para comprobar sus diferencias entre el antes y después de realizar estos tratamientos.



Figura No. 86. Panel de visualización de datos durómetro digital.

4.5. Pruebas dinamométricas de la motocicleta.

La prueba dinamométrica consiste en medir o determinar la cantidad de potencia generada en caballos de fuerza (HP) y el torque generado por el motor de un vehículo, ya sea automóvil o motocicleta.

Este banco de pruebas llamado dinamómetro está conectado a rodillos en el suelo movidos por las ruedas del vehículo simulando transitar normalmente, los cuales están conectados a sensores que miden la fuerza, potencia, torque y las rpm que el motor entrega a determinada velocidad.

Esta prueba se la realizó en el taller de preparación de vehículos de competencia Dinamyca Competición con un dinamómetro marca Dyno-Max PRO bajo la supervisión de los técnicos responsables del dinamómetro. La motocicleta debe ser anclada de tal manera que la rueda trasera, la cual transfiere la potencia del motor, se ubique sobre el rodillo con la finalidad de que sea movida por la tracción generada por la motocicleta.

Antes de comenzar la prueba el motor debe llegar a su temperatura normal de funcionamiento, el tiempo estimado es de aproximadamente 10 minutos en ralentí para que motor llegue a este estado, en las dos pruebas se utilizó gasolina súper de 92 octanos comercializado en el Ecuador.



Figura No. 87. Anclaje de la motocicleta al dinamómetro.

Configurado el software que recepta las señales del dinamómetro se procede a realizar la prueba haciendo que la motocicleta mueva los rodillos hasta hacer que esta llegue a altas rpm por un cierto tiempo hasta que se obtenga en pantalla el torque y potencia máximos.



Figura No. 88. Prueba dinamométrica en acción.

Esta prueba se la realizará con la motocicleta funcionando con el pistón de fábrica y con el pistón de aluminio 7021 manufacturado bajo las mismas condiciones, para poder analizar sus resultados y comparar el desempeño entre ambos.

CAPÍTULO V

5. CONSTRUCCIÓN DEL PISTÓN EN ALUMINIO 7021.

5.1. Modelado en el software CAD.

El modelado es un procedimiento que, con la ayuda de un software CAD, es posible el diseño, construcción y análisis de elementos para la ingeniería, dentro de un ambiente virtual, el cual ayuda a tener una visualización previa a la construcción de dichos elementos. Para el análisis del comportamiento del pistón en el programa CAE es necesario realizar el modelado completo del tren alternativo, es decir pistón, biela, y cigüeñal. Al ser el pistón el elemento de análisis de este estudio, se detallará el procedimiento del modelado solo de este.

5.1.1. Modelado del pistón.

Teniendo en cuenta la geometría del pistón de fábrica se procede a realizar las mediciones necesarias del pistón con ayuda de herramientas de medición exactas, como calibrador pie de rey y micrómetro o calibrador de exteriores.



Figura No. 89. Herramientas de medición utilizadas.

Para comenzar con el modelado, se debe empezar con realizar un croquis inicial en uno de los planos que ofrece el software CAD.

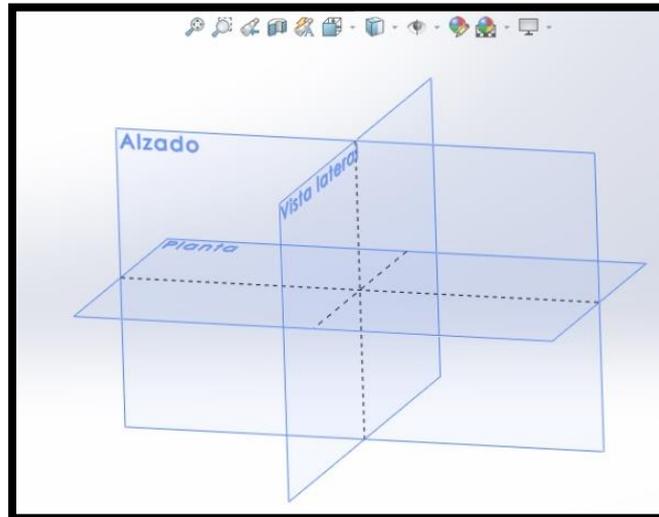


Figura No. 90. Selección de plano para el croquis.

Seleccionado el plano a trabajar, se empieza a realizar los trazos y los bocetos de la geometría del pistón.

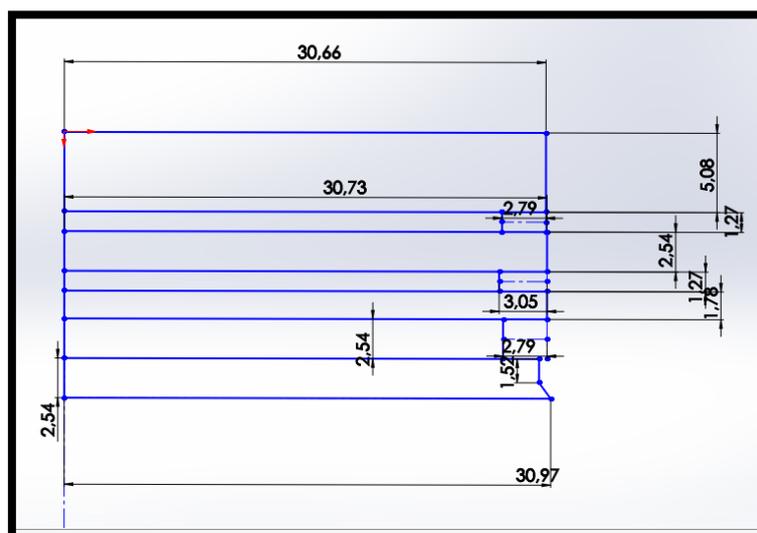


Figura No. 91. Trazado del croquis.

Gracias a las herramientas que ofrece el software se logra crear la forma base del pistón que será manufacturado.

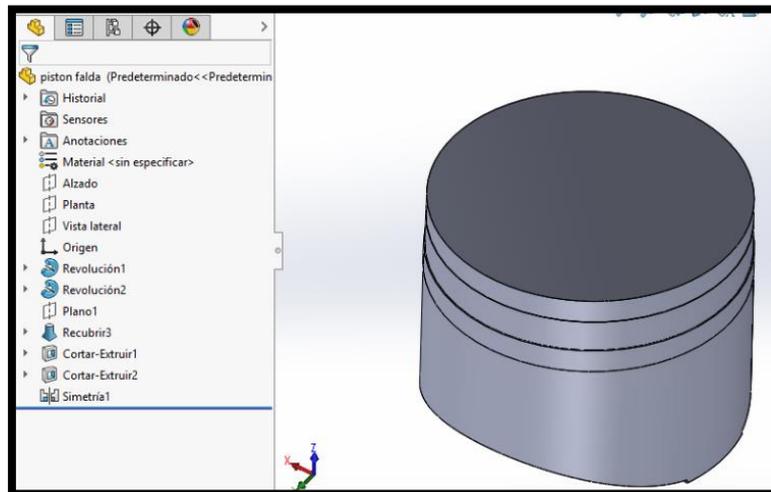


Figura No. 92. Figura base modelada del pistón.

Con el resto de operaciones y opciones que dispone el software, se debe obtener como resultado el modelo digital del pistón que será mecanizado.

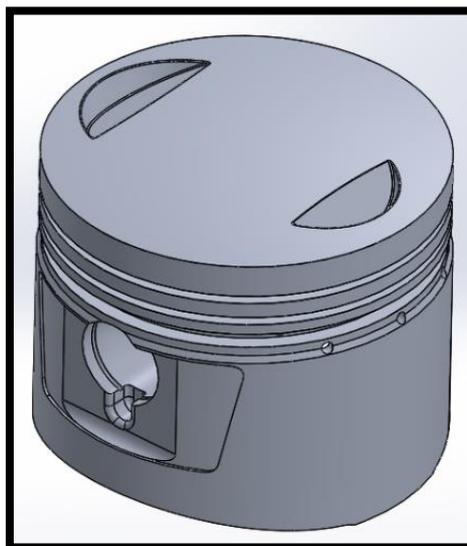


Figura No. 93. Modelado final terminado.

De igual manera es modelado el resto del tren alternativo con las mismas consideraciones de dibujo del pistón, estos elementos solo ayudarán a apreciar el comportamiento del pistón en el análisis CAE.

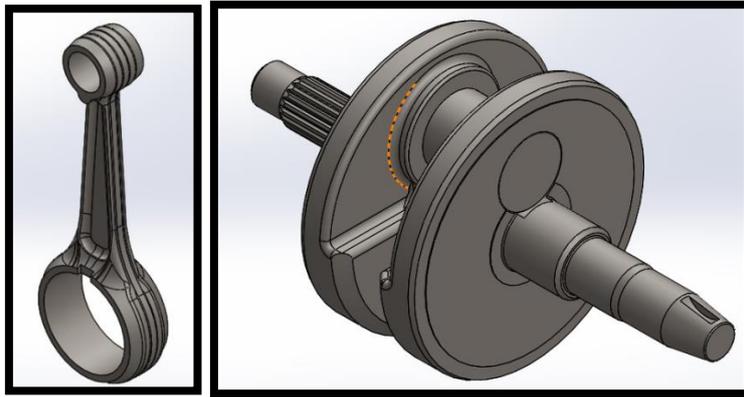


Figura No. 94. Modelado de biela y cigüeñal.

Finalmente, para realizar el análisis se realiza el ensamble de todos los elementos del tren alternativo.

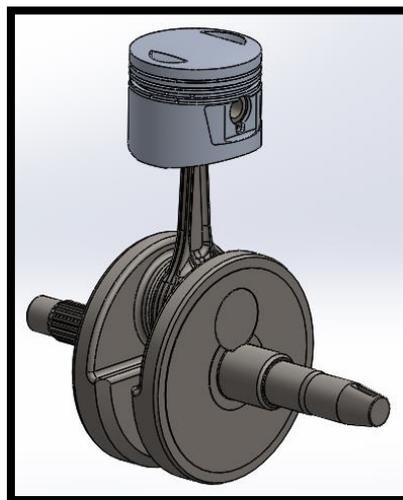


Figura No. 95. Ensamble completo del tren alternativo.

5.1.2. Modificaciones a considerar en el modelado del pistón.

En el modelado se debe considerar que el pistón tiene detalles que la máquina CNC no podrá realizar, por ese motivo hay detalles en el modelado que se deben considerar para que el mecanizado no presente restricciones.

La zona más crítica es el interior del pistón, el cual tiene detalles que la máquina CNC no puede mecanizar, por lo que se debe realizar un rediseño, como se muestra en la figura 96.

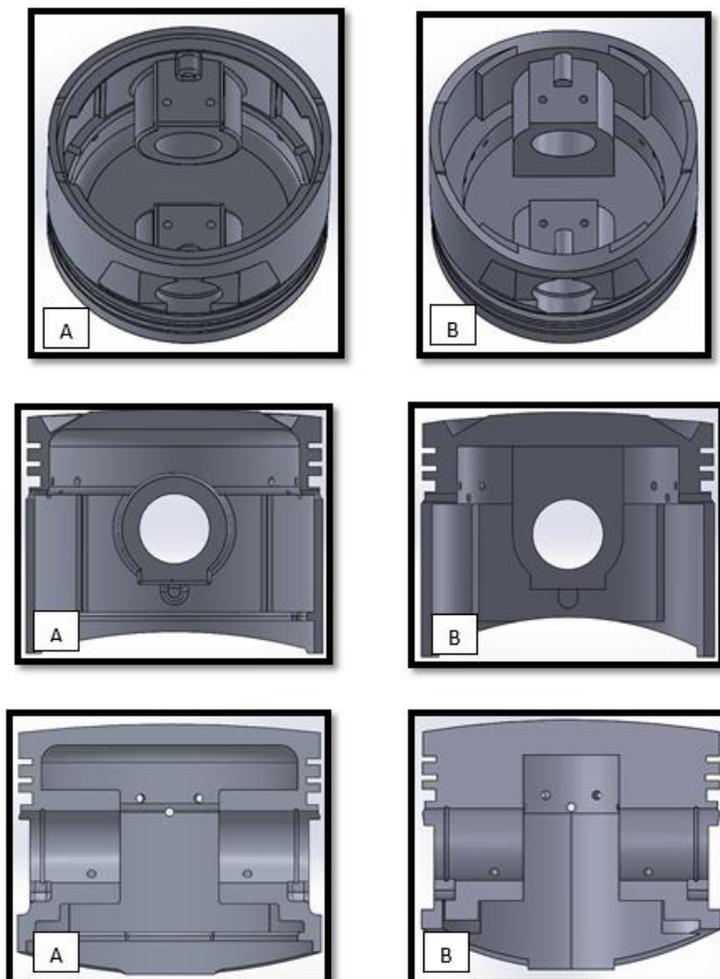


Figura No. 96. Imagen comparativa. A: pistón de fábrica; B: rediseño de pistón.

En las imágenes de la izquierda se aprecia el modelado del pistón de fábrica con los detalles internos los cuales la máquina CNC no puede acceder para su mecanizado, tomando en cuenta estos parámetros, en las imágenes de la derecha se observa el rediseño del interior del pistón el cual si puede mecanizar la máquina CNC.

Al ver que el volumen de material aumenta en el rediseño, ciertas partes de la geometría del pistón se modificaron para aliviarlo.

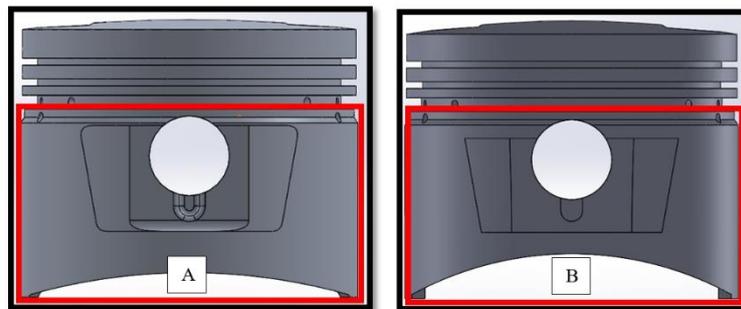


Figura No. 97. Imagen comparativa vista lateral. A: pistón de fábrica; B: rediseño del pistón.

En la figura 97 se observa la falda y los detalles del contorno del eje del bulón del pistón de fábrica, los cuales en la figura de la derecha se observa cómo fueron modificados para lograr rebajar el peso del pistón a mecanizar.

5.2 Análisis en el software CAE.

El análisis con un software CAE es de gran ayuda para realizar análisis dentro de la ingeniería, en los cuales se encuentran el análisis de elementos, la mecánica de fluidos, análisis térmicos, interacción entre componente, presiones y resultados de la aplicación de fuerzas y esfuerzos.

Este tipo de análisis permite estimar de manera muy acertada el comportamiento que tendrán los componentes, modelados y diseñados, en un ambiente real de trabajo realizando un análisis virtual mostrando posibles fallas que se podrían presentar.

Se analizó el comportamiento de los dos pistones modelados, uno con las características de un aluminio 7021 y uno con aluminio A390.

5.2.1. Análisis del pistón de aluminio 7021.

a) Restricciones.

Previo al análisis hay que considerar que el ensamble del tren alternativo debe estar ubicado en el origen ($x :0$, $y :0$, $z :0$) y sus componentes con sus respectivas restricciones.

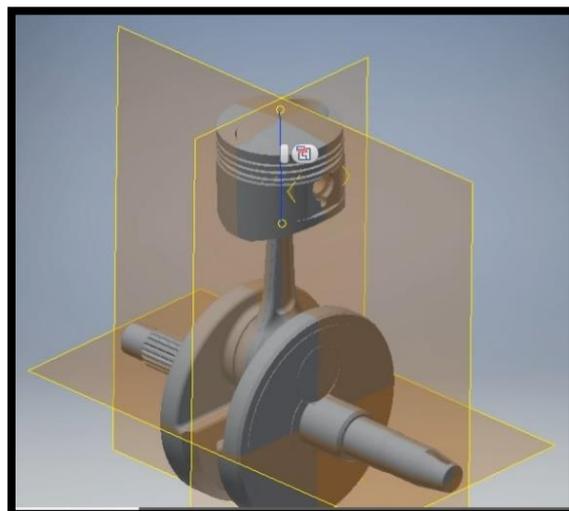


Figura No. 98. Ensamble tren alternativo.

Se configuran las condiciones de desplazamiento del pistón con restricciones,

seleccionando la falda del pistón como referencia con el objetivo que la fuerza aplicada solo involucre al eje de coordenadas (Y) anulando el movimiento en el eje de coordenadas (X) y eje de coordenadas (Z) teniendo el valor de 0, así garantizamos que solo se desplace en el eje de coordenadas (Y).

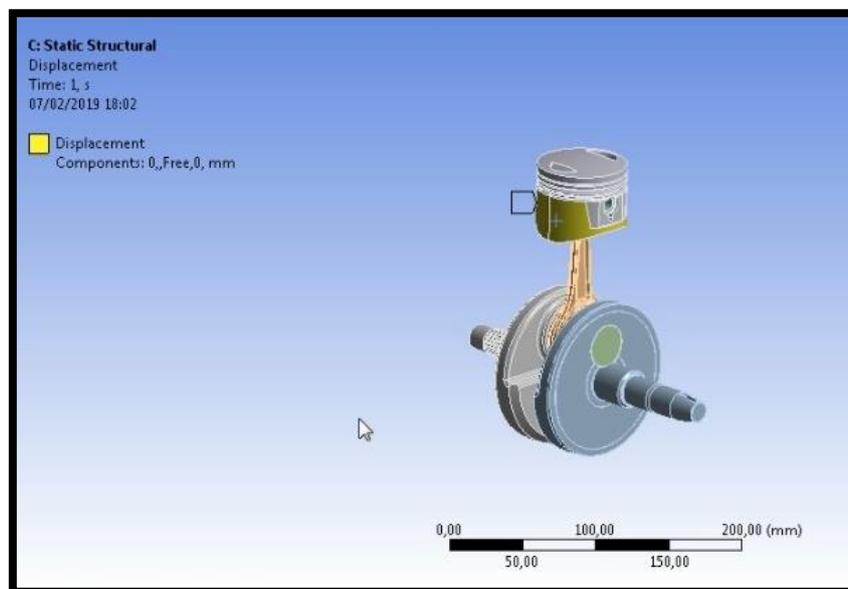


Figura No. 99. Restricción del movimiento del pistón.

Details of "Displacement"	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
Type	Displacement
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input type="checkbox"/> X Component	0, mm (ramped)
Y Component	Free
<input checked="" type="checkbox"/> Z Component	0, mm (ramped)
Suppressed	No

Figura No. 100. Parámetros del movimiento del pistón.

b) Fuerza del pistón.

Para la configuración de la fuerza que recibe el pistón en el tiempo de explosión (F_e) se selecciona el área de la cabeza del pistón y los alojos de las válvulas de admisión y escape ubicando la fuerza como vector con el valor de -11808.42 N en el eje de coordenadas Y con valor negativo ya que ejerce una fuerza de compresión.

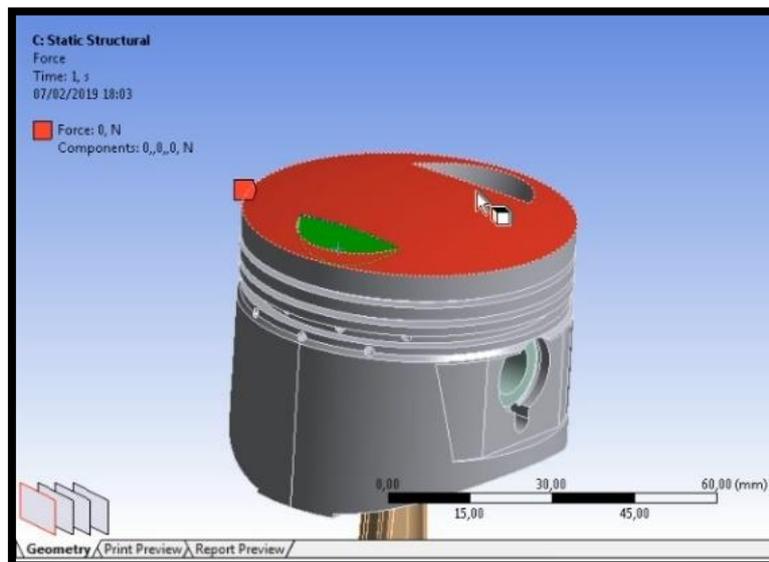


Figura No. 101. Área de contacto de la fuerza del pistón.

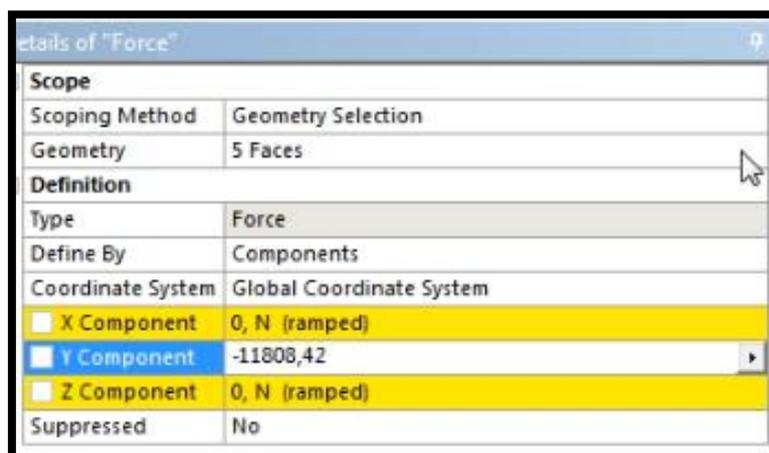


Figura No. 102. Parámetros de la fuerza del pistón.

c) Contactos de los elementos

Para la configuración en las uniones entre los elementos del tren alternativo se eliminan los contactos producidos por el software, para realizarlo manualmente, para este procedimiento se utilizan las siguientes herramientas: **contact** para seleccionar las uniones que se desee y **delete** para suprimirlos.

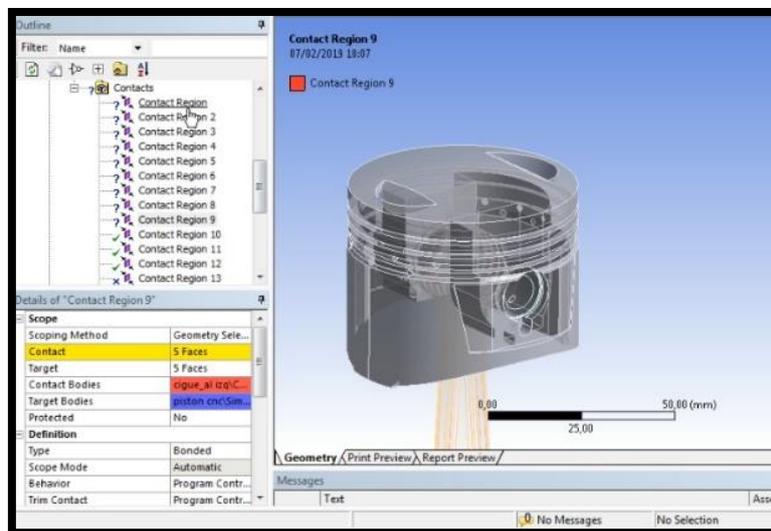


Figura No. 103. Visualización de contactos predeterminados.

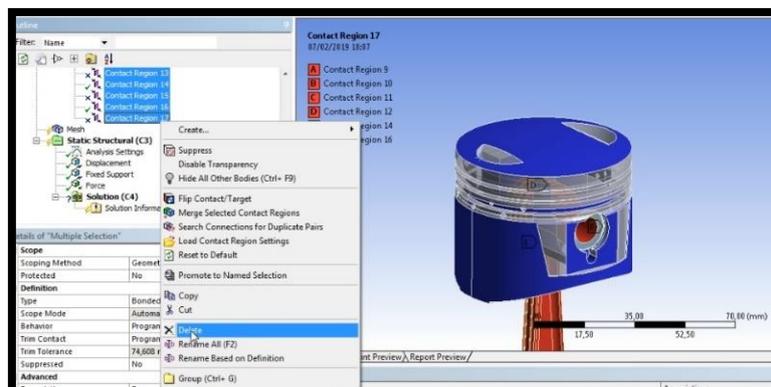


Figura No. 104. Eliminación de contactos predeterminados.

Existen tres contactos en el tren alternativo, los cuales se deben seleccionar considerando el funcionamiento del tren, se utiliza la herramienta *contact* para indicar que se crea un contacto entre entidades y *Contact Toll* para seleccionar el elemento.

El contacto entre el Bulón y Pistón se lo realiza seleccionando la superficie externa del bulón con el alojamiento del bulón en el pistón con la opción *Contact Bonded*.

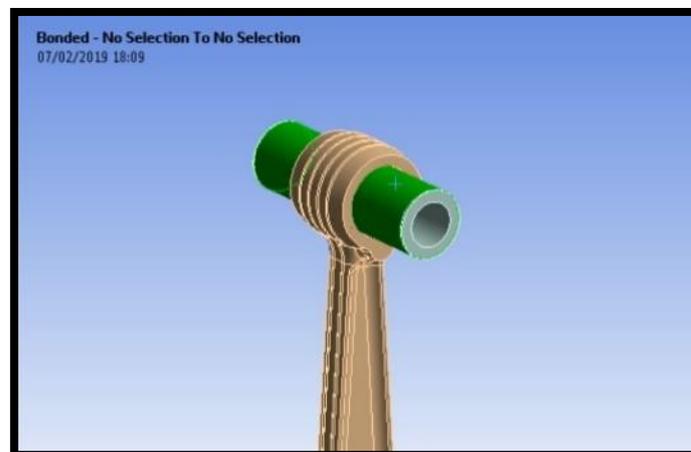


Figura No. 105. Superficie de contacto del bulón.

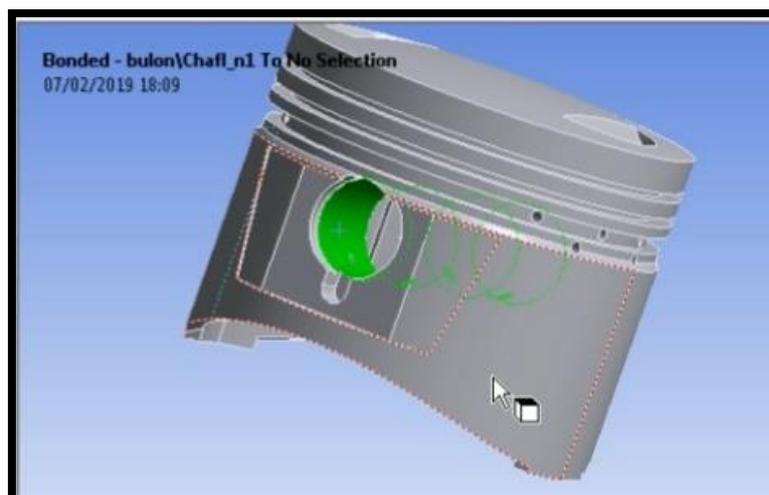


Figura No. 106. Superficie de contacto del pistón.

En la figura 107 se visualiza culminada la operación de contacto entre el bulón y pistón.

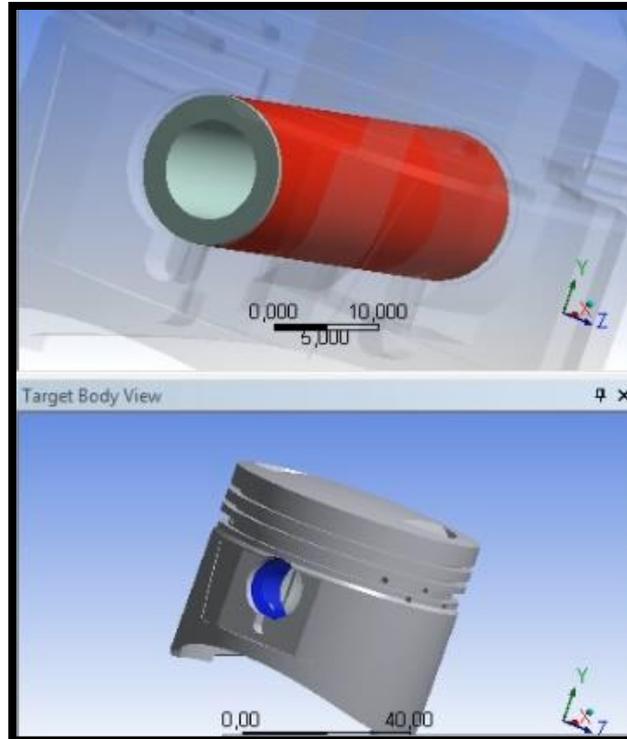


Figura No. 107. Contacto pistón - bulón

El contacto entre el bulón y biela se lo realiza mediante el proceso de selección de la superficie externa del bulón con el cojinete de pie de biela con la opción **Contact Bonded**.



Figura No. 108. Superficie de contacto del bulón.



Figura No. 109. Superficie de contacto pie de biela.

En la figura 110 de aprecia la operación de contacto entre bulón y biela.

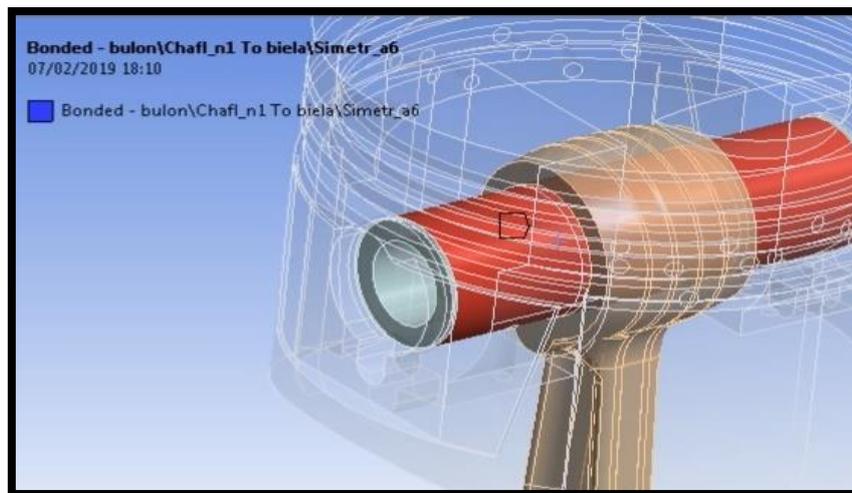


Figura No. 110. Contacto bulón y pie de biela.

El contacto entre el muñón de bancada y muñón de biela se lo realiza seleccionando la superficie externa del muñón de bancada con la interna del muñón de biela, seleccionado la herramienta de *supports* con la opción *cylindrical support*.

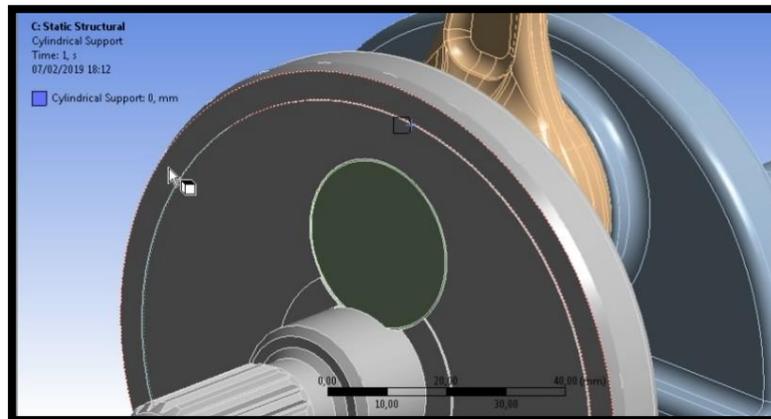


Figura No. 111. Contacto muñón de bancada – muñón de biela.

d) Especificaciones del material aluminio 7021.

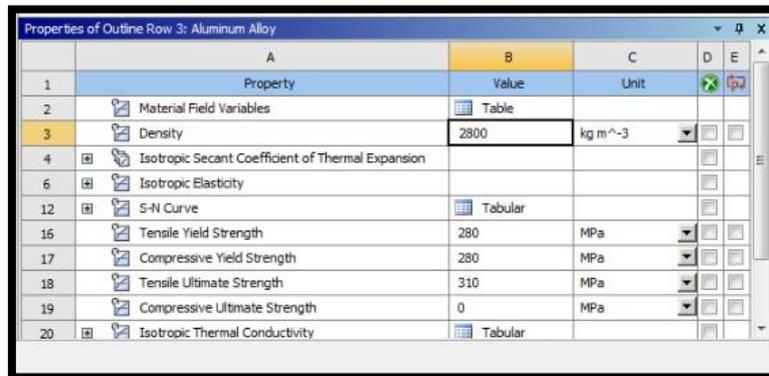
Para establecer las propiedades del material aluminio 7021 se selecciona **Engineering Data Sources**, en donde se especifica los valores a partir de materiales generales de aleaciones de aluminio en la biblioteca, por la razón que los valores de las propiedades de los aluminios oscilan en rangos ya establecidos por aluminios existentes en la industria.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	Aluminum Alloy		Source		General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Structural Steel		Source		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Figura No. 112. Características generales aleaciones de aluminio.

Especificar en la tabla **Properties of outline Row** las características químicas, mecánicas y físicas del aluminio 7021 como la densidad, resistencia máxima a la tracción, módulo de

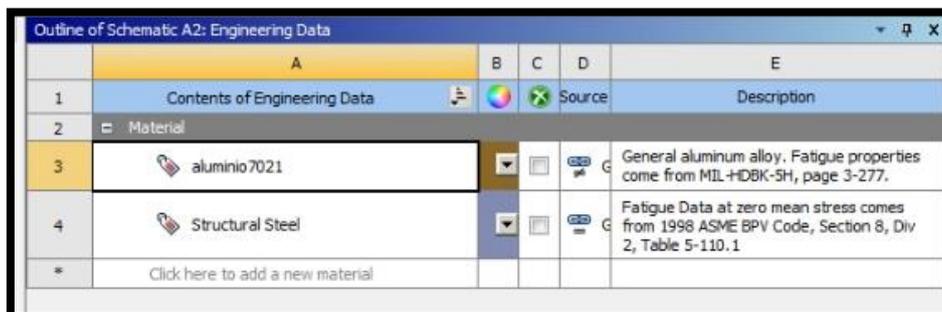
elasticidad, resistencia a la flexión y coeficiente de conductividad térmica, estas características se encuentran en la tabla 3, tabla 4 y tabla 5.



	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2800	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
12	S-N Curve	Tabular			
16	Tensile Yield Strength	280	MPa		
17	Compressive Yield Strength	280	MPa		
18	Tensile Ultimate Strength	310	MPa		
19	Compressive Ultimate Strength	0	MPa		
20	Isotropic Thermal Conductivity	Tabular			

Figura No. 113. Especificaciones de propiedades mecánicas del aluminio 7021.

Para realizar los análisis guardar en **Engineering Data Sources** el nuevo material definido con el nombre de aluminio 7021.



	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data		Source		Description
2	Material				
3	aluminio7021				General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Figura No. 114. Guardado base de datos en el software CAE.

e) Deformaciones direccionales.

La deformación pertenece al grupo de lesiones mecánicas que sucede en el pistón ya que está sometido a cargas externas y efectos térmicos, en este análisis se determina la deformación

en cada uno de los ejes de coordenadas, considerando como punto crítico el ciclo de explosión ya que mediante cálculos matemáticos realizados en el capítulo 3 de este estudio se determinó que el pistón sufre mayor esfuerzo en este ciclo de trabajo.

i. Deformación direccional en el eje X.

El esfuerzo aplicado resultó en una deformación máxima de 0.031 mm en la cabeza del pistón en el eje X de coordenadas, esta deformación se la puede apreciar en la figura 115. En la falda del pistón se aprecia una deformación; de color verde, de 0.003 mm, si se considera que el pistón tiene una tolerancia máxima de funcionamiento de 0.15 mm se puede predecir que no existirá contacto excesivo entre las paredes del cilindro y la falda del pistón.

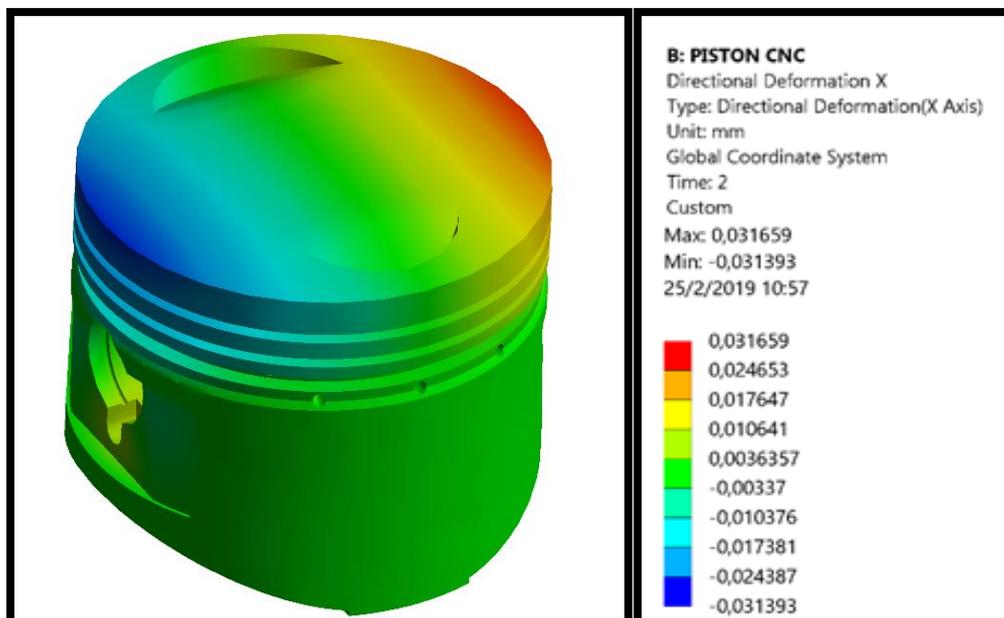


Figura No. 115. Análisis de deformación direccional en el eje X pistón de aluminio 7021.

ii. Deformación direccional en el eje Y.

Como resultado de los esfuerzos aplicados al pistón, en el eje de coordenadas Y se generó una deformación con valor negativo por la razón que estas se encuentran en el 3^{ro} y 4^{to} cuadrante, por lo que se toma como valor absoluto. Al observar el análisis se aprecia una deformación máxima de 0.27 mm en la falda del pistón, en esta zona es mayor la deformación por ser de menor espesor que el resto de regiones del pistón y por ser la encargada de disipar calor, esta deformación se la representada de color azul en la figura 116, otra deformación evidente es de 0.22 mm que está representada de color rojo en la cabeza del pistón, esta no representa mayor análisis, ya que no tiene contacto con otro elemento sólido.

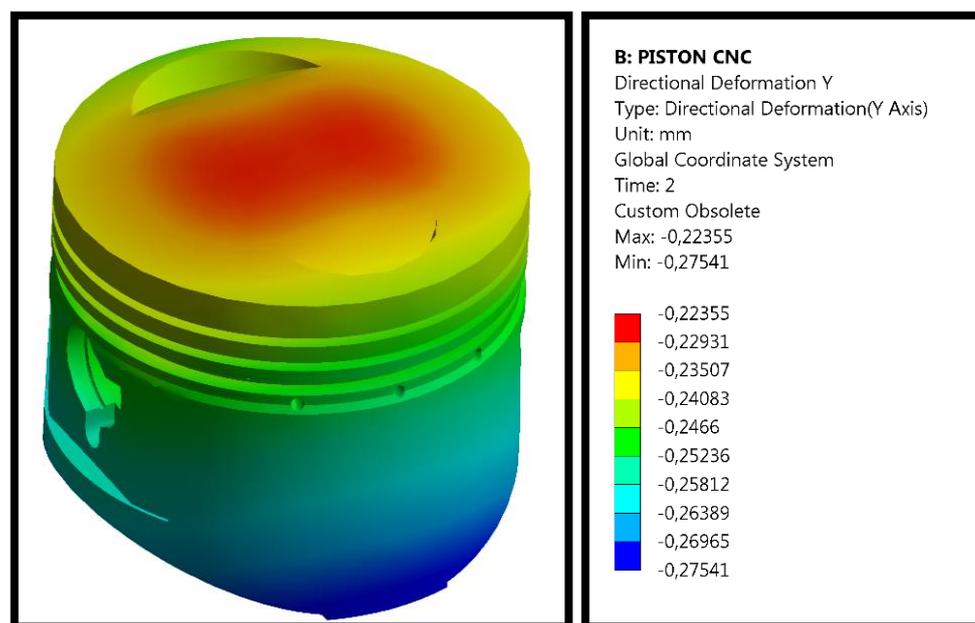


Figura No. 116. Análisis de deformación direccional en el eje Y pistón de aluminio 7021.

iii. Deformación direccional en el eje Z

Lo deformación resultante en el eje de coordenadas Z muestra una deformación máxima de 0.027 mm, que es apreciable en la figura 117. En la falda del pistón se observa una deformación de 0.003 mm de color verde, teniendo en cuenta que la tolerancia de funcionamiento del motor del 0.15mm el espacio es aceptable para la película de aceite entre la falda del pistón y la pared del cilindro evitando el gripado entre estos elementos.

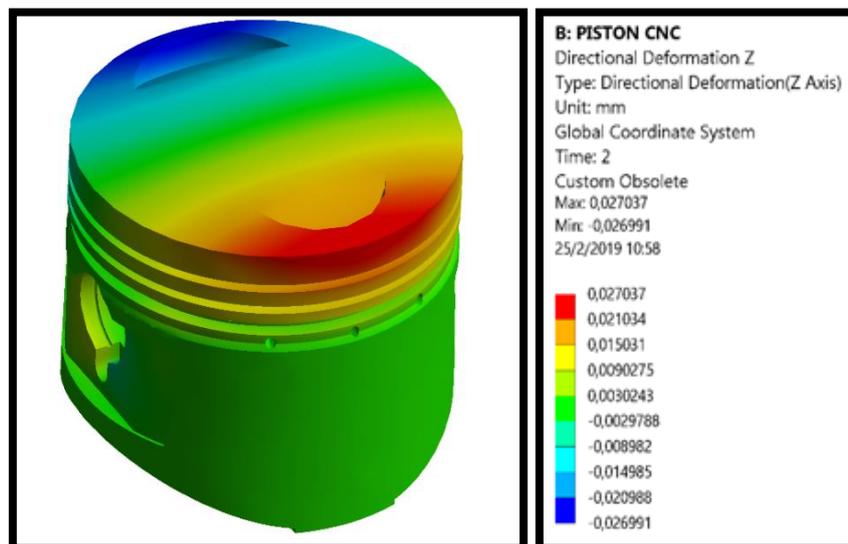


Figura No. 117. Análisis de deformaciones direccional en el eje Z pistón de aluminio 7021.

f) Esfuerzo equivalente.

El esfuerzo equivalente se basa en el criterio de fallo elástico de Von Mises que determina un parámetro para ver si el material se plastifica.

Richard Edler Von Mises menciona: “Un material dúctil sufría fallo elástico cuando la energía

de distorsión elástica rebasaba cierto valor". (Nisbett, 2008)

En un ensayo de compresión uniaxial σ_1 es igual al límite elástico.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6(K^2)$$

Ecuación 34. Esfuerzo de Von Mises.

$$\sigma_1 = \sigma_y$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$2\sigma_y^2 = 6(K^2)$$

$$K = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

$$K = \frac{70000 \text{ Mpa}}{\sqrt{3}}$$

$$K = 40414.51 \text{ Mpa}$$

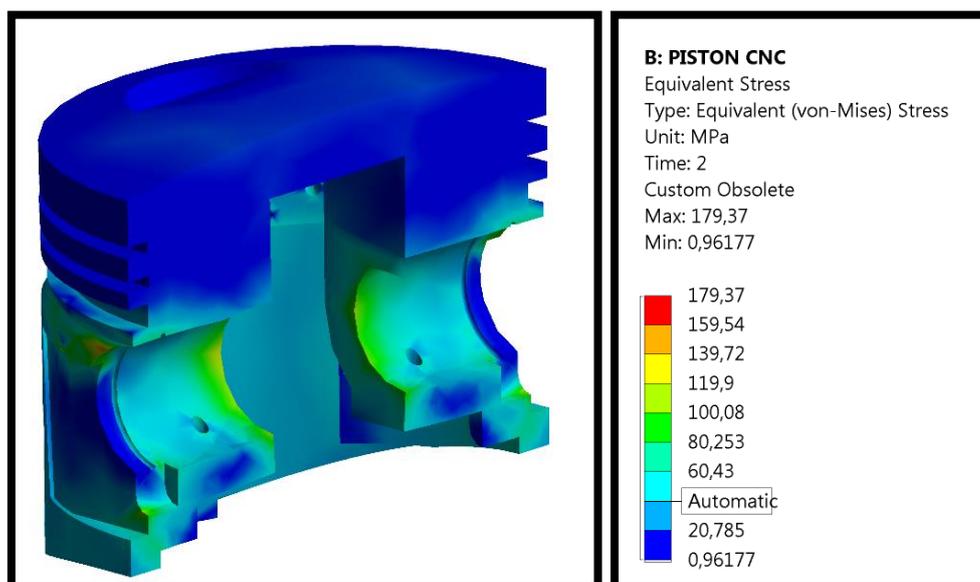


Figura No. 118. Pistón de aluminio 7021 esfuerzo equivalente Von Mises.

El resultado de esfuerzo equivalente dado por el software al aplicársele 11808.42 N es de un máximo de 179.37 MPa, que como muestra la figura 118 es representada de color rojo en el pistón, hay que resaltar que no presenta falla y que las secciones de este color son casi imperceptibles. De acuerdo al valor de esfuerzo equivalente calculado de Von Mises de 40414.51 Mpa con respecto al calculado por el software, este es considerablemente pequeño por lo que se concluye que no existirá fallo plástico.

g) Esfuerzo máximo.

El esfuerzo máximo utiliza la teoría de Von Mises, que determina criterios de falla cuando un material se tiende a plastificar, es decir, cuando el material no vuelve a su estado inicial después de haber estado sometido a cargas externas.

La mayoría de códigos de elementos finitos se basa que si el valor de sigma prima (σ) es mayor que el limite elástico (σ_y) el pistón no tiene un comportamiento plástico.

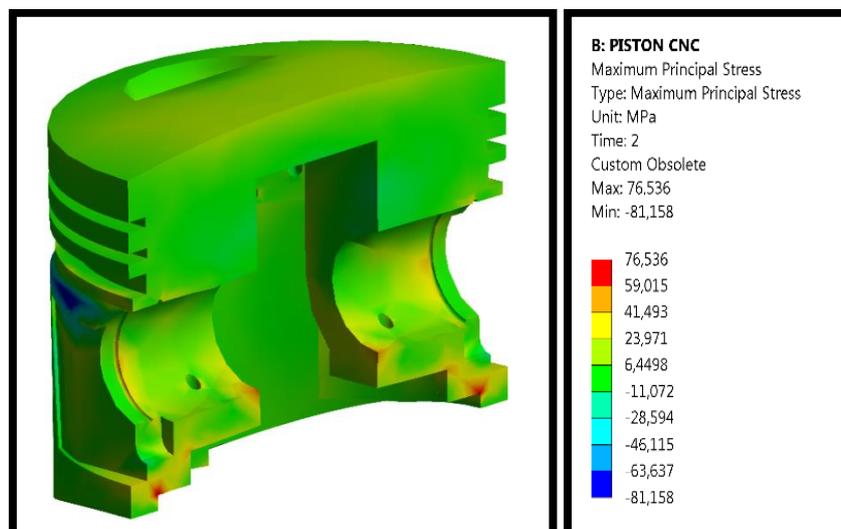


Figura No. 119. Pistón de aluminio 7021 esfuerzo máximo.

Con los resultados obtenidos del software del pistón de aluminio 7021 con un módulo de elasticidad de 70000 MPa (la tabla 5), se determinó que el esfuerzo equivalente máximo es de 76.536 MPa, identificado de color rojo en la figura 119, y que el pistón al estar sometido a estos esfuerzos se encuentra en su zona elástica donde tiene una deformación reversible ya que el esfuerzo máximo no sobrepasa el módulo de elasticidad.

h) Esfuerzo máximo de corte.

Los esfuerzos de corte son esfuerzos más pequeños paralelos a la fuerza de compresión que actúan en el pistón.

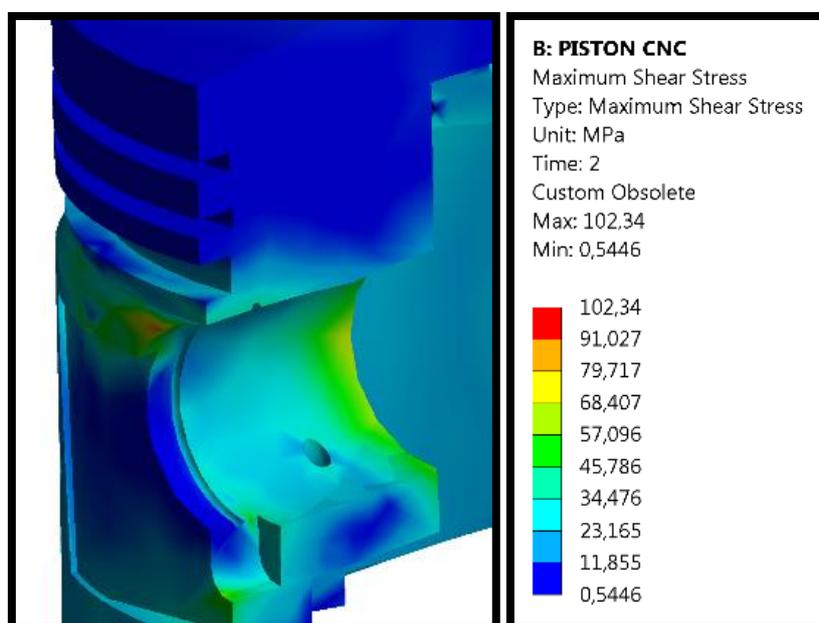


Figura No. 120. Pistón de aluminio 7021 esfuerzo máximo de corte.

Como resultado se obtuvo que el esfuerzo cortante máximo es de 102.34 MPa, la falla es casi imperceptible y se ubica en la base de la ranura del segmento de lubricación representada

de color rojo, como se aprecia en la figura 120, al estar sometido a estos esfuerzos se obtiene una deformación reversible pero en este caso no existirá falla ya que el esfuerzo máximo obtenido por el software no sobrepasa el módulo de elasticidad de 70000 MPa (tabla 5).

i) Factor de seguridad.

El factor de seguridad es una relación entre el esfuerzo último sobre el esfuerzo admisible, la carga última hace referencia al esfuerzo de fractura, por lo general se considera un factor de seguridad a valores mayores a 1 para que el material no presente fallas.

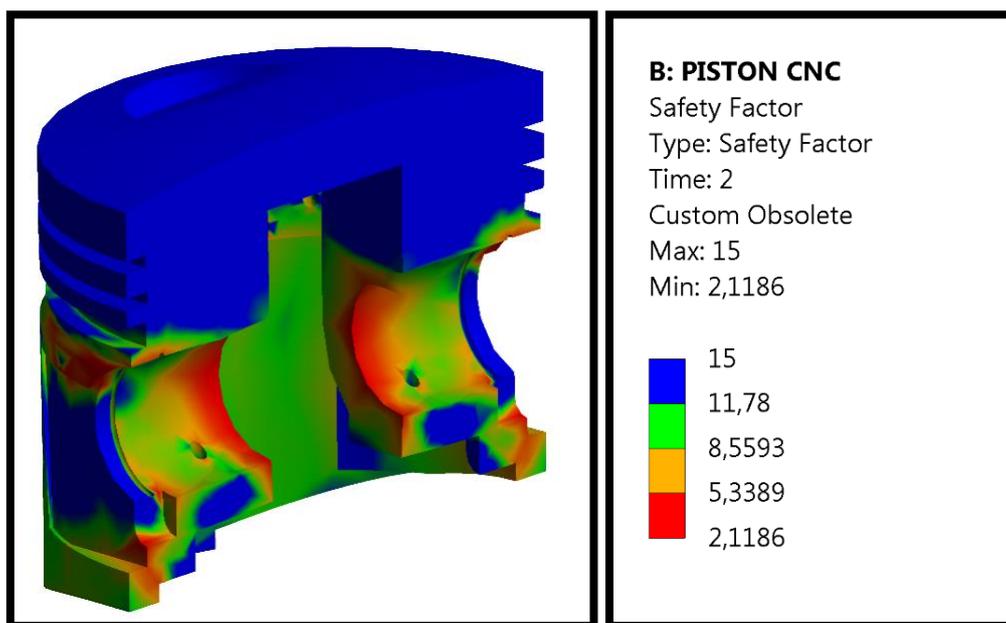


Figura No. 121. Factor de seguridad pistón de aluminio 7021.

Con el software se obtuvo que el factor de seguridad mínimo para el pistón es de 2.11, las zonas de color rojo, según la figura 121, son las zonas que son propensas a falla por el hecho de que existen factores de lubricación y enfriamiento que no se consideró en el software CAE.

Pero el factor de seguridad al ser mayor de 1 se considera que el pistón no presentará falla al estar dentro del rango del factor de seguridad.

j) Esfuerzo friccionante.

El esfuerzo friccionante permite determinar las tensiones que actúan tangencialmente a las superficies de acoplamiento entre los elementos de contacto, en el sistema biela manivela se analiza el contacto del bulón con el eje del bulón.

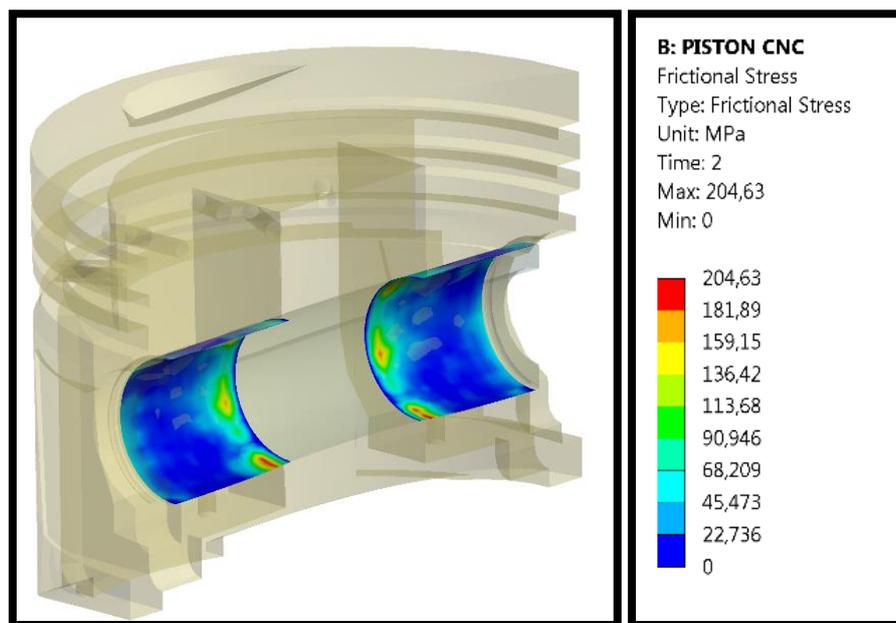


Figura No. 122. Análisis del esfuerzo friccionante entre bulón y pistón de aluminio 7021.

En este caso, el esfuerzo friccionante calculado por el software en el que se presentará desprendimiento de material será a los 204,63 MPa, en el eje del bulón las secciones de color rojo son mínimas como muestra la figura 122.

El esfuerzo que se genera en la biela es perpendicular al eje del bulón, al tener la misma distancia entre los apoyos del bulón se considera que cada apoyo debe recibir la mitad del esfuerzo producido por la biela, (Jóvaj, 1982) menciona que este esfuerzo no debe sobrepasar los 250 MPa para no tener una ruptura del bulón.

k) Presión de contacto.

El pistón analizado tiene un bulón flotante que gira en su eje, este está retenido con seguros circulares para evitar el desplazamiento axial, el bulón está sometido a esfuerzos cíclicos, esto quiere decir que existen esfuerzos que podrían ocasionar pandeo del mismo.

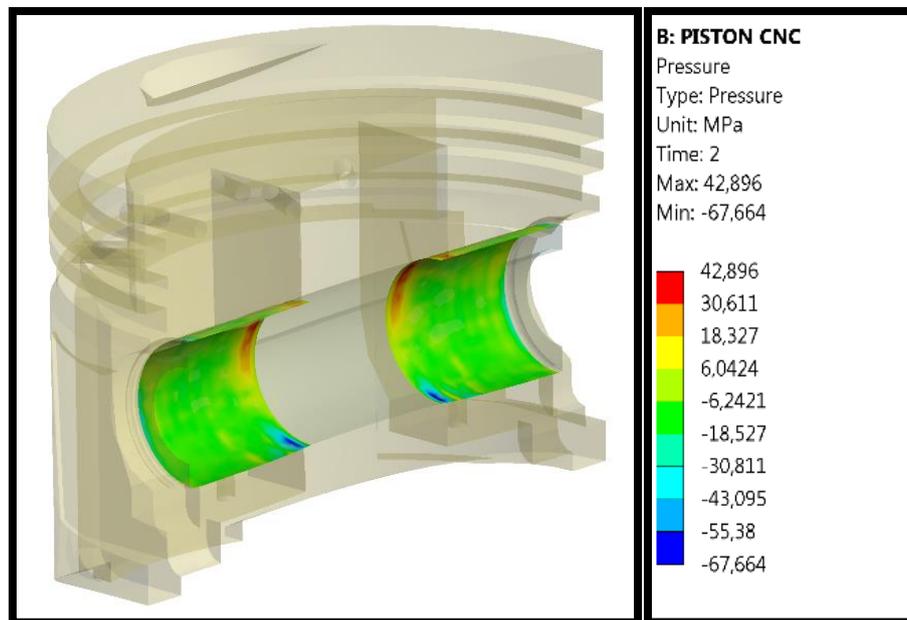


Figura No. 123. Análisis de la presión en el alojamiento del pistón de aluminio 7021.

La presión de contacto máximo calculado por el software muestra que en la parte superior del eje del bulón se genera una presión de 42.89 MPa que es representada de color rojo, y una

presión de contacto máximo en la parte inferior del eje del bulón de 67.66 MPa de color azul, como se muestra en la figura 123, así produciendo una deformación diametral en el eje del bulón, las cuales no producen un gripado o agarrotamiento con el bulón.

l) Desgaste entre pistón de aluminio 7021 y el bulón.

Teniendo presente que el bulón es de acero 1045 y el pistón de aluminio 7021 se debe considerar que el contacto entre el bulón y el eje en el pistón puede producir desprendimiento del material, esto dependerá de las propiedades mecánicas y térmicas de cada material, en especial del aluminio.

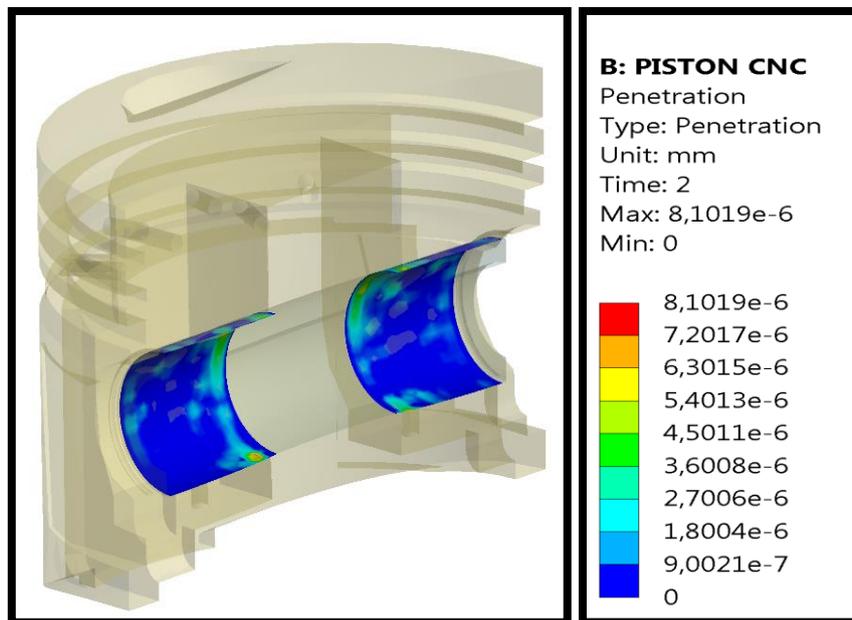


Figura No. 124. Análisis desgaste del eje de bulón.

Como resultado de la simulación se obtuvo que el desgaste máximo sucede en la parte interna del eje del bulón teniendo un valor de $8,10 \text{ e}^{-6} \text{ mm}$ de desgaste representada de color

rojo como muestra la figura 124, en esta zona existe mayor presión de contacto consecuente mayor desgaste.

El desgaste disminuye cuando se incremente el contenido de Silicio (Si) y Cobre (Cu) elementos químicos que mejoran las propiedades mecánicas y térmicas del aluminio.

5.2.2. Análisis Software CAE pistón del aluminio A390.

a) Restricciones.

Previo al análisis hay que considerar que el ensamble del tren alternativo debe estar ubicado en el origen ($x :0, y :0, z :0$) y sus componentes con sus respectivas restricciones.

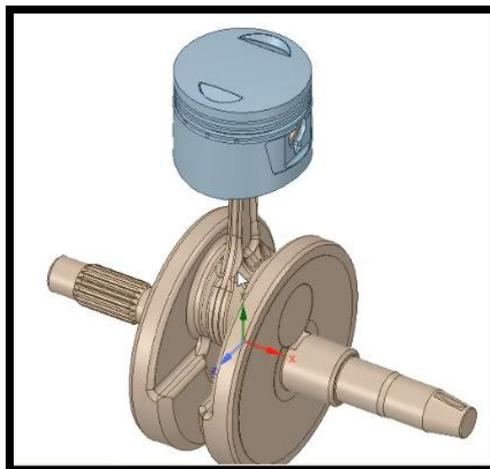


Figura No. 125. Restricción del movimiento del pistón de fábrica.

b) Fuerza del pistón.

Semejante al anterior análisis del pistón de aluminio 7021 seleccionar el área de la cabeza

del pistón y los alojos de las válvulas de admisión y escape ubicando la fuerza como vector con el valor de -11808.42 N en el eje de coordenadas Y con valor negativo ya que ejerce una fuerza de compresión.

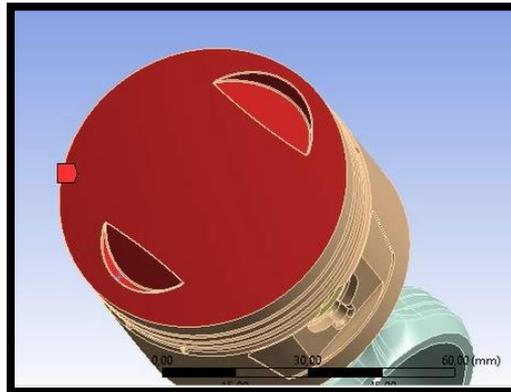


Figura No. 126. Área de contacto de la fuerza del pistón de fábrica.

c) Contactos de los elementos.

Existen tres contactos en el tren alternativo los cuales hay que seleccionar considerando el funcionamiento del mecanismo, utilizar las herramientas empleadas en la simulación anterior del pistón de aluminio 7021 para los contactos pistón - bulón, bulón - pie de biela y muñón de bancada -cabeza de biela.

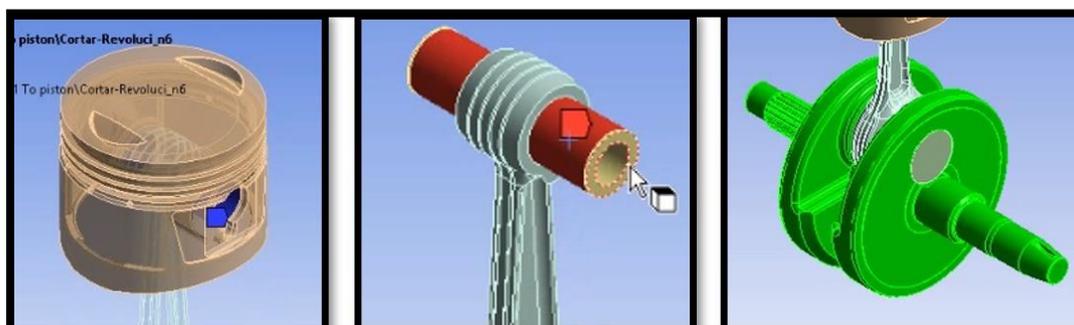


Figura No. 127. Contactos entre los elementos.

d) Especificaciones del material.

Para establecer las propiedades mecánicas del material aluminio A390 seleccionar *Engineering Data Sources*, en donde especificamos a partir de materiales generales de aleaciones de aluminio de la biblioteca, por la razón que los valores de las propiedades de los aluminios oscilan en rangos ya establecidos por aluminios existentes en la industria.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	aluminio7021				General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Aluminio A390				General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
5	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Figura No. 128. Características generales aleaciones de aluminio A390.

Especificar en la tabla *Properties of outline Row* la densidad, resistencia máxima a la tracción, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión del aluminio A390 obtenidos de las tablas de propiedades mecánicas y propiedades térmicas.

Tabla No. 9.

Propiedades mecánicas del aluminio A390.

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad	2.6 -2.8	x1000 kg/cm ³
Módulo de elasticidad	70-80	GPa
Resistencia a la tracción	180	MPa
Fuerza de rendimiento	180	MPa
Alargamiento	<1	%
Dureza Brinell	100	
Resistencia a la fatiga	70	MPa
Densidad	2.7	g / cm ³

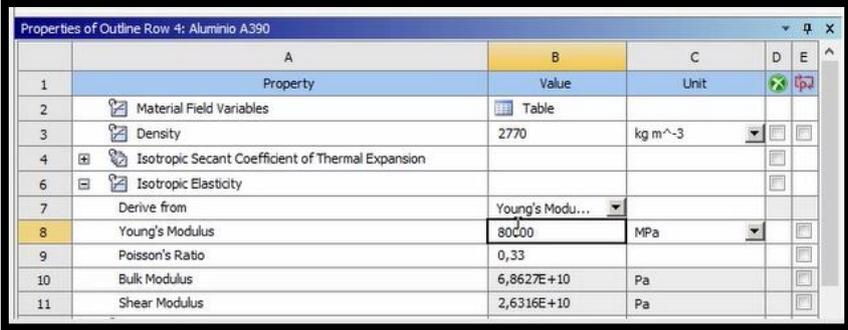
Fuente: (Minford, 2018)

Tabla No. 10.

Propiedades térmicas del aluminio A390.

Propiedad	Valor	Unidad
Calor latente en fusión	640	J/g
Punto de Fusión	580	C
Capacidad calorífica específica	880	J/Kg-K
Conductividad Térmica	130	W/m-K
Expansión térmica	20	$\mu\text{m/m-K}$

Fuente: (Minford, 2018)



Property	Value	Unit
Density	2770	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Young's Modulus	80000	MPa
Poisson's Ratio	0,33	
Bulk Modulus	6,8627E+10	Pa
Shear Modulus	2,6316E+10	Pa

Figura No. 129. Especificaciones de propiedades mecánicas del aluminio A390.

Para realizar los análisis guardar en *Engineering Data Sources* el nuevo material definido con el nombre de aluminio A390 y enlazar los *Engineering Data Sources* con la nueva *Gometry* en el *Static Structural* con el nombre de pistón estándar

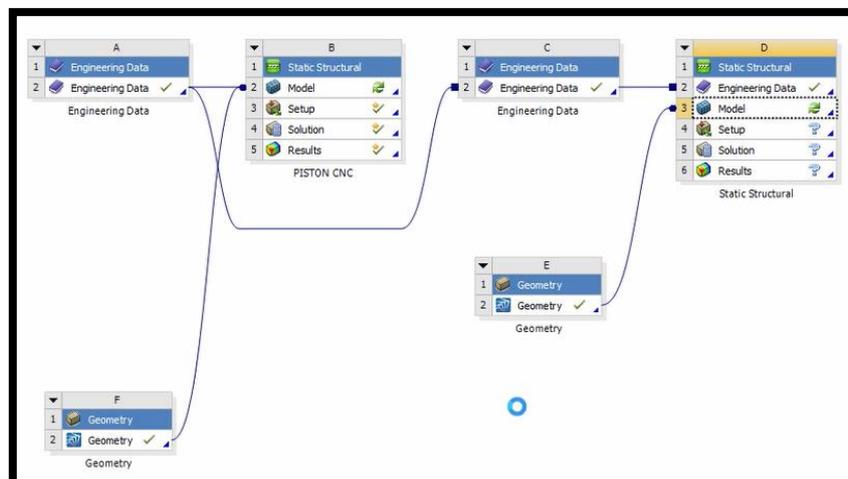


Figura No. 130. Static Structural del pistón de fábrica.

e) Deformaciones direccionales.

Para determinar las lesiones mecánicas del pistón de fábrica se consideró el mismo punto crítico del pistón de aluminio 7021 en el ciclo de explosión, ya que mediante cálculos matemáticos del capítulo 3 se determinó que el pistón sufre mayor esfuerzo en este ciclo de trabajo.

i. Deformación direccional en el eje X.

El esfuerzo aplicado resultó en una deformación máxima de 0.021 mm en la cabeza del pistón en el eje X de coordenadas, esta deformación se la puede apreciar como muestra la figura 131. En la falda del pistón de color verde se aprecia una deformación de 0.002 mm, si se considera que el pistón tiene un ajuste máximo del pistón y el cilindro de 0.15 mm, esto quiere decir que no existirá contacto excesivo entre las paredes del cilindro y la cabeza del pistón.

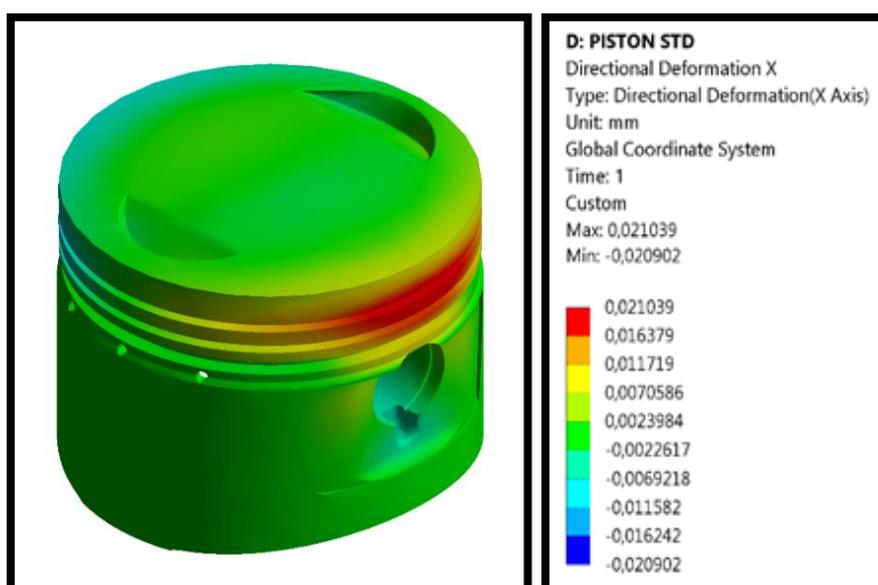


Figura No. 131. Análisis de deformación direccional en el eje X pistón de fábrica.

ii. Deformación direccional en el eje Y.

Como resultado de los esfuerzos aplicados al pistón, en el eje de coordenadas Y se generó una deformación con valor negativo por la razón que estas se encuentran en el 3^{ro} y 4^{to} cuadrante. Al observar los valores se aprecia una deformación máxima de 0.15 mm en la falda del pistón, en esta zona es mayor la deformación por ser de menor espesor que el resto de regiones del pistón y por qué es la encargada de disipar calor, esta deformación se la representada de color verde en la falda en la figura 132, la otra deformación crítica de 0.20 mm que está representada de color azul en la cabeza del pistón, esta no representa mayor cuidado, ya que no tiene contacto con otro elemento sólido.

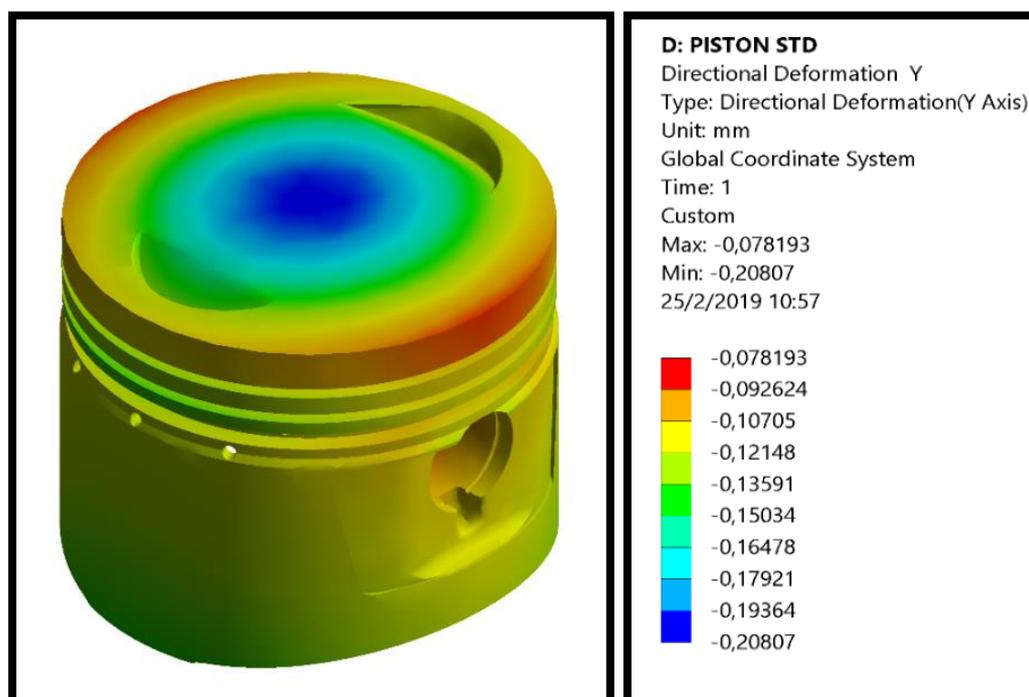


Figura No. 132. Análisis de deformación direccional en el eje Y pistón de fábrica.

iii. Deformación direccional en el eje Z.

Lo deformación resultante en el eje de coordenadas Z muestra una deformación máxima de 0.021 mm, que es apreciable en la figura 133. En la falda; de color verde; se aprecia una deformación de 0.003 mm, teniendo en cuenta que la tolerancia de funcionamiento del motor es de 0.15 mm el espacio es aceptable para la película de aceite entre la falda del pistón y la pared del cilindro evitando el gripado entre estos elementos.

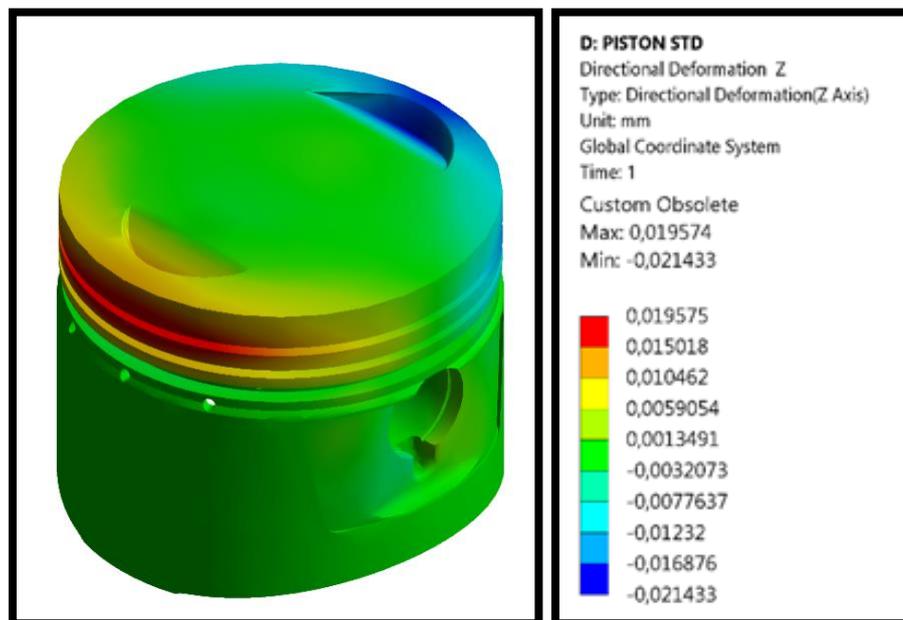


Figura No. 133. Análisis de deformaciones direccional en el eje Z pistón de fábrica.

f) Esfuerzo equivalente.

El resultado de esfuerzo equivalente dado por el software al aplicarse los 11808.42 N es de un máximo de 668.39 MPa, que como muestra la figura 134 es representada de color rojo en el pistón, hay que resaltar que no presenta falla y que las secciones de este color son casi

imperceptibles. De acuerdo al valor de esfuerzo equivalente calculado de Von Mises de 46188.02 Mpa con respecto al calculado por software, este es considerablemente pequeño por lo que se concluye que no existirá fallo plástico.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6(K^2)$$

$$\sigma_1 = \sigma_y$$

$$\sigma_2 = 0$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$2\sigma_y^2 = 6(K^2)$$

$$K = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}}$$

$$K = \frac{80000 \text{ Mpa}}{\sqrt{3}}$$

$$K = 46188.02 \text{ Mpa}$$

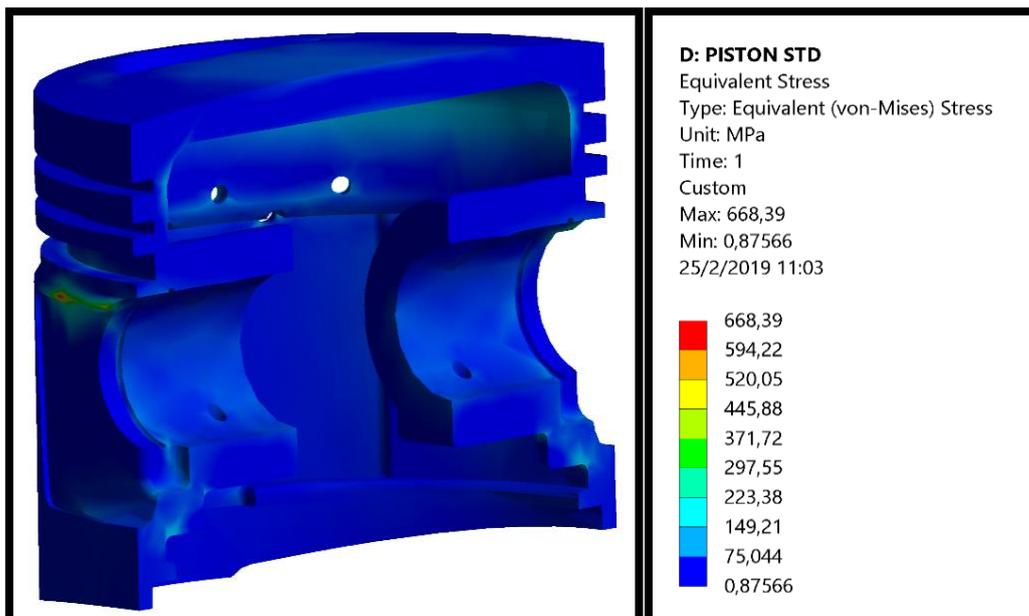


Figura No. 134. Pistón de fábrica esfuerzo equivalente Von Mises.

g) Esfuerzo máximo.

El esfuerzo máximo utiliza la teoría de Von Mises, que determina criterios de falla cuando un material se tiende a plastificar, es decir, cuando el material no vuelve a su estado inicial después de haber estado sometido a cargas externas. La mayoría de códigos de elementos finitos se basa que si el valor de sigma prima (σ') es mayor que el limite elástico (σ_y) el pistón no tiene un comportamiento plástico.

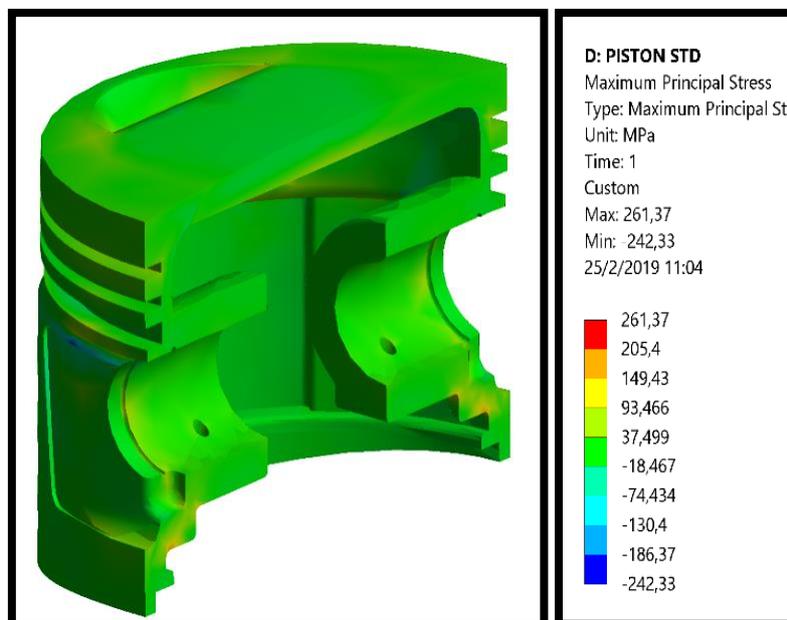


Figura No. 135. Pistón de fábrica esfuerzo máximo.

Terminado el análisis de pistón de aluminio A390 con un módulo de elasticidad de 80000 MPa (tabla 8), se determinó que el esfuerzo equivalente máximo es de 261.37 MPa, identificado de color rojo en la figura 135, y que el pistón al estar sometido a estos esfuerzos se encuentra en su zona elástica donde tiene una deformación reversible ya que el esfuerzo máximo no sobrepasa el módulo de elasticidad.

h) Esfuerzo máximo de corte.

Los esfuerzos de corte son esfuerzos más pequeños paralelos a la fuerza de compresión que actúan en el pistón.

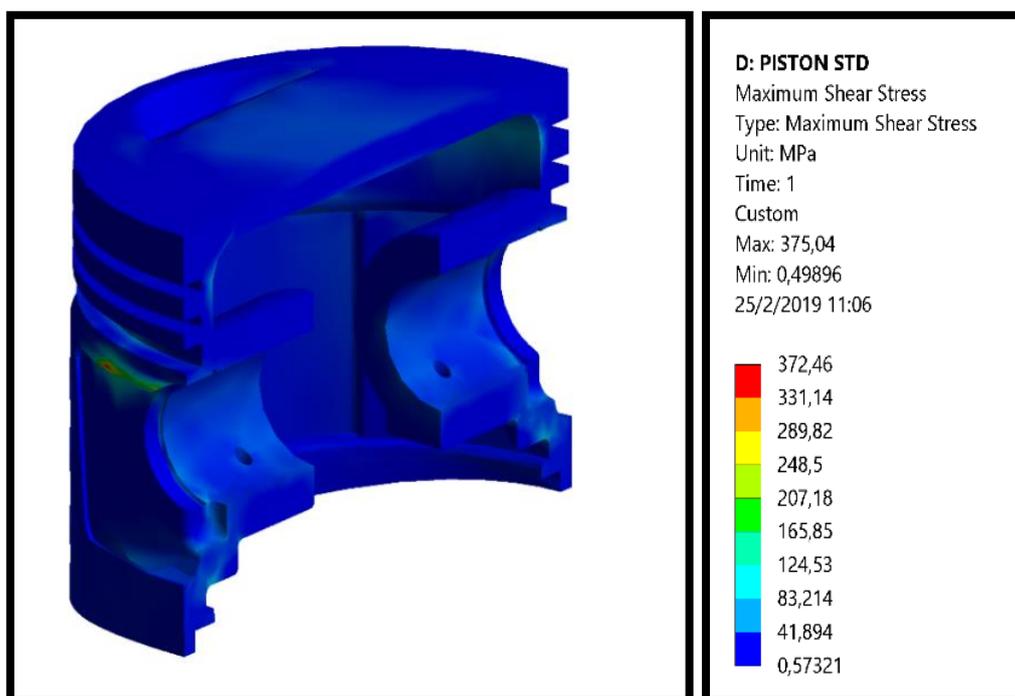


Figura No. 136. Esfuerzo máximo de corte pistón de fábrica.

Gracias a la simulación se obtuvo como resultado que el esfuerzo cortante máximo es de 372.46 MPa, la falla es casi imperceptible y se ubica en la base de la ranura del segmento de lubricación representada de color rojo, como se aprecia en la figura 136, al estar sometido a estos esfuerzos se obtiene una deformación reversible pero en este caso no existirá falla ya que el esfuerzo máximo obtenido por el software no sobrepasa el módulo de elasticidad de 80000 MPa (tabla 8).

i) Factor de seguridad.

El factor de seguridad es una relación entre el esfuerzo último sobre el esfuerzo admisible, la carga última hace referencia al esfuerzo de fractura, por lo general se considera un factor de seguridad a valores mayores a 1 para que el material no presente fallas.

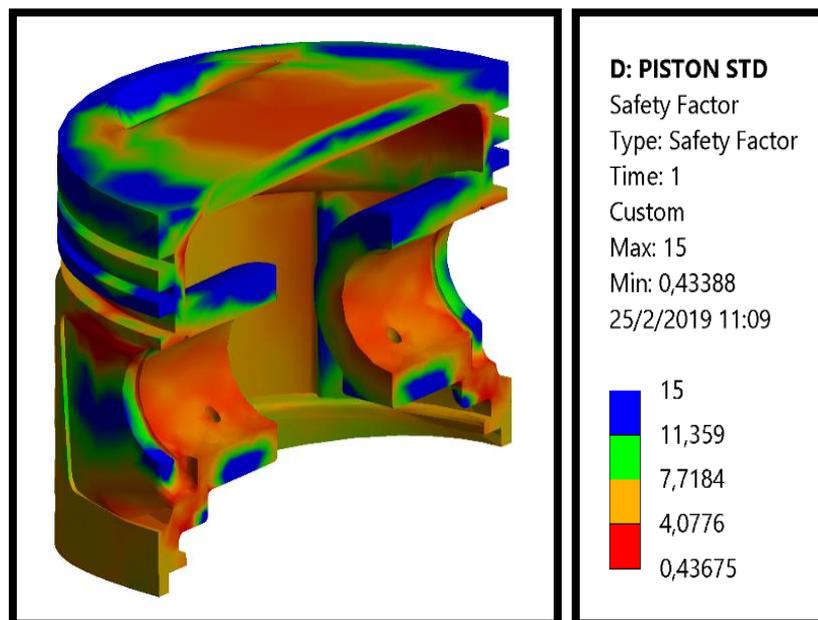


Figura No. 137. Factor de seguridad pisto de aluminio A390.

Con el software se obtuvo que el factor de seguridad mínimo para el pistón es de 0.4, las zonas de color rojo, según la figura 137, son las zonas que son propensas a falla por el hecho de que existen factores de lubricación y enfriamiento que no se consideró en el software CAE.

j) Esfuerzo friccionante.

El esfuerzo friccionante permite determinar las tensiones que actúan tangencialmente a las

superficies de acoplamiento entre los elementos de contacto, en el sistema biela manivela se analiza el contacto del bulón con el eje.

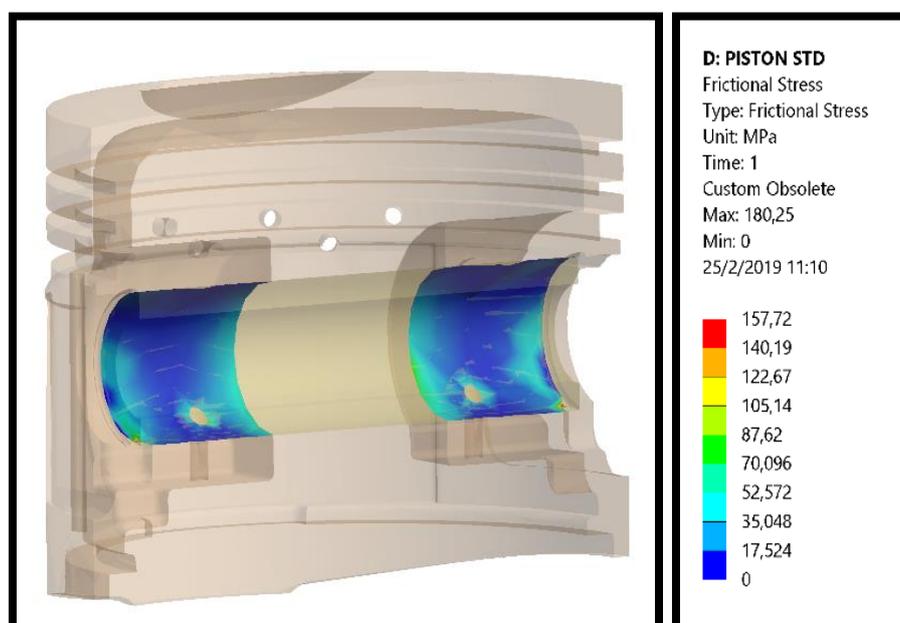


Figura No. 138. Esfuerzo friccionante del pisto de fábrica.

En este caso, el esfuerzo friccionante calculado por el software en el que se presentará desprendimiento de material será a los 157.72 MPa, en el eje del bulón las secciones de color rojo son mínimas como muestra la figura 138.

En el caso de los dos pistones se tiene al bulón de acero 1045 como constante, por lo que se puede concluir el pistón de fábrica de aluminio A390 tiene un menor esfuerzo friccionante en relación al pistón de aluminio 7021, esto se debe a las propiedades térmicas y al coeficiente de dilatación del aluminio A390 en el cual existe mayor espacio de luz entre el bulón y el eje del bulón disminuyendo dicho esfuerzo.

k) Presión de contacto.

La presión de contacto máximo calculado por el software muestra que en la parte superior del eje del bulón se genera una presión de 27.779 MPa que es representada de color rojo, como se muestra en la figura 139, así se produce una deformación diametral en el eje del bulón, las cuales no producen un gripado o agarrotamiento con el bulón.

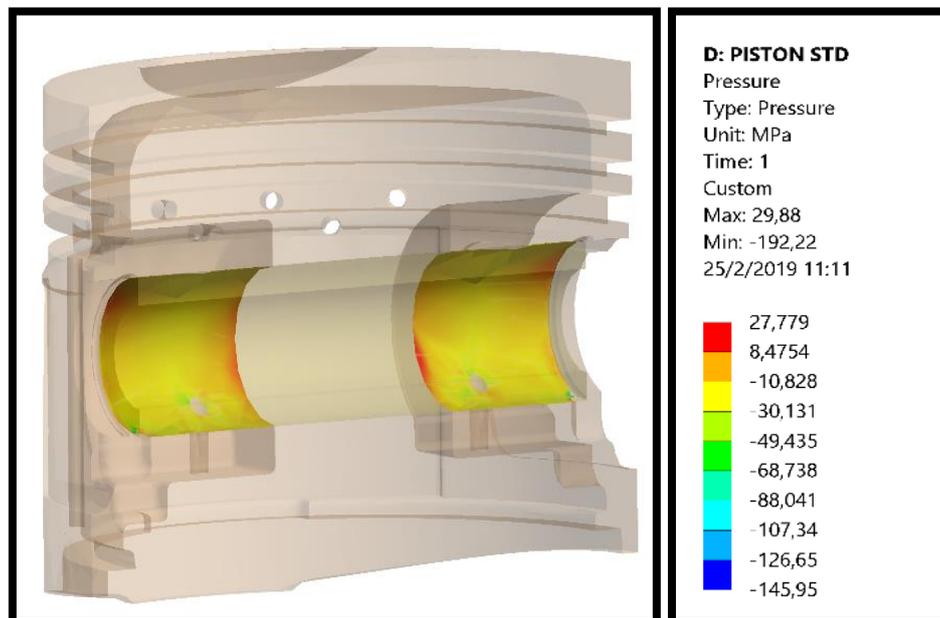


Figura No. 139. Análisis de la presión en el alojamiento del pistón de aluminio A390.

l) Desgaste pistón de aluminio A390.

Como resultado de la simulación se obtuvo que el desgaste máximo sucede en la parte interna del eje del bulón teniendo un valor de $4,052 \text{ e}^{-6} \text{ mm}$ de desgaste representada de color rojo como muestra la figura 140, en esta zona existe mayor presión de contacto consecuente mayor desgaste.

El desgaste disminuye cuando se incrementa el contenido de Silicio (Si) y Cobre (Cu), elementos químicos que mejoran las propiedades térmicas del aluminio A390.

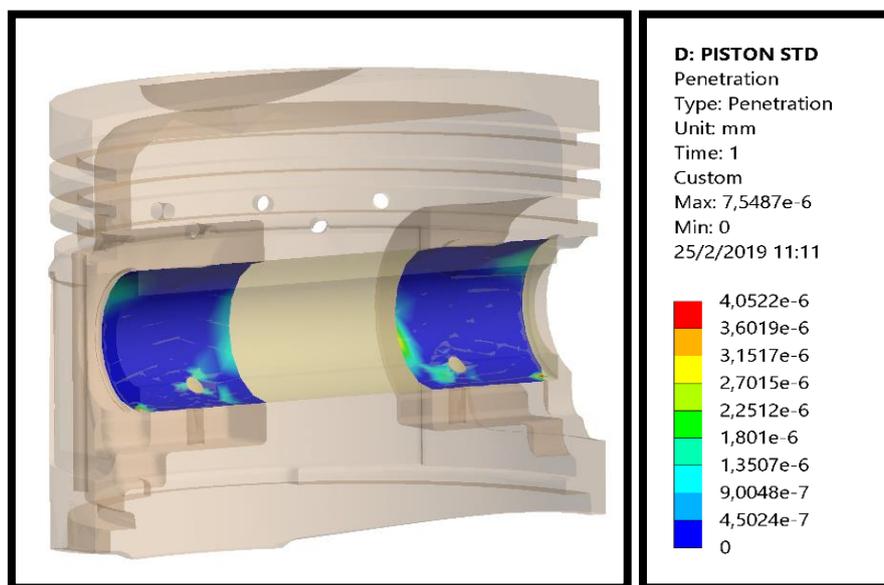


Figura No. 140. Análisis de desgaste del alojamiento del pistón de aluminio A390.

5.3. Mecanizado con software CAM.

El mecanizado asistido por computador es una serie de procesos que, mediante el uso de un software CAM se puede programar y controlar las operaciones de máquinas herramientas para el proceso de manufactura de elementos para la ingeniería. Siendo el objetivo de este tipo de manufactura la fabricación de elementos de una manera mucho más rápida, más precisa y más rentable para la industria.

Para el mecanizado del pistón se utilizó la máquina CNC de la marca **ANAYAC** modelo **Anak Matic**, la cual recibe las ordenes de las líneas de códigos generados por un software CAM.

Gracias al software se simula cómo será la trayectoria de las herramientas de mecanizado de la máquina CNC, por lo que primero se deben seguir ciertos protocolos antes de comenzar el mecanizado, estos pasos son detallados a continuación.

5.3.1. Código GUI.

El software CAM genera líneas de código basado en el proceso de fabricación asistida por computadora, mediante una plataforma de interfaz gráfica de usuario (GUI), este código alfanumérico es enviado al control de la máquina CNC y seguirá las instrucciones para el mecanizado del pistón.



Figura No. 141. Generación y verificación de código GUI en el software CAM y en la máquina CNC.

El pistón no puede ser mecanizado en uno solo paso, por lo cual, deben ser creados varios procesos de mecanizado como: el cilindrado exterior del pistón, el mecanizado interno, mecanizado de la falda, ranurado de los canales de rines, eje de bulón, mecanizado de cavidades

de válvulas y varios procesos de afinado final de la pieza. Estos procesos son realizados en el software CAM.

En la opción de **Postproceso** del software se despliega diferentes modelos de máquinas CNC, para este caso se selecciona la opción **UNCX01.P02** que es el código de la máquina **Anayak –Matic-7-cnc**; una ventana de comando emergerá en el monitor donde se ingresará el nombre del proceso de mecanizado a realizar, para esta ocasión se ha elegido el proceso de **Afinado** como ejemplo.

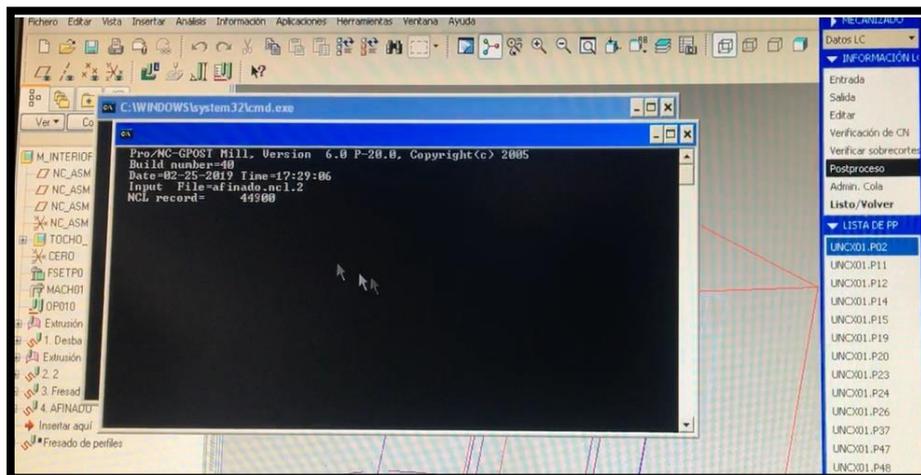


Figura No. 142. Selección de proceso a mecanizar en el software CAM.

Se selecciona la opción **EXT-TNC** el cual transfiere un archivo del computador al controlador de la máquina Anayak –Matic-7-cnc mediante un cable R323, posteriormente se selecciona la extensión del código del proceso en **archivo.H**, en este caso el nombre del archivo es: **afinado2.H**



Figura No. 143. Extracciones líneas de código proceso de afinado del perfil de la falda.

El controlador reconoce el archivo y transfiere todas las líneas de código del proceso de mecanizado, para este caso 53910 líneas de código para el afinado de la falda.



Figura No. 144. Selección del proceso de mecanizado a realizar.

Para el mecanizado del pistón se utilizó un bloque base de aluminio 7021 con dimensiones de 62x62x52 mm, estas dimensiones son ingresadas a la máquina CNC previo a la ejecución de los procesos de mecanizado.



Figura No. 145. Bloque de aluminio 7021.

Se debe considerar que la máquina tiene su punto cero de referencia, este punto se llama **CERO DE PIEZA**, la cual conociendo las dimensiones del bloque base aluminio 7021, en la figura 146 muestra los parámetros iniciales del mecanizado, por lo tanto las dimensiones del bloque a mecanizar se especifica de la siguiente forma: 1^{ra} fila (-31x,-31y,-52z) dimensiones del bloque a mecanizar, ejes de coordenadas negativas y 2^{da} fila (31x,31y,0z) dimensiones del bloque a mecanizar, ejes de coordenadas positivas y en la fila 5^{ta} el comando **TOOL** que describe el número de herramienta que se va a utilizar, que para todo el mecanizado fueron necesarias 5 herramientas.

```

0 BEGIN PGM a1in2 MM
1 BLK FORM 0.1 Z X-31 Y-31 Z-52
2 BLK FORM 0.2 X+31 Y+31 Z+0
3 > PROGRAMA
4 > TOOL
5 > DIAMETRO
6 > COMENT.
7 TOOL CALL 8 Z S800
8 M3
9 M8
10 L Z+10 FMAX
11 L X-13,778 Y+25,282 FMAX

```

Figura No. 146. Parámetro principal del proceso de mecanizado afinado de falda.

Se selecciona **ACEPTAR** en el centro de control de la máquina Anayak –Matic-7-cnc y esta empezará a realizar una vista preliminar del proceso de mecanizado del afinado de la falda, gracias a esta opción se puede prevenir que exista un mal contacto o choque entre la herramienta y el área de mecanizado.

El monitor del centro de control de la máquina CNC se divide en zonas en las que muestra el estado del proceso de mecanizado como se observa en la figura 147 donde en la zona A se puede visualizar el desplazamiento de la línea de código según el desplazamiento el proceso a realizar. En la zona B se aprecia la simulación en 3D del proceso de mecanizado según la línea de código ejecutada, en la figura se observa el proceso de la línea 102. En la zona C se visualiza el desplazamiento de los carros en los ejes de coordenadas X, Y y Z. En la zona D se aprecia los parámetros de mecanizado; la primera fila (T 8 Z) muestra que se está utilizando la herramienta 8 y mecanizado en el eje Z, la segunda fila (F0) muestra el avance de la herramienta en mm/s y la tercera fila (S 960) muestra la velocidad de giro del cabezal en rpm.



Figura No. 147. Simulación del mecanizado afinado de la falda.

En la figura 148 se aprecia como es el mecanizado terminado del proceso descrito, y de

esta manera se ejecuta el resto de procesos para poder realizar el mecanizado completo del pistón.



Figura No. 148. Resultado final afinado de la falda.

5.3.2. Características de las líneas de código.

Las líneas de código que genera el software CAM pueden ser modificadas de forma correctiva o preventiva manualmente en el controlador de la máquina CNC mediante su teclado, considerando: el proceso a mecanizar, el cero de máquina, cero de herramienta, cero de pieza y funciones que están relacionadas con la torreta de herramientas.



Figura No. 149. Teclado del controlador Anayak –Matic-7-CNC.

En la figura 150 se observa un ejemplo de cómo se ve terminado una parte de la línea de código la cual va a seguir a modo de instrucciones la máquina CNC.

```

11 L Z0 FMAX
12 L Z-.1 F300
13 L X-11.77884
14 CC X-11.77884 Y27.28226
15 C X-9.77884 Y27.28226 DR+
16 L Y29.68224
17 CC X-11.77884 Y29.68224
18 C X-11.77884 Y31.68224 DR+
19 L X-13.77884
20 L Z0
21 L X13.7788 Y31.68226 FMAX
22 L Z-.1 F300
23 L X11.7788
24 CC X11.7788 Y29.68226
25 C X9.7788 Y29.68226 DR+
26 L Y27.28208
27 CC X11.7788 Y27.28208
28 C X11.7788 Y25.28208 DR+
29 L X13.7788
30 L Z0
31 L Y-25.28226 FMAX
32 L Z-.1 F300
33 L X11.7788
34 CC X11.7788 Y-27.28226
35 C X9.7788 Y-27.28226 DR+

```

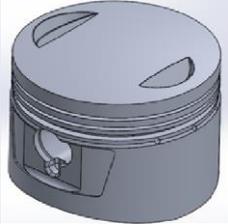
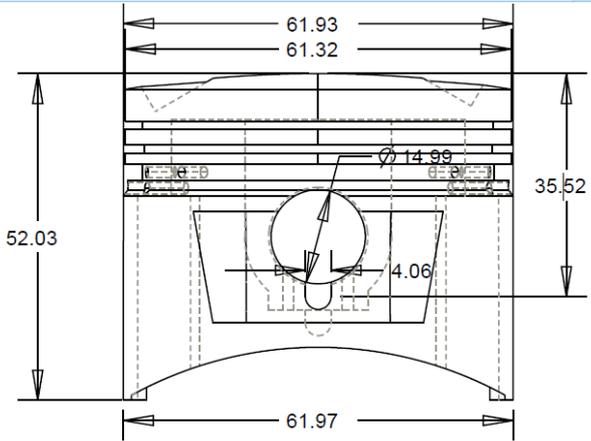
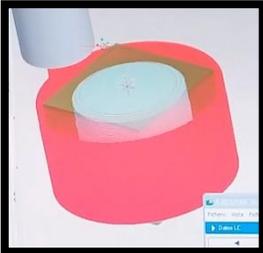
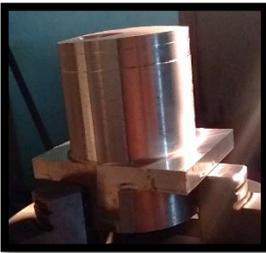
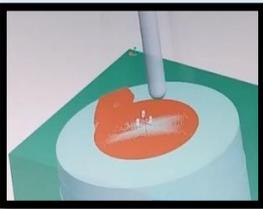
Figura No. 150. Líneas de código proceso de mecanizado afinado del perfil de la falda.

5.4. Proceso de mecanizado del pistón con la máquina CNC.

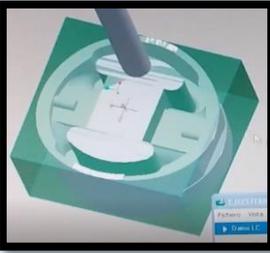
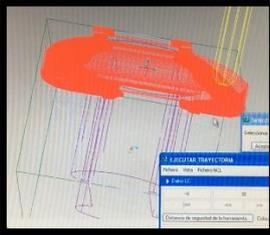
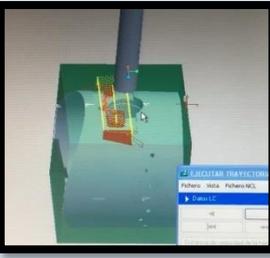
Todos los procesos para el mecanizado deben seguir los parámetros y pasos mencionados, en la siguiente hoja de trabajo se muestran los detalles de los procesos que fueron necesarios para llegar al mecanizado final del pistón.

Tabla No. 11.

Hoja de trabajo de los procesos de mecanizado del pistón.

HOJA DE PROCESOS			
Nombre del proceso:	Mecanizado de pistón en aluminio 7021.	Revisa: Ing. Mauricio Cruz.	
Hoja No.	1 de 1	Autoriza: Ing. Mauricio Cruz.	
Responsable:	Romero Jonathan. Velásquez Andrés.		
Departamento:	Carrera de Ingeniería Automotriz		
			
OPERACIONES			
Operación:	Herramientas y parámetros de trabajo:	Vista previa de la operación:	Resultado:
Cilindrado	Inserto (CoroMill Plura) Diámetro = 40 mm $V_c = 35 \text{ m/min}$ $N = 181 \text{ rpm}$ $V_a = 736.59 \text{ mm/min}$		
Convexidad y mecanizado de alojos de válvulas.	CoroMill 216F Diámetro = 8 mm $V_c = 375 \text{ m/min}$ $N = 4591 \text{ rpm}$ $V_a = 939.8 \text{ mm/min}$		

CONTINÚA →

Escariado	<p>Escariadores CoroDrill: Diámetro =15mm Porta herramientas excéntrico. $V_c = 35 \text{ m/min}$ $N = 2449 \text{ rpm}$ $V_a = 1498.6 \text{ mm/min}$</p>		
Fresado	<p>CoroMill 216F Diámetro =8 mm $V_c = 375 \text{ m/min}$ $N = 4591 \text{ rpm}$ $V_a = 939.8 \text{ mm/Min}$ CoroDrill Diámetro = 2mm $V_c = 35\text{m/min}$ $N = 18365 \text{ rpm}$ $V_a = 939.8 \text{ mm/min}$</p>		
Afinado	<p>CoroMill 216F Diámetro =8 mm $V_c = 35\text{m/min}$ $N = 181 \text{ rpm}$ $V_a = 736.59 \text{ mm/min}$</p>		
Ranurado	<p>Cuchilla 1.27 mm $V_c = 35\text{m/min}$ $N = 28922 \text{ rpm}$ $V_a = 2946 \text{ mm/min}$</p>		
Pulido	<p>Papel de lija #1200</p>		

5.5. Tratamiento térmico.

Los tratamientos térmicos elegidos para ser sometido al pistón mecanizado son temple a 420°C y envejecido a 130°C durante 5 horas, la razón de los valores de las temperaturas elegidas para estos tratamientos es explicados en el capítulo 6 de este estudio.

5.5.1. Templado

Para el proceso de temple, el pistón es ingresado al horno a temperatura ambiente hasta que llegue a 420°C para permanecer a esa temperatura durante 90 minutos.



Figura No. 151. Pistón dentro del horno a temperatura ambiente.

Terminado el tiempo dentro del horno se procede a enfriar rápidamente el pistón en agua desmineralizada terminado así el proceso de templado.



Figura No. 152. Templado del pistón en agua desmineralizada.

5.5.2. Envejecido.

De igual manera el pistón previamente templado se ingresa al horno nuevamente a temperatura ambiente, para luego subirla hasta alcanzar 130°C y permanecerá así durante 5 horas. Pasado ese tiempo se deja enfriar el pistón hasta que llegue a temperatura ambiente una vez más.



Figura No. 153. Horno abierto para que se produzca el enfriamiento hasta temperatura ambiente.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. Análisis de los datos generados por la simulación CAE.

El comportamiento del pistón en su ciclo de funcionamiento puede ser predicho en la simulación CAE, en una gráfica de lazo abierto de la figura 154 se representa el desplazamiento angular del cigüeñal, donde se observa que a los 360 grados de desplazamiento del cigüeñal existe la mayor presión soportada por el pistón de 4 MPa, la cual se produce al inicio del ciclo de explosión en el ciclo Otto, en ese punto fue analizado el comportamiento del pistón con el software CAE.

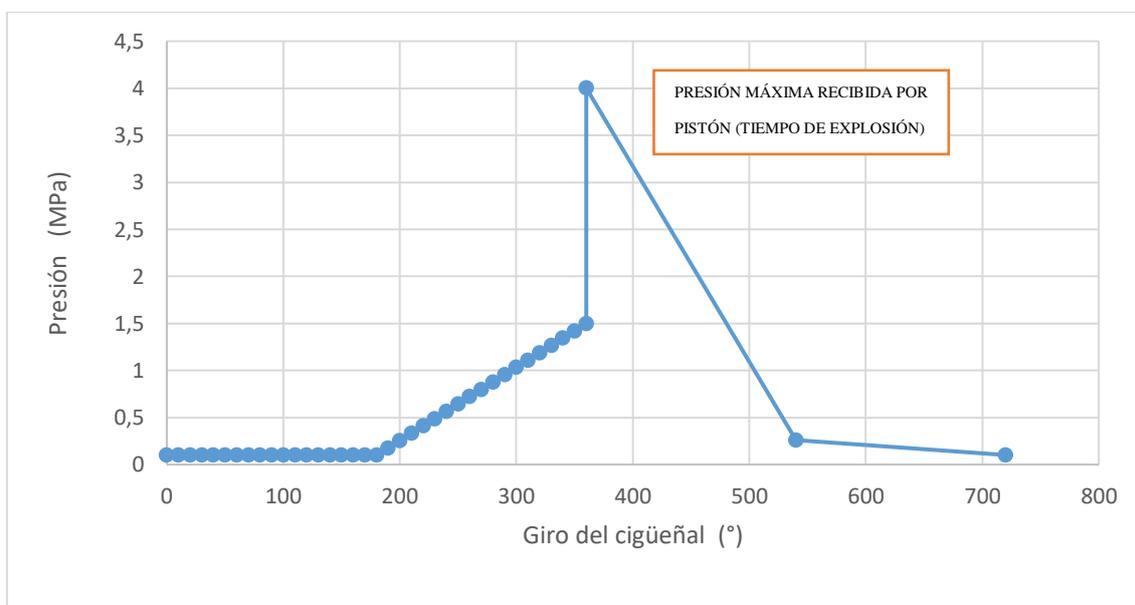


Figura No. 154. Ciclo de trabajo para un motor de 4 tiempos mono cilíndrico (lazo abierto).

6.1.1. Deformaciones direccionales.

La deformación en el eje de coordenadas X del pistón de fábrica A390 en comparación al pistón de aluminio 7021 tiene una diferencia notable, tomando en cuenta sus módulos de elasticidad y sus coeficientes de dilatación. En ambos casos, el diámetro de la cabeza del pistón es de **61.32 mm**, en el caso del pistón de aluminio 7021 se obtuvo un valor de **61.38 mm** que representa una deformación del **0.10%** de su dimensión original, por otro lado, el pistón de fábrica A390 presentó un valor de **61.36 mm**, el cual representa una deformación de **0.07%**.

En el alto de los dos pistones, desde su cabeza hasta la falda, se tiene la misma medida de **52.03 mm**, al comparar las deformaciones de los dos pistones en el eje de coordenadas Y, se obtuvo que el pistón de fábrica A390 presenta una medida de **52.18 mm** lo que representa una deformación de **0.29%** de su medida original y con el pistón de aluminio 7021 se obtuvo una medida de **52.30 mm** que representa una deformación de **0.52%**, esta diferencia de deformaciones finales se debe a la longitud y espesor de la falda rediseñados del pistón de aluminio 7021 con respecto al pistón de fábrica A390, esto ocasiona una mayor resistencia térmica por lo que esto implica que tardara más tiempo en disipar calor y por ende hay una mayor deformación.

En el eje de coordenadas Z se debe tener en cuenta que en ambos casos el diámetro de la cabeza del pistón es de **61.32 mm**, en el pistón de aluminio 7021 se obtuvo un valor de **61.37 mm** que representa una deformación del **0.08%** de su dimensión original, por otro lado, el pistón de fábrica A390 presentó un valor de **61.36 mm**, el cual representa una deformación de **0.07%**.

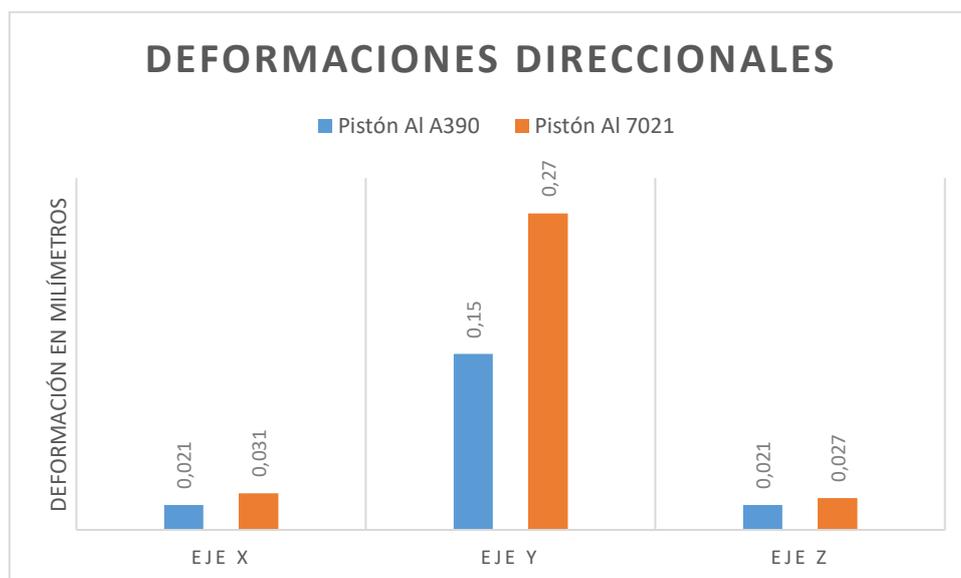


Figura No. 155. Deformaciones máximas direccionales en los ejes de coordenadas pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica A390.

6.1.2. Esfuerzo equivalente.

El límite de fluencia es diferente para cada pistón por la razón que tiene diferente módulo de Young o módulo de elasticidad, en el pistón de aluminio 7021 se pudo observar que no existen esfuerzos críticos ya que el esfuerzo de Von Mises calculado por el software es de **179.37 MPa** inferior al límite de fluencia del material calculado de **40414.51 MPa**, en el pistón de fábrica el esfuerzo de Von Mises calculado por el software es de **668.39MPa** que igualmente no es superior al límite de fluencia calculado de **46188.02 MPa**, por lo que se puede determinar que el pistón de fábrica y el pistón de aluminio 7021 no se encuentran en la zona de fluencia donde la deformación no es proporcional al esfuerzo aplicado y por ende no existirá falla.

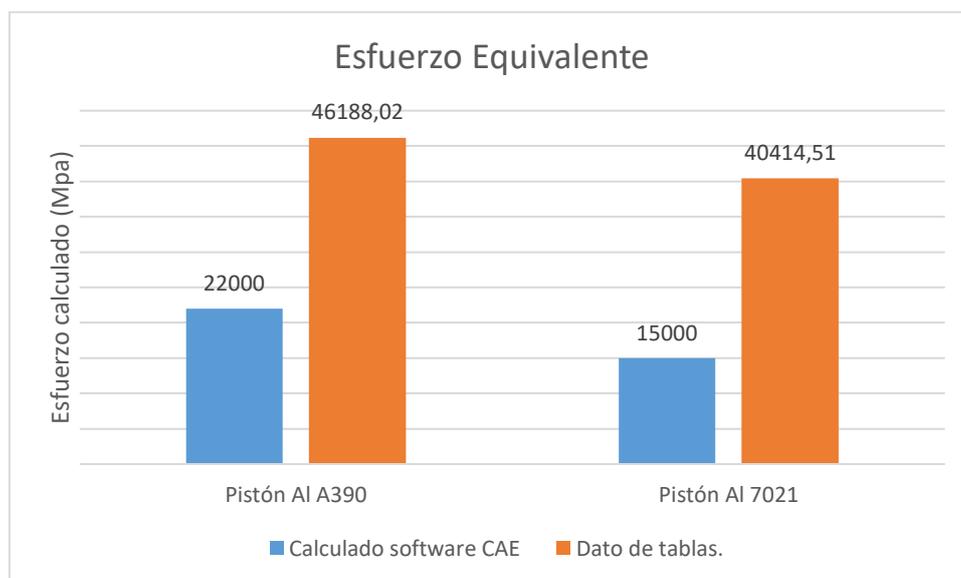


Figura No. 156. Valores de esfuerzo equivalente pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica Al A390.

6.1.3. Esfuerzo máximo.

Para el pistón de aluminio 7021 el software calculó un esfuerzo máximo de **76.53 MPa** el cual es inferior al módulo de elasticidad del aluminio 7021 de **70000 MPa** (tabla 5) , con el pistón de fábrica A390 se obtuvo un esfuerzo máximo de **261.37 MPa**, igualmente inferior al módulo de elasticidad del aluminio A390 de **80000 MPa** (tabla 8), por lo que se puede determinar que el pistón de fábrica y el pistón de aluminio 7021 se encuentra dentro de la zona elástica, es decir que al estar sometidos a las cargas externas y térmicas no presentarán deformaciones permanentes y no tendrán comportamiento plástico.

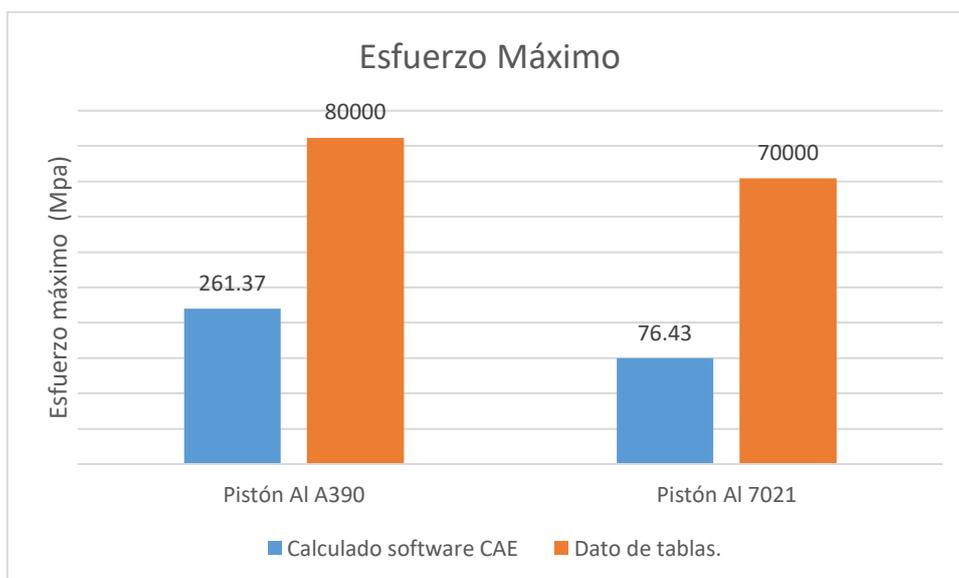


Figura No. 157. Valores críticos del esfuerzo máximo pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica.

6.1.4. Factor de seguridad.

Con el pistón de aluminio 7021 se obtuvo que el factor de seguridad mínimo para el pistón es de **2.11**, en los resultados se presentan pequeñas zonas que son propensas a falla por el hecho de que existen factores de lubricación y enfriamiento que no se consideró en el software CAE. Pero el factor de seguridad al ser mayor de 1 se considera que el pistón no presentará falla al estar dentro del rango del factor de seguridad.

Por otro lado, en el caso del pistón de fábrica A390 el factor de seguridad calculado por el software es de **0.4** el cual es inferior al valor de **1**, por lo que se espera que habrá falla, pero considerando que es el pistón de fábrica y los datos ingresados al software que dieron este factor de seguridad tan bajo son los correctos, el pistón no debería presentar tal falla, se debe tener en cuenta que los esfuerzos aplicados al pistón durante el tiempo de explosión son cíclicos y no

son constantes, sin olvidar que estos esfuerzos apenas duran milésimas de segundo, otro factor que hay que tener presente es que se desconoce que tratamientos térmicos fueron realizados a este tipo de pistón en su proceso de fabricación, por lo que se puede suponer que el pistón al ser tratado térmicamente mejora sus propiedades mecánicas y por ende su factor de seguridad aumenta.

6.1.5. Desgaste entre pistón y bulón.

En el desgaste simulado por el software entre el bulón y el pistón se puede observar que el pistón de fábrica, con un desgaste de $4,052 \text{ e}^{-6} \text{ mm}$, tiene una diferencia del 50 % en relación con el pistón de aluminio 7021 con un desgaste de $8,10 \text{ e}^{-6} \text{ mm}$, esto se debe a los diferentes tipos de aleaciones de los aluminios y su composición química, el pistón de aluminio 7021 contiene un 0.25 % de masa de Silicio y el pistón de aluminio A390 contiene un 16 % de masa de Silicio, aportando mejoras mecánicas al material aumentando la resistencia al desgaste.

6.2. Análisis de los datos de los ensayos de dureza posterior a los tratamientos térmicos.

Previo a realizar cualquier tratamiento térmico al pistón de aluminio 7021 hay que determinar qué tratamiento es el adecuado para que el pistón se homogenice estructuralmente y que se acondicione al ciclo de trabajo dentro del motor, por lo que a continuación se analiza los resultados obtenidos en el ensayo de dureza realizado a probetas sometidas a templado y envejecido a distintas temperaturas.

De acuerdo a la norma NTE INEN ISO 6506-1 se debe realizar 5 mediciones de dureza en

cada probeta para poder obtener un valor promedio de estas. En el capítulo 4 de este estudio se explica cómo fueron tratadas térmicamente las 8 probetas a las cuales se midieron su dureza para poder determinar que tratamiento térmico es el más adecuado para el pistón manufacturado.

Los datos obtenidos de este ensayo se lo pueden apreciar en la tabla 12, donde se observa las durezas obtenidas en las probetas después de ser tratadas térmicamente.

Tabla No. 12.

Datos recolectados del ensayo de dureza posterior a los tratamientos térmicos.

# PROBETA	PARÁMETROS DE LOS TRATAMIENTOS			DUREZA
	Temple a 420°C		ENVEJECIDO	
	agua desmineralizada.	aceite SAE 40.		
01 y 02	-	-	-	127 HB
03	X	-	-	50.6 HRF
04	-	X	-	40.8 HRF
05	X	-	5h a 130°C	99 HB
06	-	X	5h a 130°C	96.2 HB
07	X	-	5h a 210°C	87.2 HB
08	-	X	5h a 210°C	91.2 HB

Se puede observar que el aluminio 7021 al ser templado hizo que sus partículas de magnesio y zinc se separen por lo que el material se hizo más suave, teniendo un valor de dureza menor al del material base que es de 127 HB, saliendo del rango de medición de la dureza Brinell, por ese motivo su medición se la realizó con dureza Rockwell F.

La probeta #05 de aluminio 7021 presenta los mejores resultados, de esta manera llegando a una dureza de **99 HB** y así logrando llegar a igualar las propiedades del aluminio A390 que tiene una dureza de **100 HB** (tabla 9).

Por lo que los tratamientos térmicos recomendados y escogidos para ser aplicados al pistón

de aluminio 7021 es un temple a **420 °C** en agua desmineralizada a temperatura ambiente, para luego realizársele un envejecido a **130 °C** por un tiempo de **5 horas**, con esto se logra que el pistón se homogenice en toda su estructura y así de esta manera acondicionarlo a los ciclos del trabajo dentro del motor de combustión interna.

6.3. Análisis de curvas de potencia y torque

Se debe considerar que las pruebas dinamométricas realizadas con el pistón de fábrica y con el pistón de aluminio 7021 fueron hechas con las mismas condiciones ambientales y mecánicas. Los pequeños picos irregulares que se presentan en las curvas, se deben al contacto irregular que existe entre el rodillo del dinamómetro y el neumático.

En la figura 158 se observa las curvas generadas durante la prueba con el pistón de fábrica, la curva de potencia se la aprecia de color rojo y la curva de torque de color azul, la potencia máxima obtenida fue de **15.32 HP @ 8000 rpm** como se ve en el punto A, en el punto B se aprecia el torque máximo que resultó de **10.60 Lb.in @ 6500 rpm** y en el punto C la mayor eficiencia de **13 HP / 10.60 Lb.in @ 6500 rpm**.

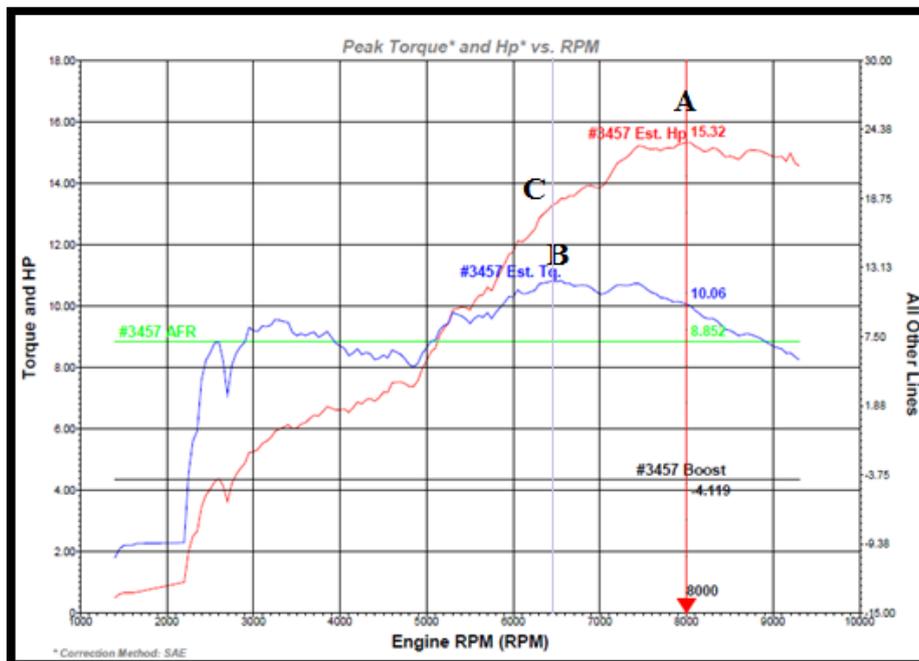


Figura No. 158. Gráfica de potencia y torque pistón de fábrica.

En la figura 159 se observa las curvas generadas durante la prueba con el pistón de aluminio 7021, la potencia máxima obtenida fue de **18.2 HP @ 7000 rpm** como se ve en el punto A, en el punto B se aprecia el torque máximo que resultó de **15.30 Lb.in @ 6000 rpm** y en el punto C la mayor eficiencia de **17.5 HP / 15.3 Lb.in @ 6000 rpm**.

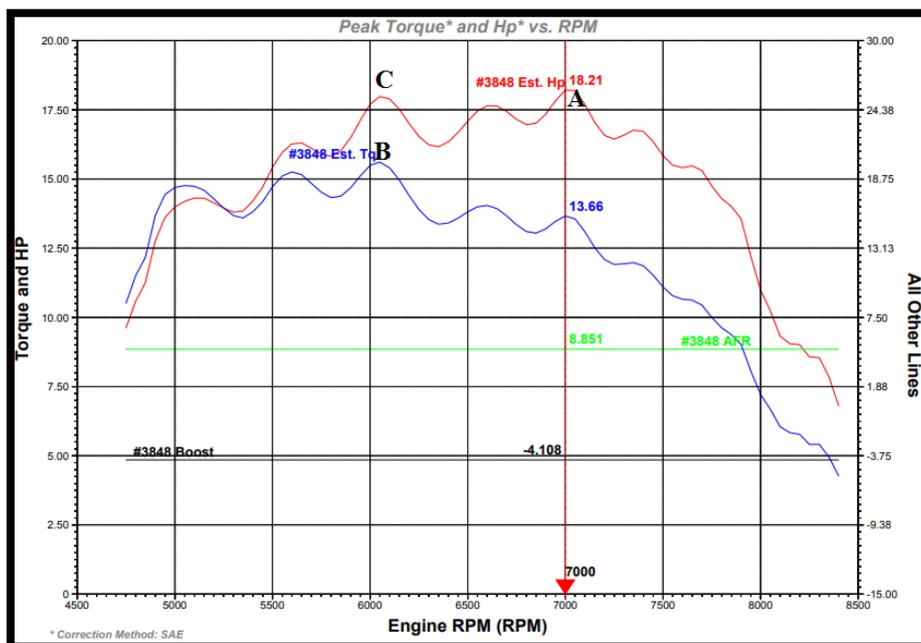


Figura No. 159. Gráfica de potencia y torque pistón de aluminio 7021.

Al comparar el comportamiento de ambos pistones, se observa una notable mejoría con el pistón de aluminio 7021, el torque máximo obtenido con el pistón de fábrica A390 es de **10.60 Lb in** y con el pistón de aluminio 7021 se obtuvo un torque máximo de **15.30 Lb.in**. Claramente con el pistón de aluminio 7021 se observa un aumento de torque de **4.7 Lb in** que representa una mejora del **44.33 %** con respecto al pistón de fábrica.

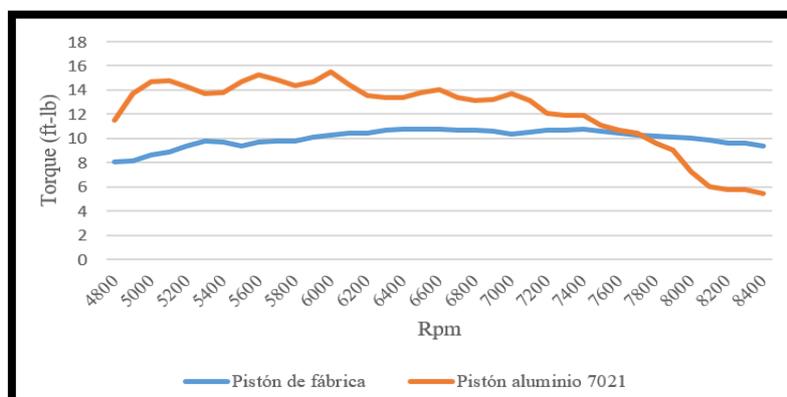


Figura No. 160. Gráfica comparativa de curvas de torque entre el pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica.

Con respecto a la potencia del motor también se aprecia una mejoría con el pistón de aluminio 7021, la potencia máxima obtenida con el pistón de fábrica A390 es de **15.32 HP** y con el pistón de aluminio 7021 se obtuvo una potencia máxima de **18.2 HP**. Con el pistón de aluminio 7021 se observa un aumento de la potencia máxima de **2.88 HP** que representa una mejora del **18.8 %** con respecto al pistón de fábrica.

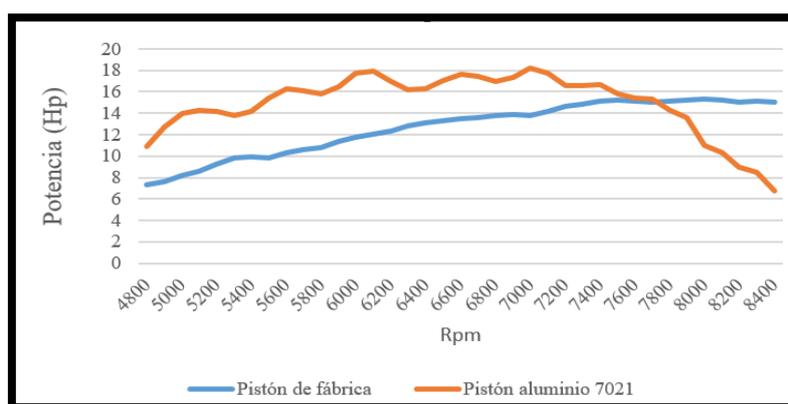


Figura No. 161. Gráfica comparativa de curvas de potencia entre el pistón de aluminio 7021 vs. pistón de fábrica.

Se puede concluir que esta mejoría se debe a que el pistón de aluminio 7021, en el análisis CAE, presentó una dilatación térmica del **0.10 %** aproximadamente en las coordenadas X y Z, mientras que el pistón de fábrica tiene una dilatación térmica de apenas del **0.06 %**, al dilatarse más el pistón de aluminio 7021 se produce un menor espacio de luz entre el cilindro y el pistón resultando en un mejor sellado del cilindro y aumentando la compresión de este, por ende hay una mejora en el rendimiento del motor.

6.4. Viabilidad del pistón de aluminio 7021.

Para poder dar viabilidad al estudio realizado con la construcción del pistón en aluminio

7021, se hizo un análisis del comportamiento del pistón dentro del motor durante su ciclo de trabajo; posterior a la prueba dinamométrica se realizó una prueba de ruta a la motocicleta con el pistón manufacturado.



Figura No. 162. Pistón manufacturado montado en el motor de combustión interna de la motocicleta.

De acuerdo con el manual de usuario de la motocicleta, se recomienda realizar el primer cambio de aceite del motor, si este ha sido reparado, después de recorrer **500 Km**, por lo que esta distancia se la tomó como periodo de prueba para determinar el comportamiento del pistón dentro del motor. En la prueba de ruta se probó a la motocicleta haciéndola recorrer a distintas ciudades del país, para así, aprovechando las cuestas y pendientes que estas vías poseen, poner a prueba el desempeño del motor con el pistón manufacturado.

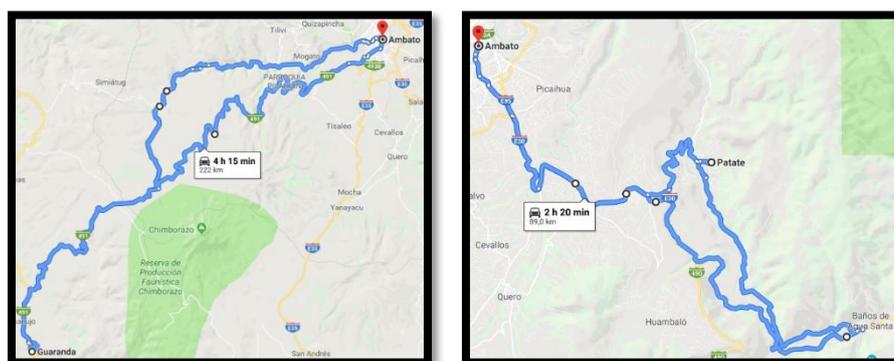


Figura No. 163. Pruebas de ruta realizadas con la motocicleta.

Recorrido el kilometraje establecido, se realizó el desmontaje del pistón del motor para observar su estado y analizarlo. En la figura 164 se aprecia que el pistón presenta señales de gripaje en su falda y los alrededores de eje del bulón.



Figura No. 164. Pistón después de haber funcionado 500km.

Según el manual de fallas de pistones de MSI Motor Service International, este tipo de falla en la parte baja de la falda se da por falta de holgura en los extremos inferiores del pistón en el lado de presión y contrapresión del mismo, este juego insuficiente se produce por la deformación del pistón provocando un roce entre este y las paredes del cilindro, destruyendo la película de aceite entre estos dos elementos.



Figura No. 165. Reconocimiento de falla de gripado en la falda del pistón.

En el sector del eje del bulón también se observa un gripado que, de acuerdo al manual de fallas de pistones de MSI Motor Service International, es producto de la dilatación producida en esta área por el roce entre el bulón y pistón, provocando un ajuste de lubricación reducido entre el pistón y el cilindro, se debe resaltar que este pistón trabaja con un bulón flotante, por lo que este tipo de fallas son muy comunes en esta disposición de bulón.

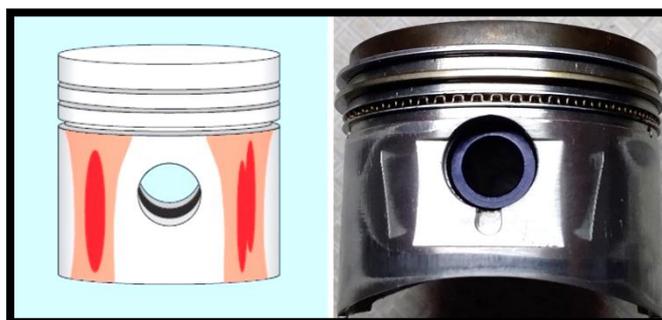


Figura No. 166. Reconocimiento de falla de gripado en los alrededores del eje del bulón.

Durante la prueba de ruta de 500 Km el pistón demostró un buen desempeño y rendimiento durante todo el trayecto, de esta manera confirmando los resultados obtenidos con la prueba dinamométrica, cabe resaltar que no se presentó consumo de aceite de motor, pero al terminar la prueba el pistón presentó las fallas de gripaje ya mencionadas, tomando en cuenta las deformaciones generadas en el análisis CAE se puede mejorar la fiabilidad del pistón verificando la tolerancia de holgura durante el proceso de mecanizado para evitar fallas de gripaje.

Las fallas de gripaje presentadas en el pistón se deben a que el aluminio 7021 tiene un coeficiente de dilatación más elevado que el pistón de fábrica, por el hecho de que contiene un porcentaje de **0.25%** de silicio en su estructura, cual valor es muy pequeño en comparación al aluminio A390 que contiene un **16%** de silicio, por lo que esto se verá reflejado en un mayor

rozamiento entre el pistón y el cilindro. En la figura 167 se puede observar la diferencia del estado de la falda del pistón de fábrica con respecto al manufacturado después de haber trabajado el mismo kilometraje.

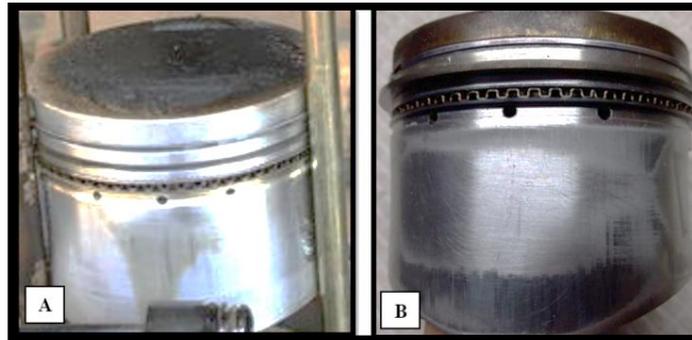


Figura No. 167. A. Estado de la falda de pistón de fábrica; B. Estado de la falda de pistón de aluminio 7021.

En el diseño del pistón manufacturado se tomó en cuenta la geometría del pistón de fábrica, teniendo presente los detalles y acabados que presenta, pero al llegar el mecanizado se debe contemplar ciertas restricciones que tienen las herramientas de la CNC para el mecanizado de zonas de difícil acceso, cabe recalcar que algunas herramientas son de coste muy elevado y varias no son posibles encontrar en el país, por lo que se debe trabajar con las herramientas que se dispongan en el mercado, tratando de garantizar que se obtenga el mejor resultado posible.

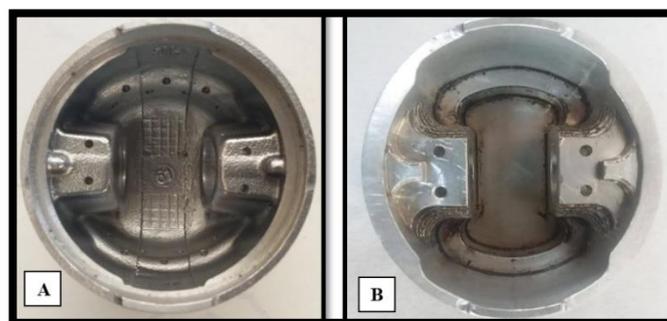


Figura No. 168. A: interior del pistón de fábrica A390; B: interior del pistón de aluminio 7021.

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones.

- Del análisis microestructural se pudo determinar que el aluminio utilizado en los pistones de fábrica de la motocicleta marca ICS, presenta una microestructura constituida por silicio y cobre, según la comparación realizada del Metal Handbook, es una aleación de aluminio con denominación A390.
- Se pudo determinar mediante cálculos matemáticos que el pistón recibe el mayor esfuerzo de trabajo en el ciclo de explosión, en el cual se genera una presión **de 4.0015 MPa** sobre la cabeza del pistón.
- Gracias al ensayo de compresión se logró determinar que el punto de fractura del pistón de fábrica A390 se presentó a una presión de **11 MPa**.
- Para el modelado CAD se tomó en cuenta la geometría del pistón, orientado y pensado para el proceso de mecanizado CAM, teniendo presente las restricciones que presenta la máquina CNC y sus herramientas para realizar detalles o llegar a lugares de difícil acceso.
- Se analizó mediante el software CAE los puntos críticos del pistón en aluminio 7021 con relación al pistón de fábrica A390 en deformaciones direccionales, esta diferencia entre ellos es de **0.10%** en X, **0.52%** en Y y **0.08%** en Z, lo que significa que el pistón de aluminio 7021 tendrá mayor dilatación.
- Se realizó la manufactura del pistón a partir de un bloque de aluminio 7021 gracias a

una máquina CNC, con la ayuda de las líneas de comando generados por el software CAM mediante los procesos simulados en el mismo y a la selección de las herramientas correctas para un mecanizado de precisión.

- Gracias a los tratamientos térmicos aplicados en el pistón de aluminio 7021 se obtuvo una dureza de **99 HB**, logrando de esta manera equiparar el valor de dureza del pistón de fábrica, el cual tiene una dureza de **100 HB**, permitiendo que el pistón se acondicione al ciclo de trabajo dentro del motor.
- En el proceso de mecanizado por CNC, el acabado superficial del pistón de aluminio 7021 obtuvo propiedades mecánicas distintas que al de su estructura interna, por lo que gracias al tratamiento térmico se logró homogenizar estructuralmente al pistón.
- El pistón al realizar el ciclo de prueba dinamométrica y de ruta establecida de 500 Km, presentó fallas de gripaje en la falda por falta de juego entre el pistón y el cilindro, esto se debe a la deformación del **0.10 %** aproximadamente en las coordenadas X y Z que presenta el pistón de aluminio 7021, que es mayor al del pistón de fábrica A390 que tiene una deformación de apenas del **0.06 %**.
- Mediante las pruebas dinamométricas se pudo determinar que con el pistón de aluminio 7021 se obtuvo un aumento del torque y de potencia en un **44.33%** y **18.8%** respectivamente, esto se debe a que el pistón de aluminio 7021 presenta una dilatación térmica mayor, produciendo un mejor sellado del cilindro y aumentando la compresión de este.
- Se pudo dar viabilidad al proyecto respecto al comportamiento del pistón manufacturado en la prueba dinamométrica y de ruta, obteniendo resultados de desempeño dentro de los parámetros esperados, llegándose a comparar con los del pistón de fábrica, en cuanto al estado de gripaje observado después de las pruebas, hay

que considerar el juego del pistón con el cilindro, teniendo muy en cuenta las deformaciones obtenidas en la simulación CAE del aluminio 7021 para evitar fallas de gripaje nuevamente.

7.2. Recomendaciones.

- Las probetas a ser sometidas al análisis microestructural, debe tener un buen pulido para que al ser observadas con el microscopio se pueda tener imágenes claras del material que se quiere caracterizar.
- Es el software CAE es necesario ingresar la mayor cantidad de datos de los materiales y de las condiciones de las simulaciones, con el objetivo de obtener resultados lo más cercanos a la vida real.
- Para el proceso de manufactura CAM se debe tomar en cuenta la tolerancia que especifica el radio de cada herramienta a utilizar en el proceso de mecanizado.
- Previo a realizar un tratamiento térmico, se debe tener en cuenta las propiedades del aluminio a tratar, y conocer de qué familia de aleaciones pertenece para saber qué tipos de tratamientos son capaces de soportar.
- Para determinar que tratamientos térmicos son los más factibles se deben realizar varias pruebas y ensayos mecánicos para poder determinar que tratamiento térmico es el más efectivo o con cual se obtuvo mejores resultados.
- Por los resultados observados en el pistón después de 500 Km de funcionamiento, se puede recomendar que este tipo de pistones manufacturados en aluminio que carece de silicio en su estructura, pueden ser utilizados en motores estacionarios que trabajan a rpm estables, de esta manera se elimina el sobre esfuerzo que se produciría en un motor

de vehículo o de motocicleta.

- Para que sea viable la construcción de este tipo de pistones en aluminio 7021, se debe tener en cuenta, desde su diseño, las características que tiene este aluminio respecto a las deformaciones térmicas, para que tenga un ajuste correcto dentro del cilindro, esto también está ligado a la tolerancia y precisión del mecanizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3DCadPortal. (2019). Obtenido de CATIA for Shape Design:
<http://www.3dcadportal.com/catia.html>
- Alonso, J. (1996). *Técnica del automovil motores*. Madrid: International Thomson Publishing Company.
- AlumiCopper. (2018). *Aluminio 7021*. Recuperado el 05 de Abril de 2019, de Especializada en Aluminio: http://www.alumicopper.com.br/es/produtos_aluminio_7021.html
- ANAYAK. (s.f.). Manual . En ANAYAK, *Manual de funcionamiento* (pág. 10).
- AutoLab. (30 de Abril de 2018). *Qué es y para qué sirve el pistón*. Recuperado el 03 de Febrero de 2019, de AutoLab: <https://autolab.com.co/blog/piston/>
- Bosch, R. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. Alemania: ISBM.
- Cavazos. (10 de Octubre de 2016). *Ensayo de Compresión Teoría*. Recuperado el 15 de Marzo de 2019: <https://www.youtube.com/watch?v=HKN3oGjFQnw>
- CEAC. (2004). Manual CEAC del automóvil. En CEAC, *Manual CEAC del automóvil*. (pág. 74). Barcelona: Hermógenes.
- Colombo. (09 de Marzo de 2018). *SHINERAY XY 150 MAX FIRE*. Recuperado el 15 de Marzo de 2019:
<https://www.colombomotors.com.br/?carregar=motos&detalhar=153&termo=XY>
- Crouse, W. (1993). Mecanica del Automovil . En W. Crouse, *Mecanica del Automovil* (pág. 126). Barcelona : MarCombo.
- Dani Meganeboy. (2014). *Elementos móviles del motor*. Recuperado el 15 de Marzo de 2019, de Aficionados a la Mecánica: <http://www.aficionadosalamecanica.net/motor-elementos-moviles.htm>

EcuRed. (2019). *EcuRed*. Obtenido de Diseño asistido por computadora:
https://www.ecured.cu/Dise%C3%B1o_asistido_por_computadora

El automóvil al desnudo. (30 de Noviembre de 2012). *Motores de combustión interna en automoción (Parte VIII)*. Recuperado el 18 de Enero de 2019, de El automóvil al desnudo:
http://jeroitim.blogspot.com/2012/11/motores-de-combustion-interna-en_30.html

ELECTRIC, S. (2017). Obtenido de Qué son los programas CAD, CAE y CAM:
<http://electricistas.schneider-electric-lam.com/2017/12/27/que-son-los-programas-cad-cae-cam-schneider-electric-co/>

Engineering. (2019). *Engineering*. Obtenido de CAE:
<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/9907/How-Do-I-Integrate-Simulations-from-Variou-C-A-E-Packages-into-PLM.aspx>

Eraso, E. (2019). *Torque y Potencia*. Recuperado el 08 de Enero de 2019, de Manualdeduardo:
<https://sites.google.com/site/manualdeduardo/Home/torque-y-potencia>

Foreca. (20 de 12 de 2018). *tiempoytemperatura*. Obtenido de tiempoytemperatura.:
<http://tiempoytemperatura.es/ecuador/ambato.html#por-horas>

García, R. (2018). *Segmentos del Pistón*. Recuperado el 05 de Febrero de 2019, de Ingeniero Marino:
<https://ingenieromarino.com/segmentos-del-piston/#.XMEFOOhKjIU>

Gillieri, S. (2005). Preparación de motores de serie para competición. En S. Gillieri, *Preparación de motores de serie para competición* (págs. 104-105). España: Ceac.

Greenlandmx. (1 de 06 de 2017). *Cómo saber la medida del pistón que necesito*. Recuperado el 01 de Diciembre de 2018, de Cómo saber la medida del pistón que necesito:
<https://www.greenlandmx.com/es/blog/como-saber-la-medida-del-piston-que-necesito>

Handbook, M. (1988). *ASM International*. Joseph R. Davis.

- Imbaquingo Navarrete, R. P., & Puente Chiluisa, E. F. (2011). *Determinación de la capacidad mecánica de carga de diferentes bielas utilizadas en los vehículos Kía Rio, Corsa Evolution y Volkswagen Gol mediante análisis de esfuerzos experimental y por elementos finitos con un análisis metalográfico de las mismas*. Latacunga: Escuela Politécnica del Ejército extensión Latacunga. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/4994/1/T-ESPEL-0860.pdf>
- Información CAD/CAM. (26 de 09 de 2016). *Información CAD/CAM*. Obtenido de <https://informacioncadcam.blogspot.com/2016/09/cam.html>
- Jóvaj. (1982). En Jóvaj, *Motores de Automóvil* (pág. 491). MIR. Moscú.
- Jóvaj. (1982). Motores de Automóvil. En Jóvaj, *Motores de Automóvil* (pág. 89). MIR.Moscú.
- Leão, L. (19 de octubre de 2017). Obtenido de Blog de Ingeniería Eléctrica Moderna: <https://www.e3seriescenter.com/blog-de-ingenieria-electrica-moderna/cad-vs-cae-vs-cam-diferencias>
- MecanicaFacil. (2019). *Pistón*. Recuperado el 2 de Abril de 2019, de Mecánica Fácil: <http://www.mecanicafacil.info/Piston.html>
- Mena Rodríguez, M. A. (Septiembre de 2014). *Estudio y Análisis Teórico - Práctico de un Motor Suzuki G10 previo y posterior a su trucaje*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Recuperado el 23 de Enero de 2019, de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8963/1/T-ESPEL-MAI-0484.pdf>
- Minford. (8 de Septiembre de 2018). *MakeItFrom*. Obtenido de A390 Aluminum: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/A390.0-F-Cast-Aluminum>
- Motores. (2019). *Bulón*. Recuperado el 09 de Abril de 2019, de Anatomía de los distintos tipos de motores y maquinas térmicas y sus componentes.: <https://sites.google.com/a/ieselcano.es/motores/componentes-motor-ci/segmentos-1>

Motorservice, Technical Market Support. (11 de 2014). *Daños de pistones - detección y reparación. Motor Service* (Cuarta ed.). MS Motorservice International GmbH. Obtenido de Motor Service: https://www.ms-motorservice.com/fileadmin/media/MAM/PDF_Assets/Da%C3%B1os-de-pistones-detecci%C3%B3n-y-reparaci%C3%B3n_51717.pdf

MS Motorservice International GmbH. (24 de 10 de 2018). *Daños de pistones y sus causas*. Recuperado el 2019, de Motorservice TechniPedia: <https://www.ms-motorservice.com/es/tecnipedia/post/danos-de-pistones-y-sus-causas/>

MS Motorservice International GmbH. (2019). *Holgura de las juntas de los segmentos del pistón y consumo de aceite*. Recuperado el 25 de Abril de 2019, de Motorservice: <https://www.ms-motorservice.com/es/tecnipedia/post/holgura-de-las-juntas-de-los-segmentos-del-piston-y-consumo-de-aceite/>

MSI Motor Service Internacional GmbH. (04 de 2008). *Daños de pistones, Detección y reparación*. Neuenstadt am Kocher, Alemania.

Mundo Pistón. (23 de 10 de 2018). *Catálogo 01 / 2015*. Recuperado el 01 de Diciembre de 2018, de Catálogo 01 / 2015: <https://www.mundopiston.com/catalogo/MP%20Catalogo%20Equipos%20Asiaticos%20012015%20Apaisado%20Web.pdf>

Nisbett, R. B. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico: McGraw-Hill.

Oocities. (Octubre de 2009). *Piston*. Recuperado el 04 de Enero de 2019, de Oocities: http://www.oocities.org/ar/arojungletour_mecanica/piston.htm

Race Car Academy. (16 de Marzo de 2016). *Selección de los pistones de un motor*. Recuperado el 09 de Enero de 2019, de Race Car Academy: <http://www.racecaracademy.com/seleccion-de-los-pistones-de-un-motor/>

- Rodríguez, H. (2019). *La Potencia y el Par Motor, Estudio de la Cadena Cinemática, Estabilidad en los Vehículos*. Recuperado el 20 de Abril de 2019, de Ingemecánica: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn63.html>
- Sánchez Camarco, E. (2010). *Cálculo y diseño de un pistón de aluminio*. México D.F.: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado el 12 de Enero de 2019, de <https://es.scribd.com/document/237465165/Calculo-y-Disenio-de-Un-Piston-de-Aluminio>
- Santiuste, C. (8 de Septiembre de 2015). Obtenido de Elasticidad y resistencia de materiales.: https://www.youtube.com/watch?v=IJ_ZSXMxaFY&t=594s
- SHINERAY. (5 de Mayo de 2015). *Ficha técnica*. Obtenido de SHINERAY MOTOS: <http://shineraymotos.livreforum.com/t13-ficha-tecnica>
- Siemens. (2019). *Diseño asistido por ordenador (CAD)*. Obtenido de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>
- Siemens. (2019). *Ingeniería asistida por ordenador (CAE)*. Obtenido de <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>
- Simmang, F. (1983). *Termodinámica*. Mexico : Hispano Americana.
- Suminox. (13 de 03 de 2018). *Suminox*. Obtenido de <http://www.suminoxaceros.com/products/ET-7021.pdf>
- Todo Autos. (30 de Enero de 2018). *Torque y Potencia de un motor. ¿Sabes realmente lo que son?* Recuperado el 21 de Enero de 2019, de Todo Autos: <http://www.todoautos.com.pe/portal/auto/mecanica/1808-torque-y-potencia-de-un-motor-isabes-realmente-lo-que-son>

Unknown. (26 de 09 de 2016). Obtenido de Diseño CAD/CAM:
<https://informacioncadcam.blogspot.com/2016/09/cam.html>

Víctor Hernández, Rodrigo Cruz ,Otero Tinajero, Ismael Harris, Osiel Morales, Carlos Aguilar, Vázquez N, Omar Aguilar , Alfaro Mario, Jorge Silva, Sinhué López. (2010). *Consideraciones en el diseño de pistones para motores a cuatro tiempos*. México D.F.: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado el 15 de Enero de 2019, de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/sahagun/n3/e1.html>

Yasaca, F. G. (24 de 10 de 2018). *Los pistones*. Recuperado el 24 de Enero de 2019, de Monografias: <https://www.monografias.com/trabajos96/pistones/pistones2.shtml>

ANEXOS



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: **JONATHAN PATRICIO ROMERO PAILLACHO** y **ANDRÉS SANTIAGO VELÁSQUEZ GARCÍA**

En la ciudad de Latacunga, a los 03 días del mes de junio del 2019.

Ing. Mauricio Cruz

DIRECTOR DE PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Danilo Zambrano

DIRECTOR DE LA CARRERA

Dr. Darwin Albán

SECRETARIO ACADÉMICO