



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA
AUTOMOTRIZ

**“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.

ING. MAURICIO CRUZ ARCOS
DIRECTOR DE TESIS



ANTECEDENTES

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.



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.



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)



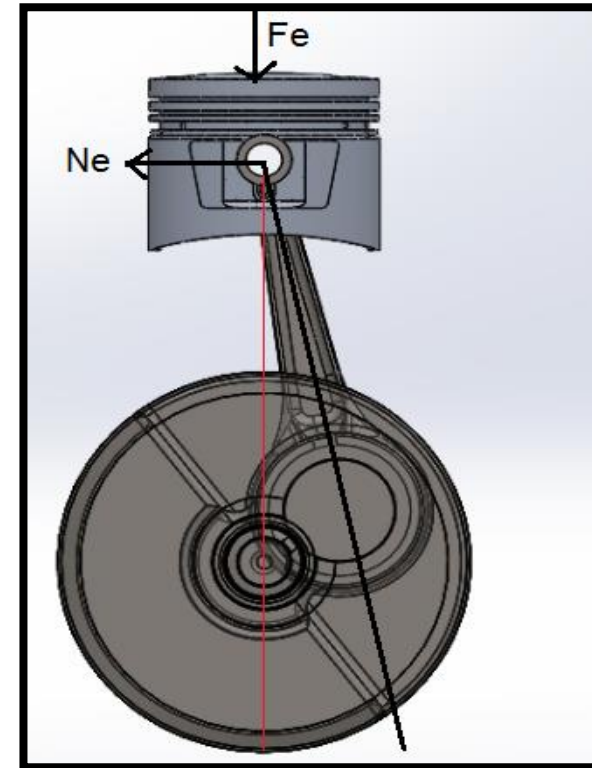
FICHA TÉCNICA DE LA MOTOCICLETA ICS 150 CC.

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

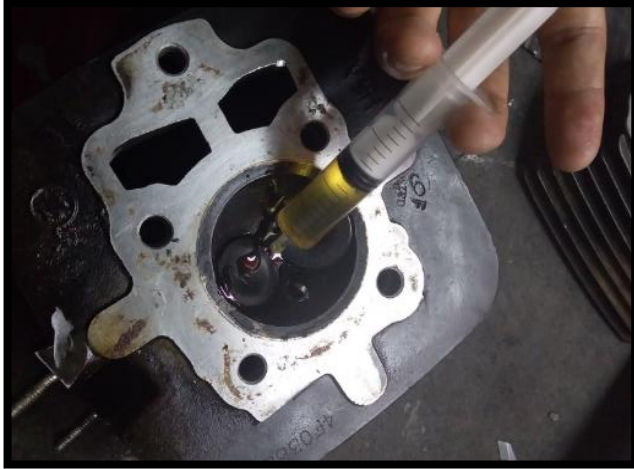


CÁLCULOS DE ESFUERZOS SOMETIDOS AL PISTÓN

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.



Medición de la cámara de combustión.



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

Medición del diámetro del pistón.



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

Medición de la carrera del pistón.



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

- Diámetro del Pistón = $61.30 \text{ mm} \rightarrow 6.13 \text{ cm}$
- Carrera = $49.4 \text{ mm} \rightarrow 4.94 \text{ cm}$
- Volumen de la cámara = 19.56 cm^3



Presión de admisión.

P_0 = Presión inicial (Pa).

β = Coeficiente de amortiguación de la velocidad

$P_a = P_0 - (\beta^2 + \xi) \frac{wad^2}{2} \rho_0 \cdot 10^{-6}$ de la sección examinada del cilindro (adimensional).

$$P_0 = 1016hPa \text{ (101600Pa)}$$

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

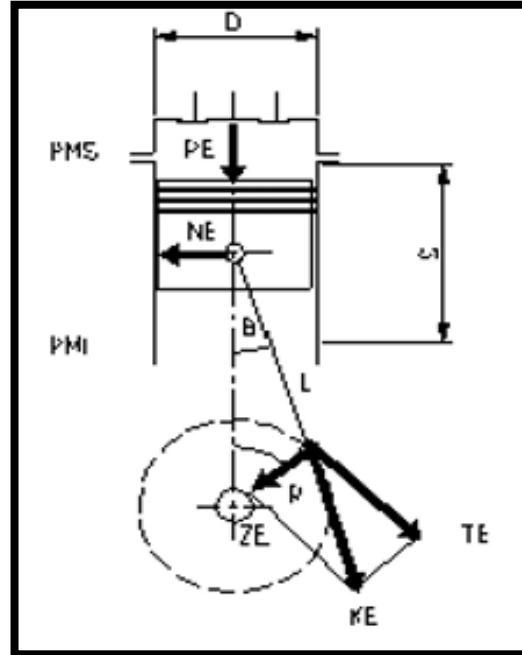
$$P_a = 0.10 \text{ MPa}$$

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).



Fuerza aplicada en la cabeza del pistón (F_e).



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

$$P_c = 1.50 \text{ MPa}$$

$$P_z = 4.0015 \text{ MPa}$$

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

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

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



ENSAYOS Y PRUEBAS

Ensayo metalográfico del pistón de fábrica.

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



Preparación de probetas

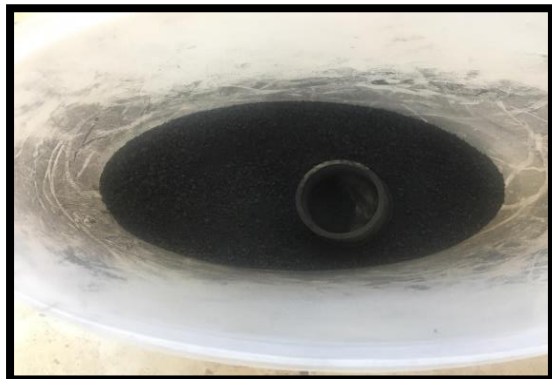
Corte del material



Lijado de la probeta



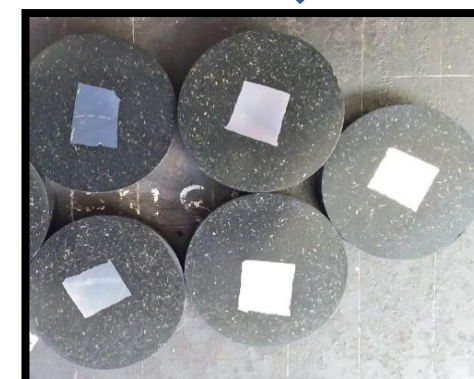
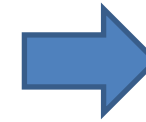
Pulido de la probeta



Polvo fenólico de baquelita negro



Compactado de la probeta



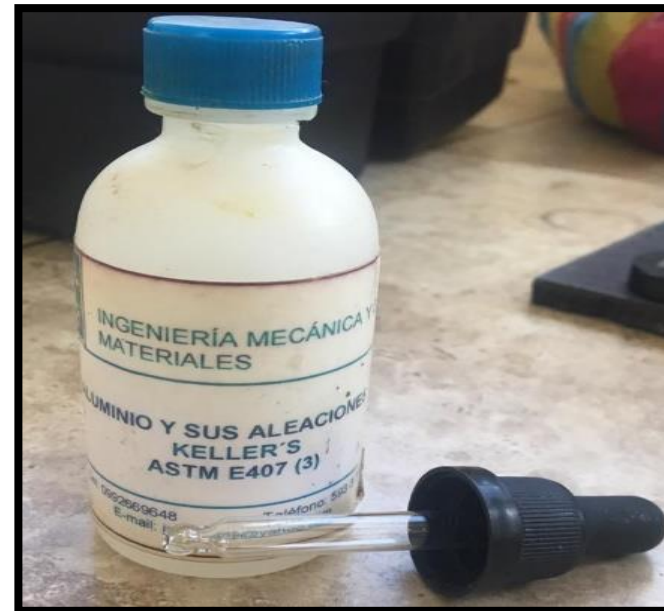
Probetas.

Fotografiado micrográfico



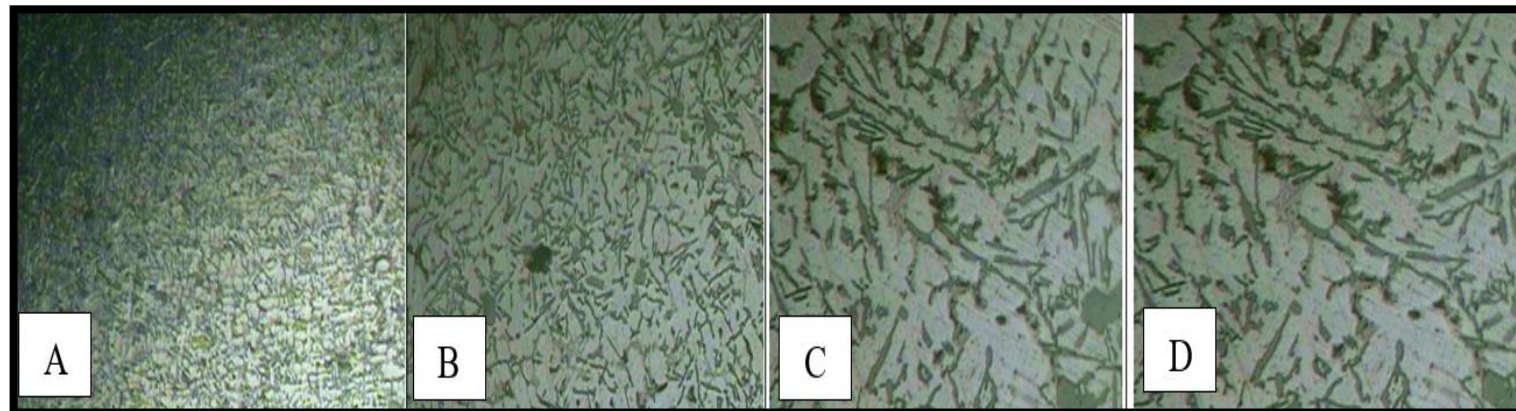
El microscopio metalográfico de marca **Vanguard** fue utilizado para la obtención de fotografías micro estructurales de las probetas a analizar, con el objetivo de determinar el material del pistón de fábrica

El Keller ASTM E-407

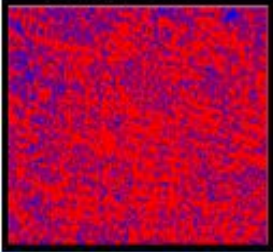
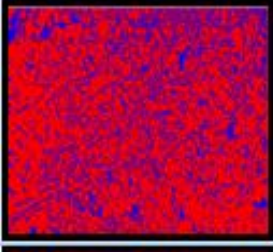
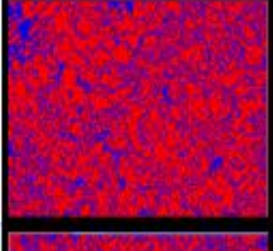
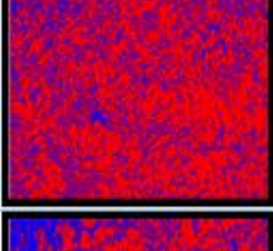
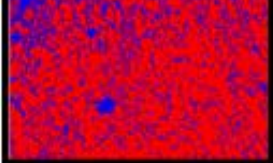


RESULTADOS OBTENIDOS

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



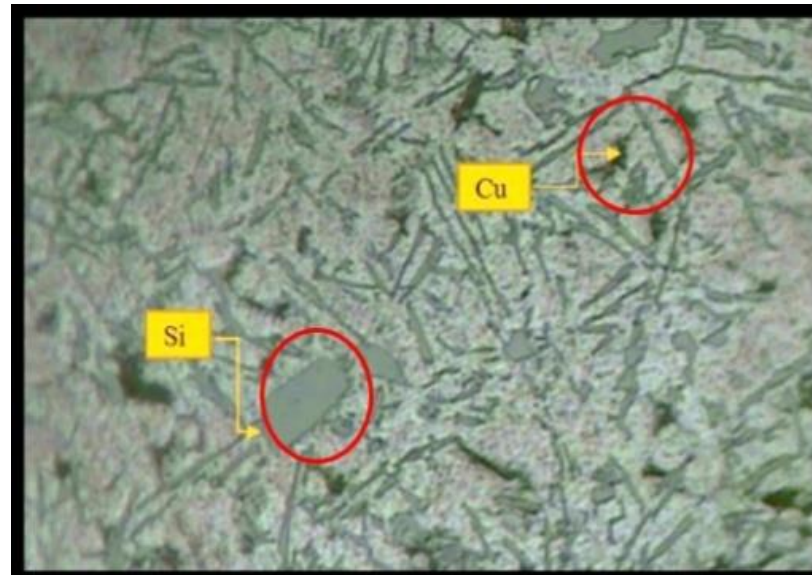
Grados y porcentajes de la fase alfa y beta en las probetas

# 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	



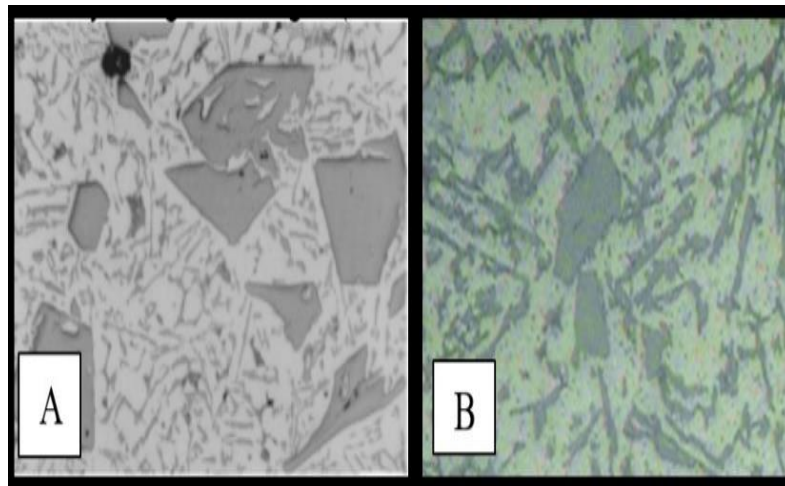
RESULTADOS OBTENIDOS

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.



RESULTADOS OBTENIDOS

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**.



A: aleación A390 tomada del Metal Handbook .

B: imagen del ensayo metalográfico del pistón de fábrica .

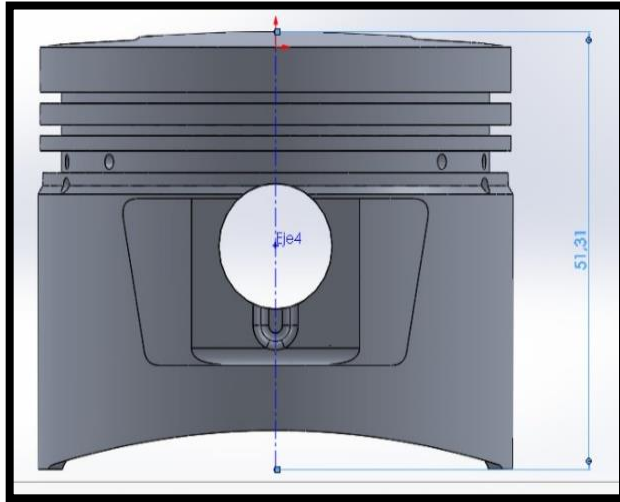
Aluminum , $\geq 99.00\%$	1xx
Aluminum alloys gruped by major alloying elements:	2xx.x
Copper	
Silicon ,with added copper and /or magnesium	3xx.x
Silicon	4xx.x
Magnesium	5xx.x
Zinc	7 xx.x
Tin	8 xx.x
Other elements	9 xx.x
Unused series	6 xx.x

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.



Razón de esbeltez



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

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

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

Donde:

I = Momento de inercia de la probeta.

A = Área.

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

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

$$\rho = 3.34$$

$\rho < 40$ = Compresión

$\rho > 60$ = Columna

Donde:

ρ = Razón de esbeltez.

rg = Radio de giro.

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



Procedimiento del ensayo de compresión

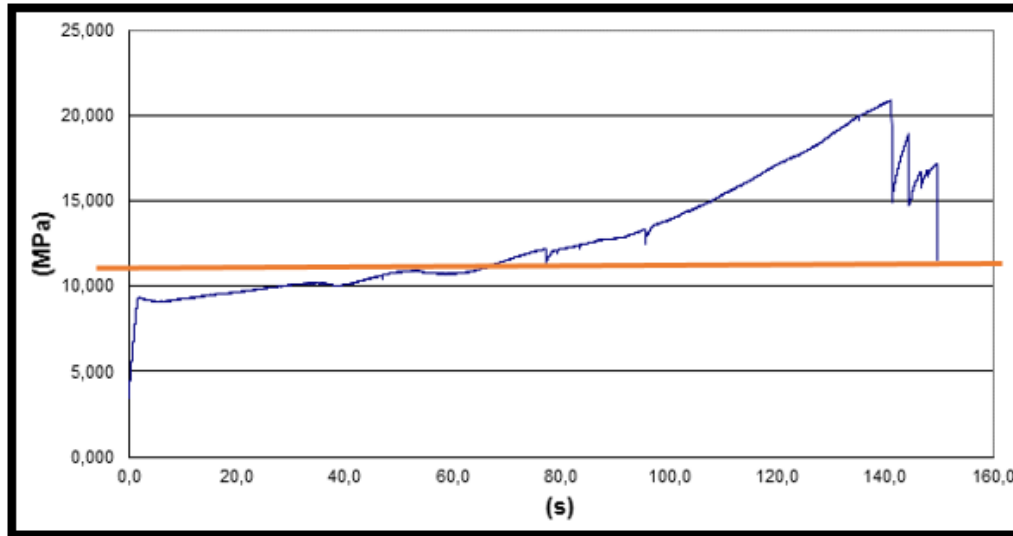
El ensayo se realizó en el laboratorio de ingeniería civil de la Universidad Técnica de Ambato, con la máquina de ensayo de compresión de la marca **Controls**, con una capacidad de hasta 5000 kN, bajo la supervisión del laboratorista encargado.



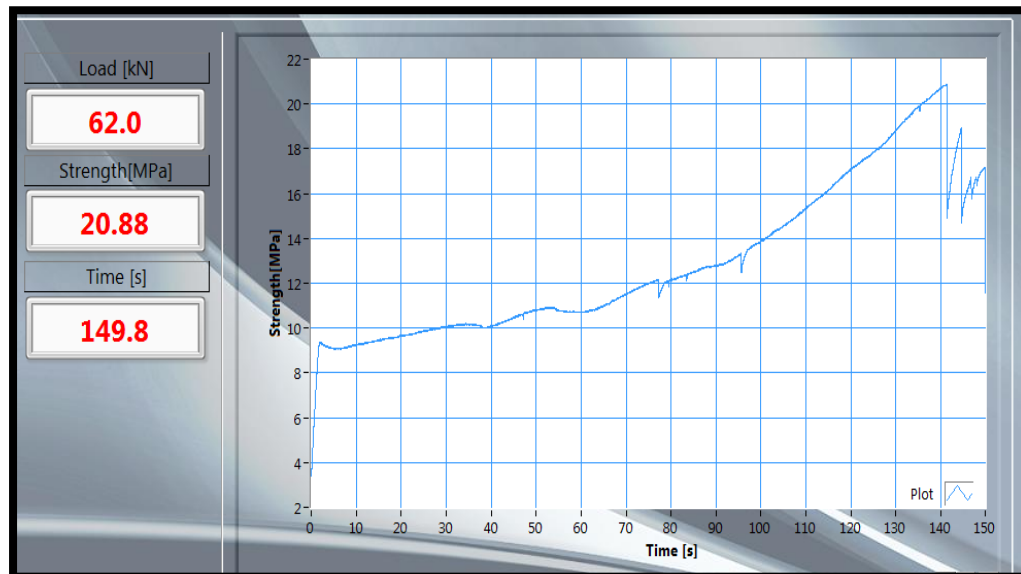
El pistón fue sometido a una presión de 0 a 20.88 MPa durante un tiempo de 149.8 segundos, hasta el punto de la ruptura, soportando una fuerza total de 62 KN.



Resultados de ensayo



Curva fuerza (MPa) vs. tiempo(s)
programa Excel



Curva fuerza (MPa) vs tiempo(s)
módulo de la máquina



Fotografía del pistón



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 $Pz = 4.0015 \text{ MPa}$.



CONSTRUCCIÓN DEL PISTÓN EN ALUMINIO 7021

Modelado en el software CAD.

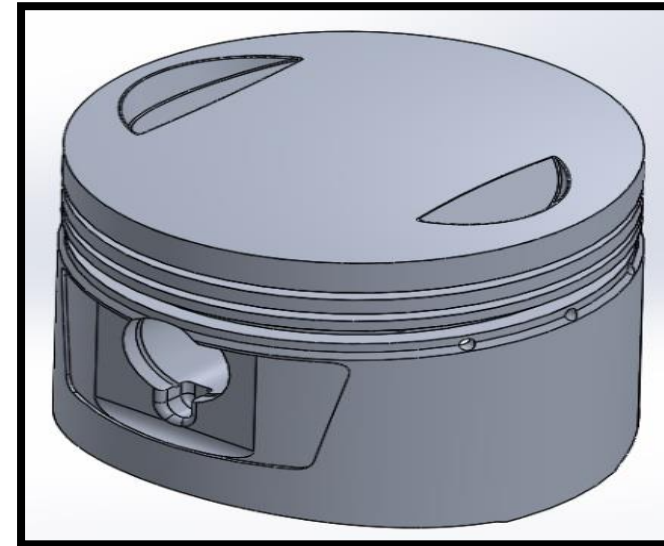
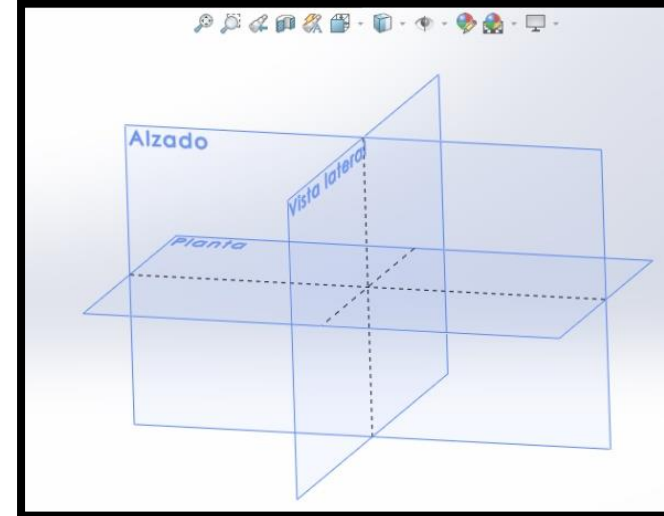
Teniendo en cuenta la geometría del pistón de fábrica se procede a realizar las mediciones necesarias del pistón con ayuda de herramientas de medición exactas, como calibrador pie de rey y micrómetro o calibrador de exteriores.



Modelado en el software CAD.

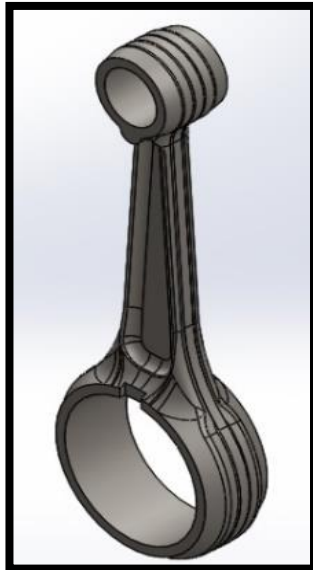
Para comenzar con el modelado, se debe empezar con realizar un croquis inicial en uno de los planos que ofrece el software CAD.

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

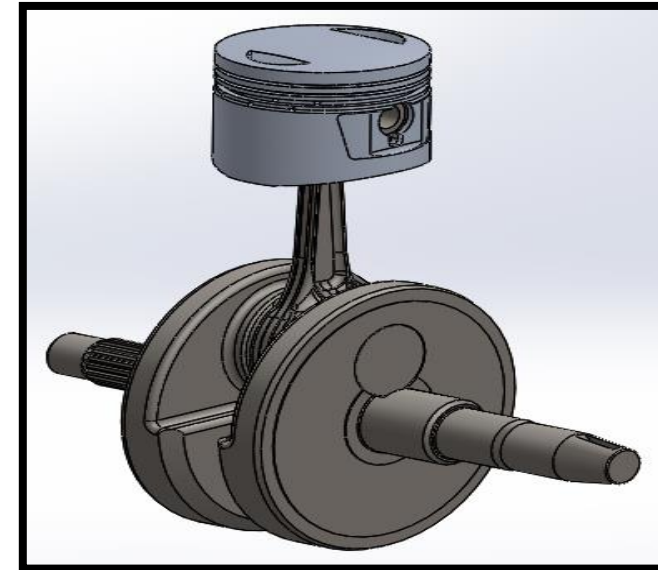
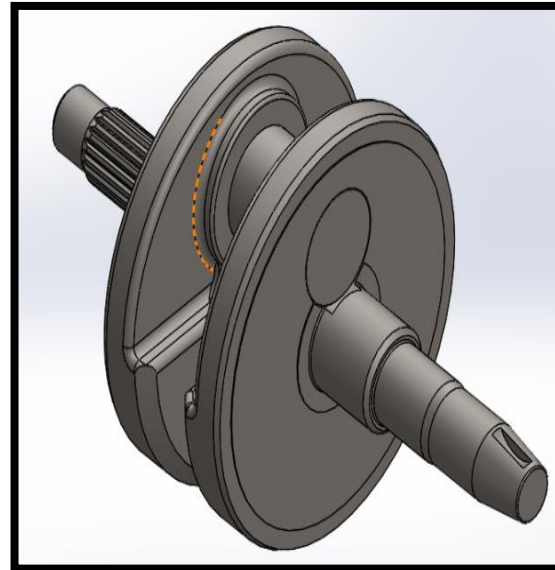


Modelado en el software CAD.

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.



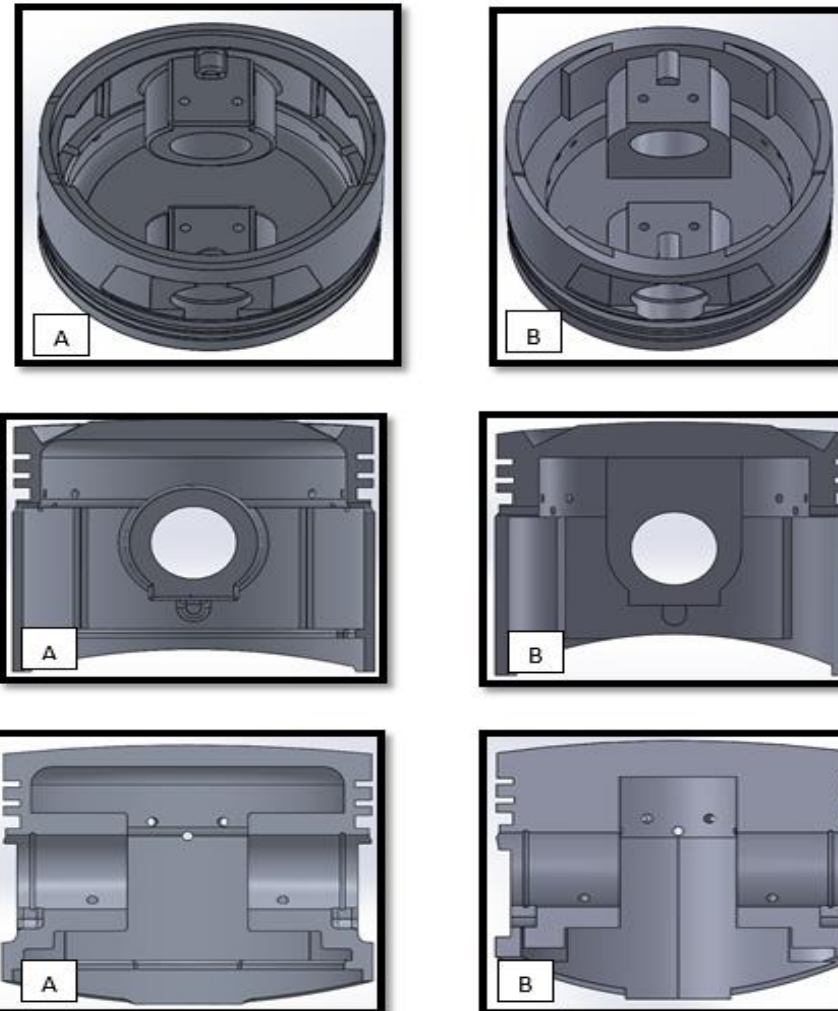
Modelado de biela y cigüeñal.



Ensamble completo del tren alternativo

Modificaciones a considerar en el modelado del pistón.

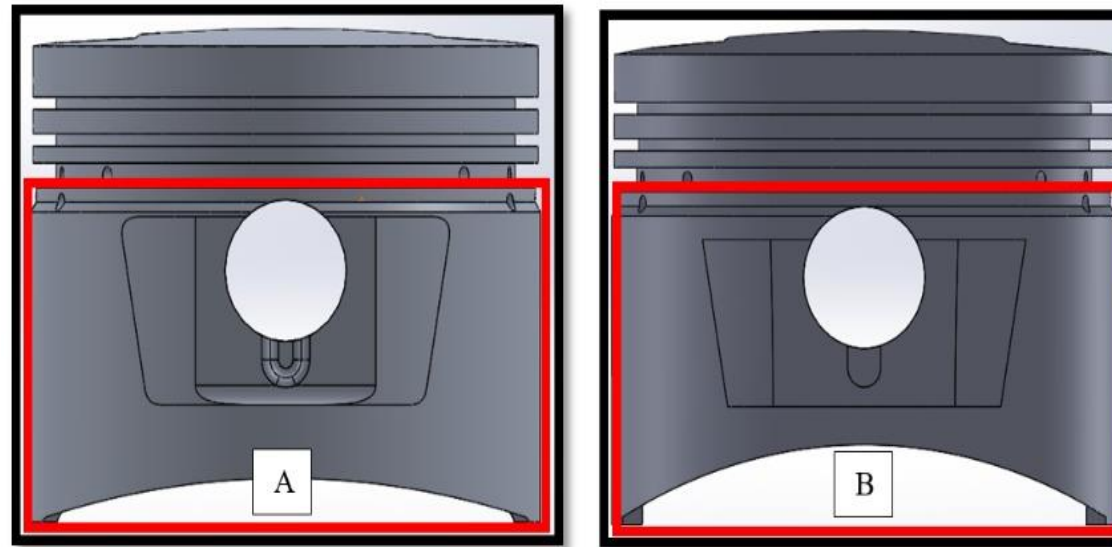
En el modelado se debe considerar que el pistón tiene detalles que la máquina CNC no podrá realizar, por ese motivo hay detalles en el modelado que se deben considerar para que el mecanizado no presente restricciones.



A: pistón de fábrica; B: rediseño de pistón.

Modificaciones a considerar en el modelado del 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.



A: pistón de fábrica; B: rediseño del pistón

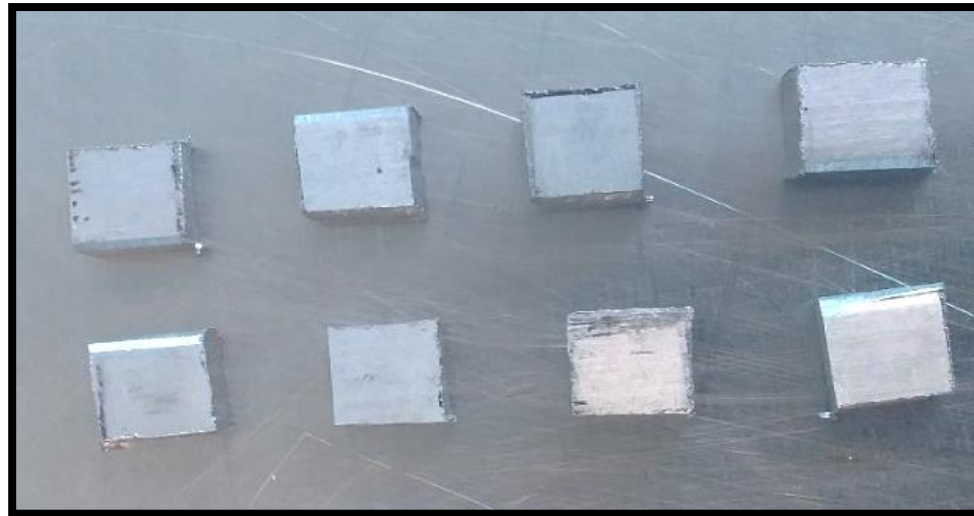
PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL

ALUMINIO 7021.

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



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

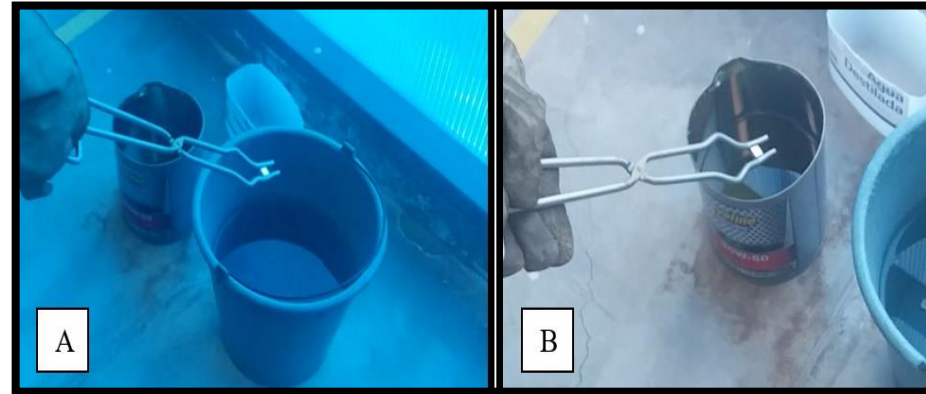


PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ALUMINIO 7021.

Templado.



Programador



A: templado con agua desmineralizada; B:

templado con aceite SAE 40.

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



PROCESO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DEL ALUMINIO 7021.

Envejecido.

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).



Programador

Ensayo de dureza del aluminio 7021.

Estos ensayos se los realizó en el Centro de Fomento Metalmecánico 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.

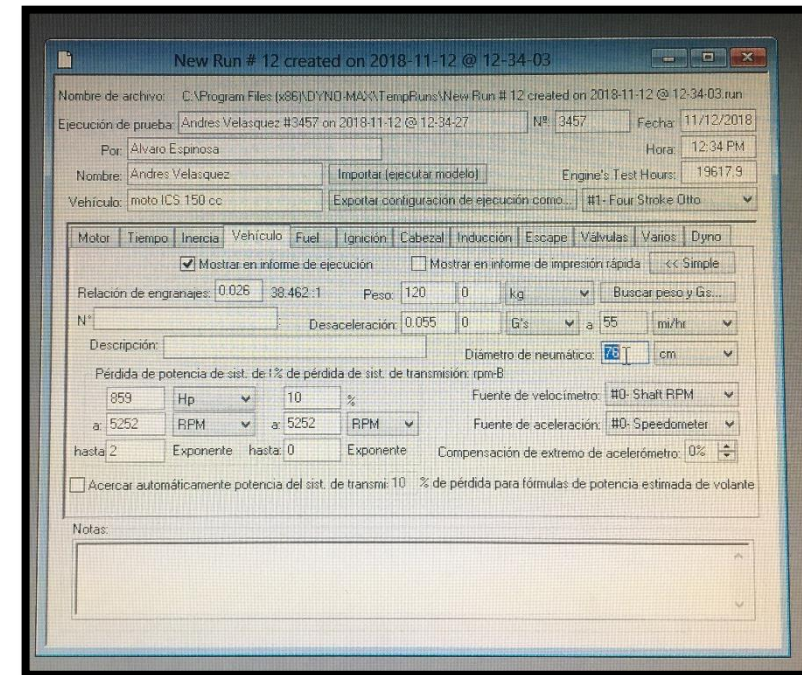


Durómetro digital ERNST.

Para este ensayo se utilizó un Durómetro digital marca ERNST con capacidad de realizar mediciones de dureza Brinell (HB) y dureza Rockwell (HR).

Pruebas dinamométricas de la motocicleta.

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.



Pruebas dinamométricas de 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.



Simulación y análisis estructural del comportamiento mediante Software CAE.



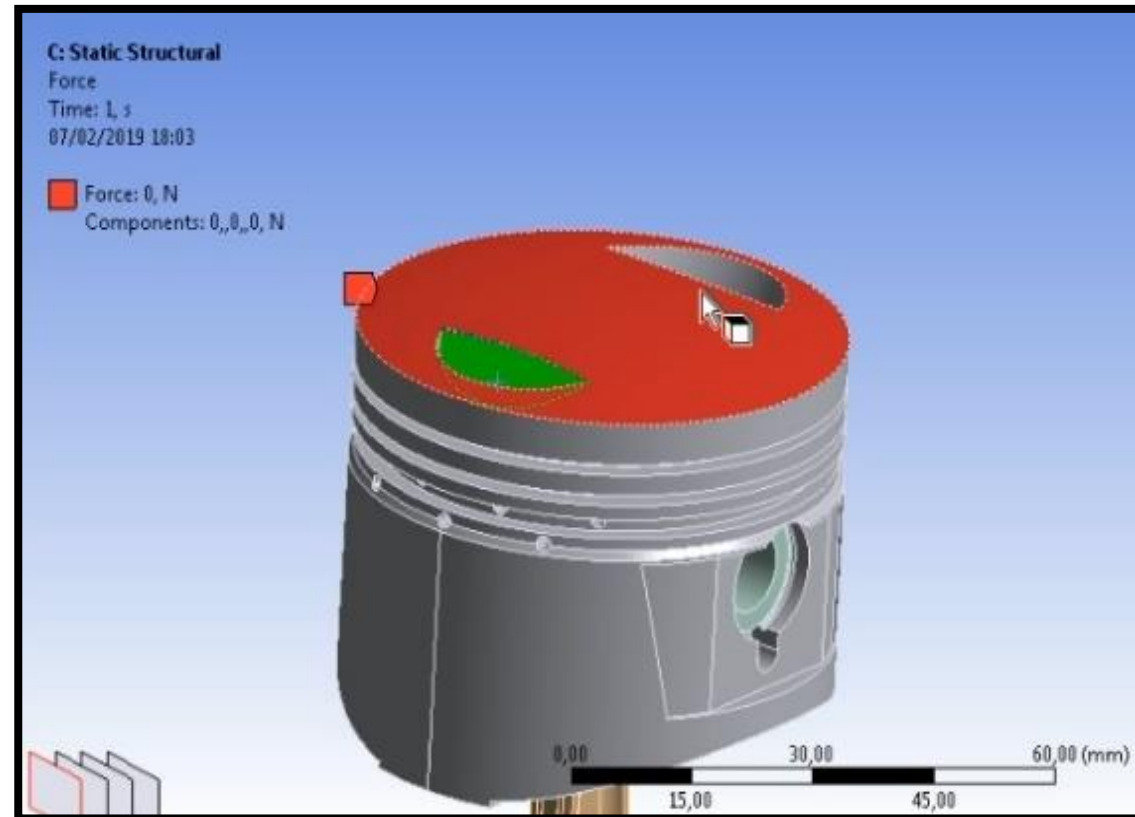
Factores aplicados sobre la cabeza del pistón.

Fuerza aplicada:

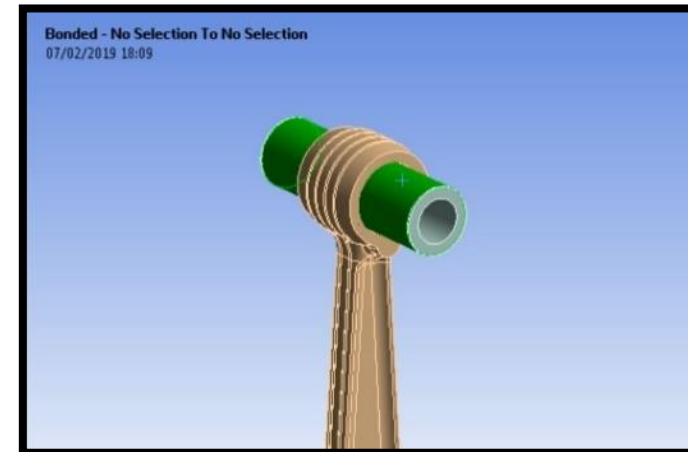
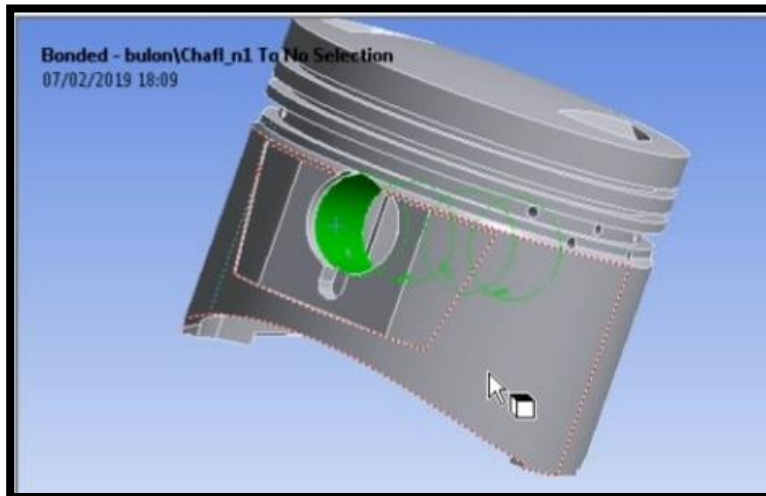
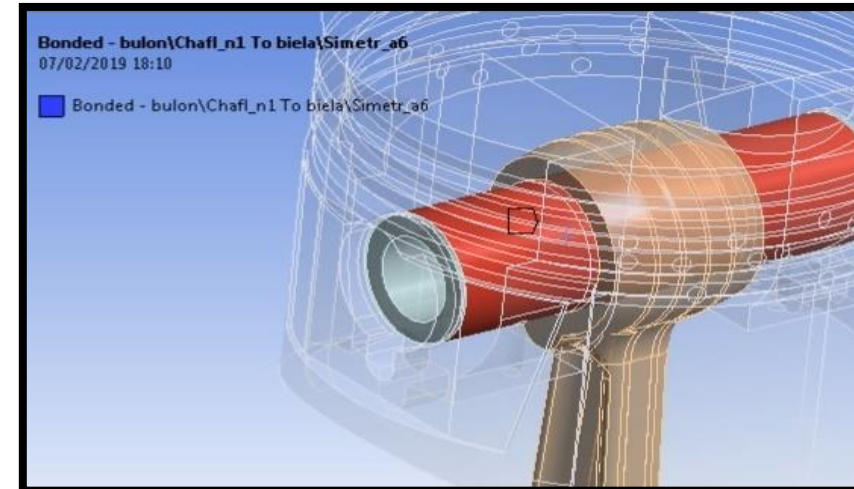
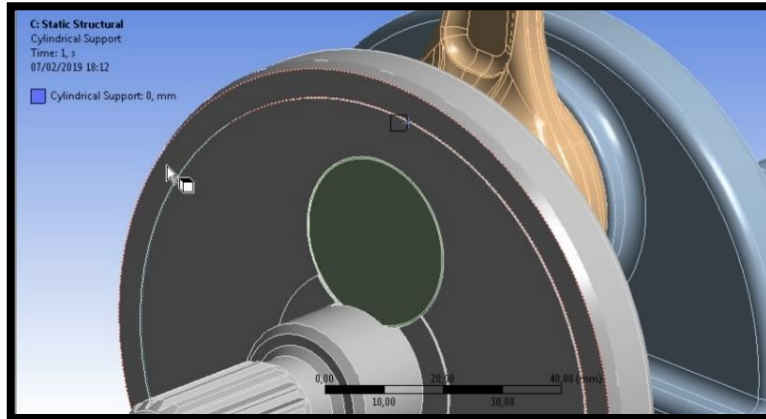
11808,42 N

Temperatura:

2341.67°C



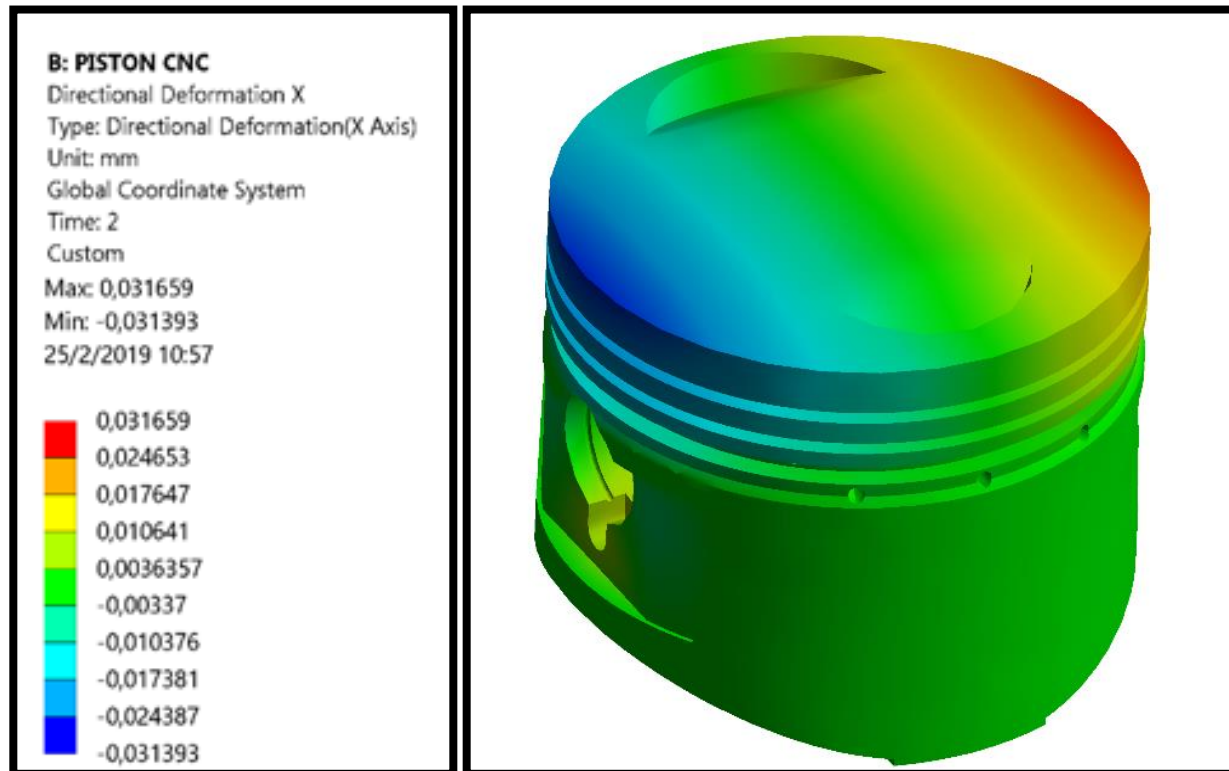
Puntos de contacto.



Deformaciones direccionales.

Deformación en el eje X

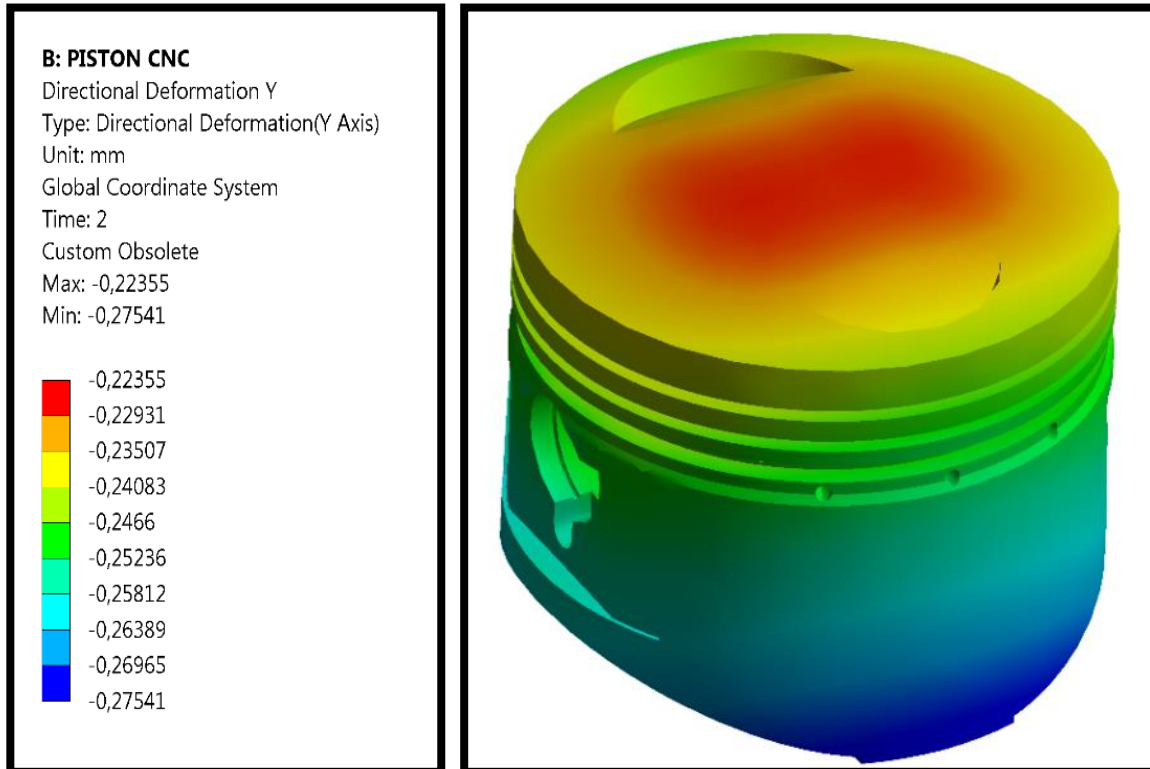
Deformación	mm
Máxima	0,032



Deformaciones direccionales.

Deformación en el eje Y

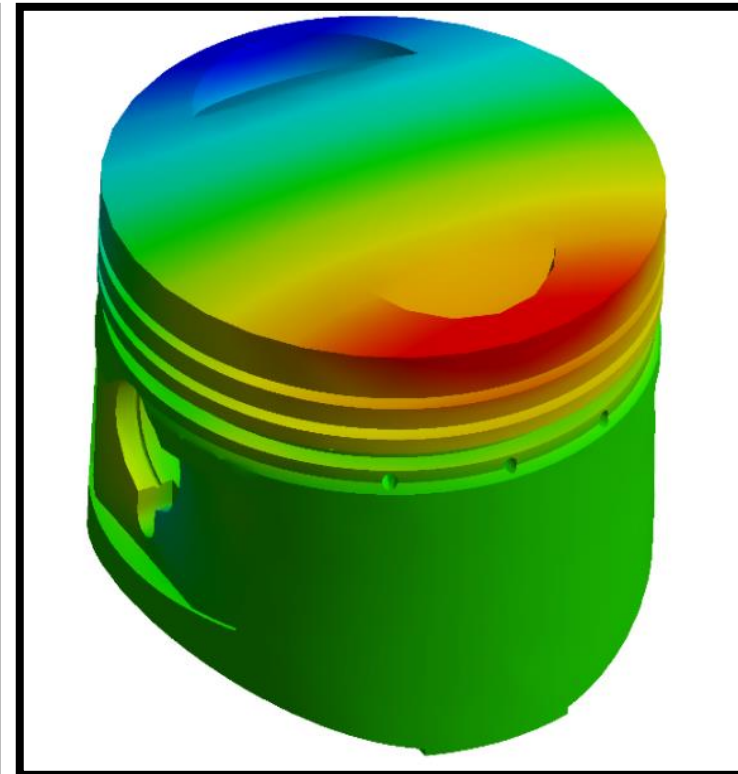
Deformación	mm
Máxima	0,22
Mínima	0,27



Deformaciones direccionales.

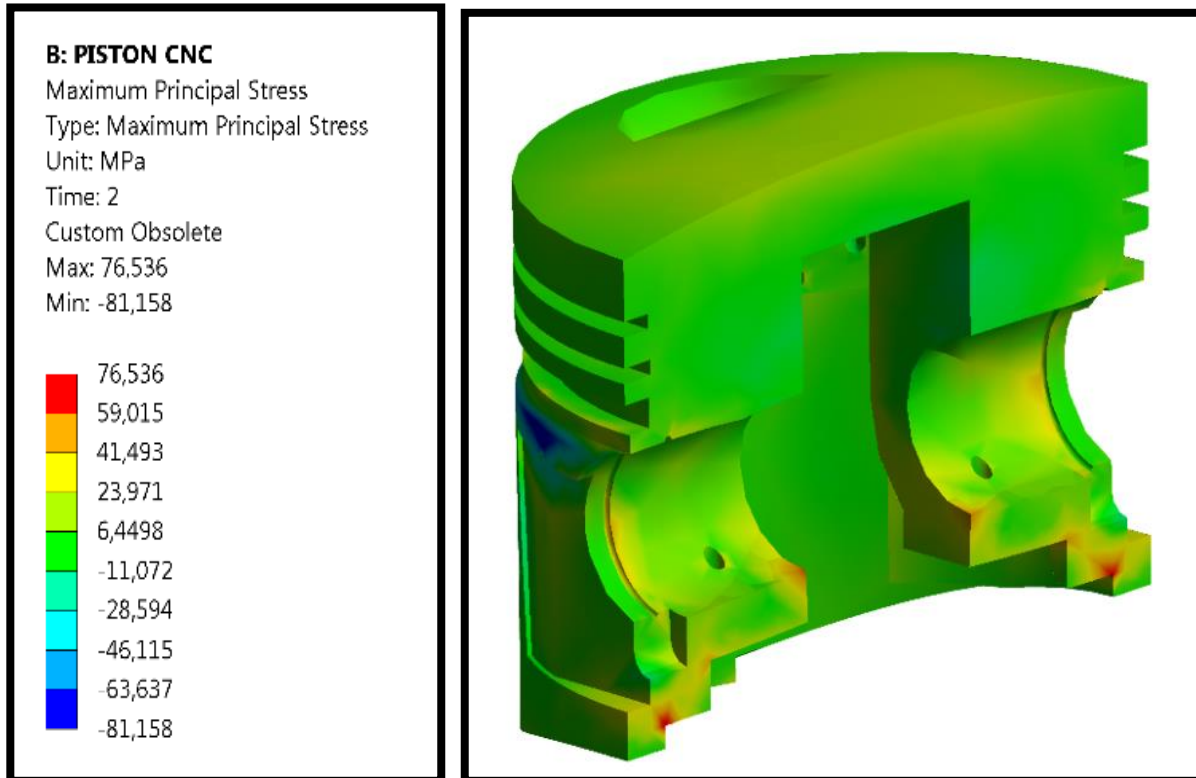
Deformación en el eje Z

Deformación	mm
Máxima	0,22
Mínima	0,27



Esfuerzo Máximo

Esfuerzo	MPa
Por tabla	70000
Calculado	76,536



Factor de seguridad

Factor seguridad	
Máximo	15
Mínimo	2,11

B: PISTON CNC

Safety Factor

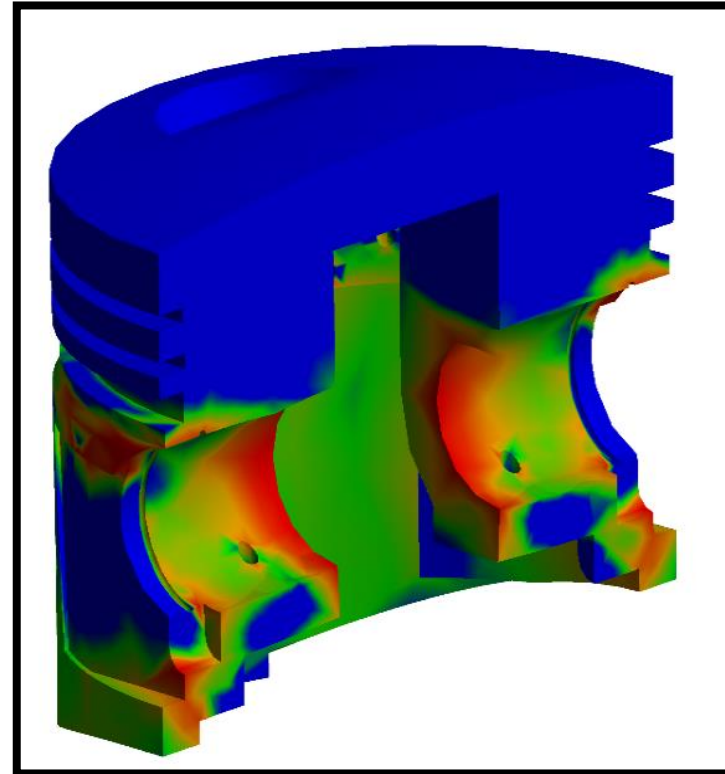
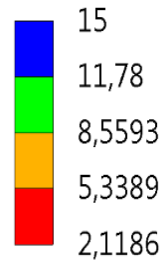
Type: Safety Factor

Time: 2

Custom Obsolete

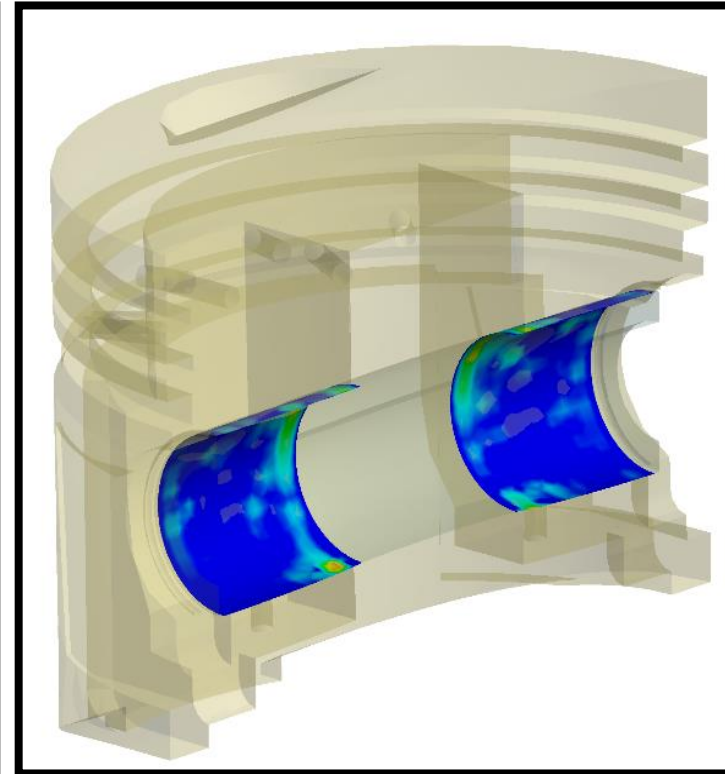
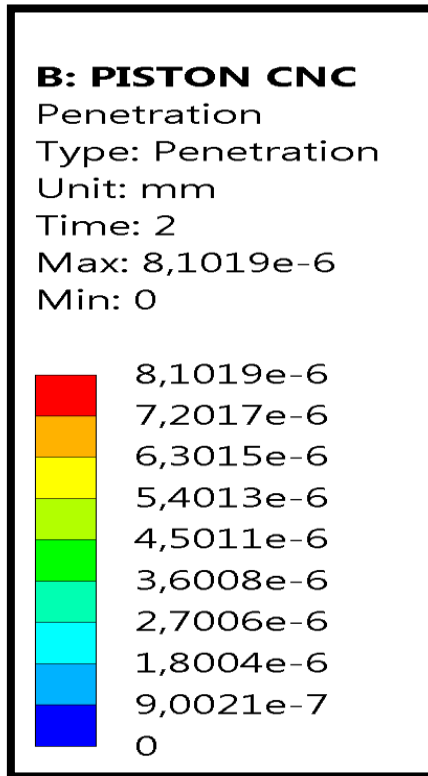
Max: 15

Min: 2,1186

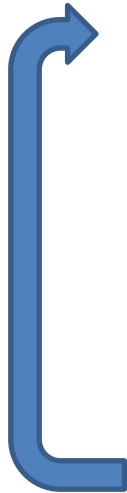


Desgaste entre pistón y bulón

Desgaste	mm
Máximo	$8,10 \text{ e}^{-6}$

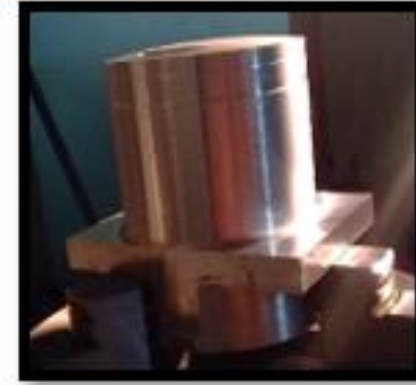
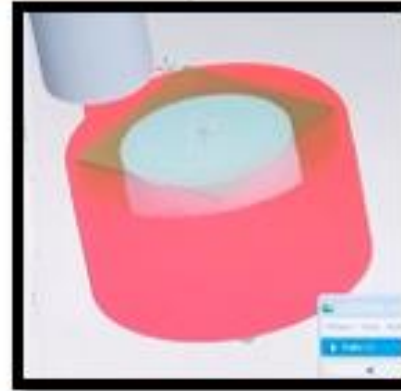


Manufactura.



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
alijos de
válvulas.**

CoroMill 216F
Diámetro = 8 mm
 $V_c = 375 \text{ m/min}$
 $N = 4591 \text{ rpm}$
 $V_a = 939.8 \text{ mm/min}$



Escariado

Escariadores CoroDrill:

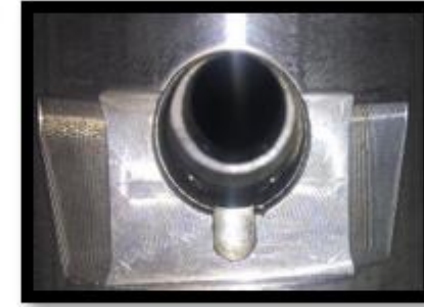
Diámetro = 15mm

Porta herramientas
excéntrico.

$V_c = 35 \text{ m/min}$

$N = 2449 \text{ rpm}$

$V_a = 1498.6 \text{ mm/min}$



Fresado

CoroMill 216F

Diámetro = 8 mm

$V_c = 375 \text{ m/min}$

$N = 4591 \text{ rpm}$

$V_a = 939.8 \text{ mm/Min}$

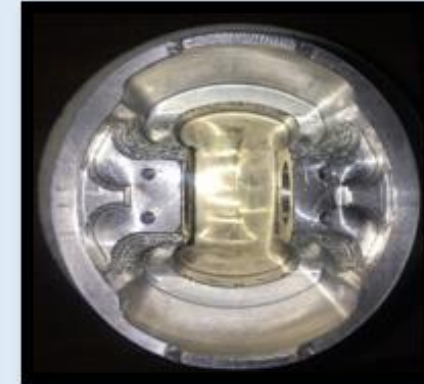
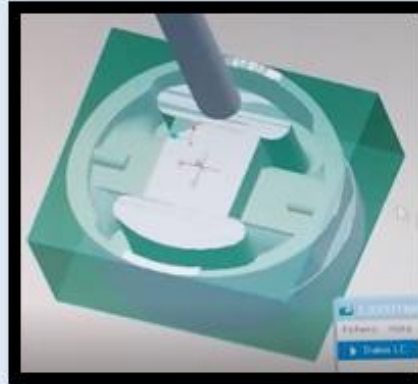
CoroDrill

Diámetro = 2mm

$V_c = 35 \text{ m/min}$

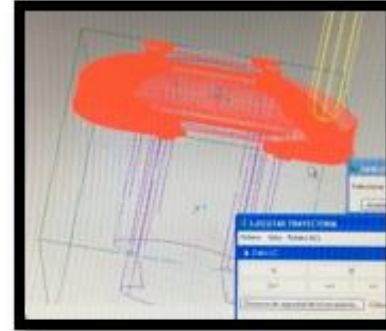
$N = 18365 \text{ rpm}$

$V_a = 939.8 \text{ mm/min}$



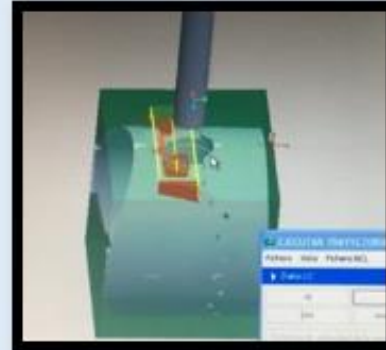
Afinado

CoroMill 216F
Diámetro = 8 mm
 $V_c = 35\text{m/min}$
 $N = 181\text{ rpm}$
 $V_a = 736.59\text{ mm/min}$



Ranurado

Cuchilla
1.27 mm
 $V_c = 35\text{m/min}$
 $N = 28922\text{ rpm}$
 $V_a = 2946\text{ mm/min}$



Pulido

Papel de lija #1200



Tratamientos térmicos aplicados.



Templado.

- Calentado del pistón hasta 420 °C durante un tiempo de 90 min.
- Templado en agua desmineralizada a temperatura ambiente.



Envejecido.

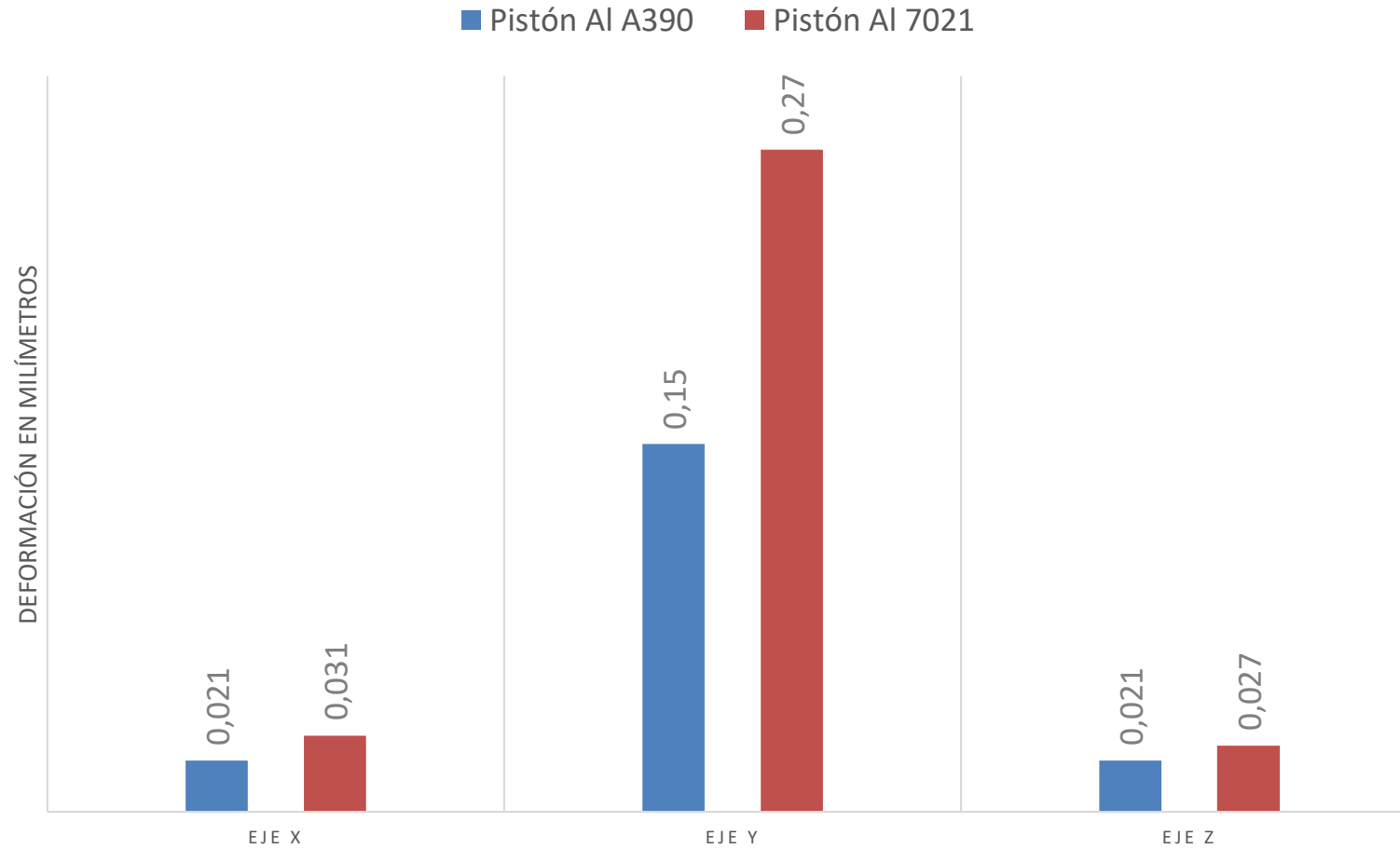
- Calentado del pistón hasta 130°C durante un tiempo de 5 horas.
- Enfriado lentamente hasta llegar a temperatura ambiente.



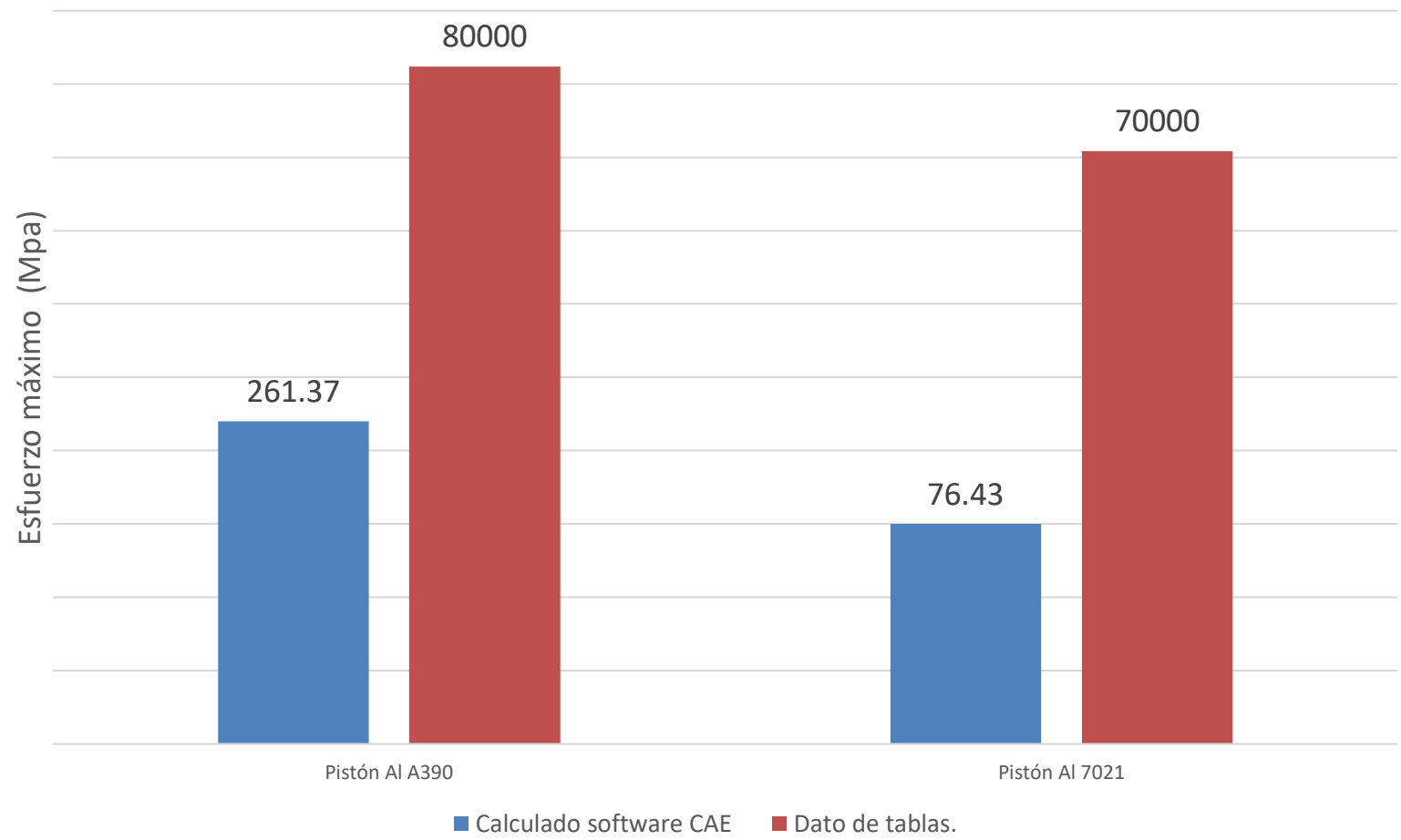
Análisis de Resultados.



Deformaciones.

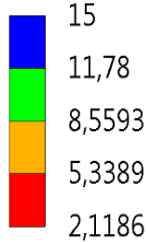


Esfuerzo Máximo.



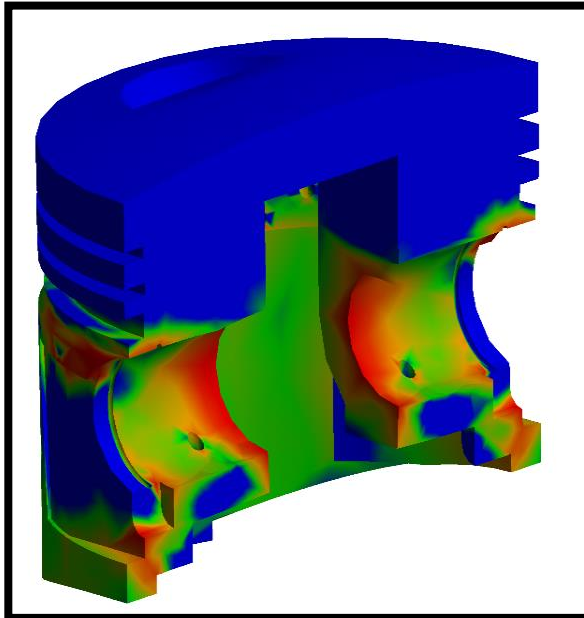
Factor de seguridad.

B: PISTON CNC
Safety Factor
Type: Safety Factor
Time: 2
Custom Obsolete
Max: 15
Min: 2,1186

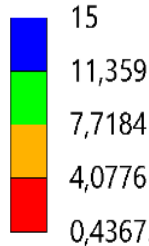


Blue	15
Green	11,78
Yellow	8,5593
Orange	5,3389
Red	2,1186

Pistón AI 7021

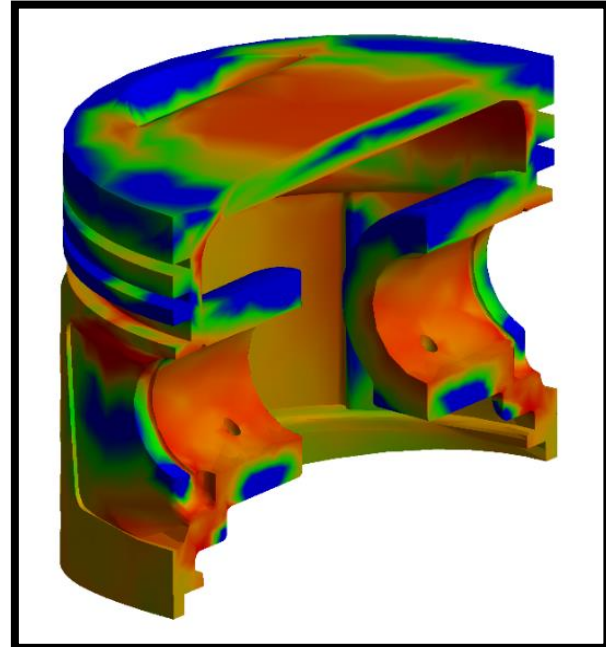


D: PISTON STD
Safety Factor
Type: Safety Factor
Time: 1
Custom
Max: 15
Min: 0,43388
25/2/2019 11:09

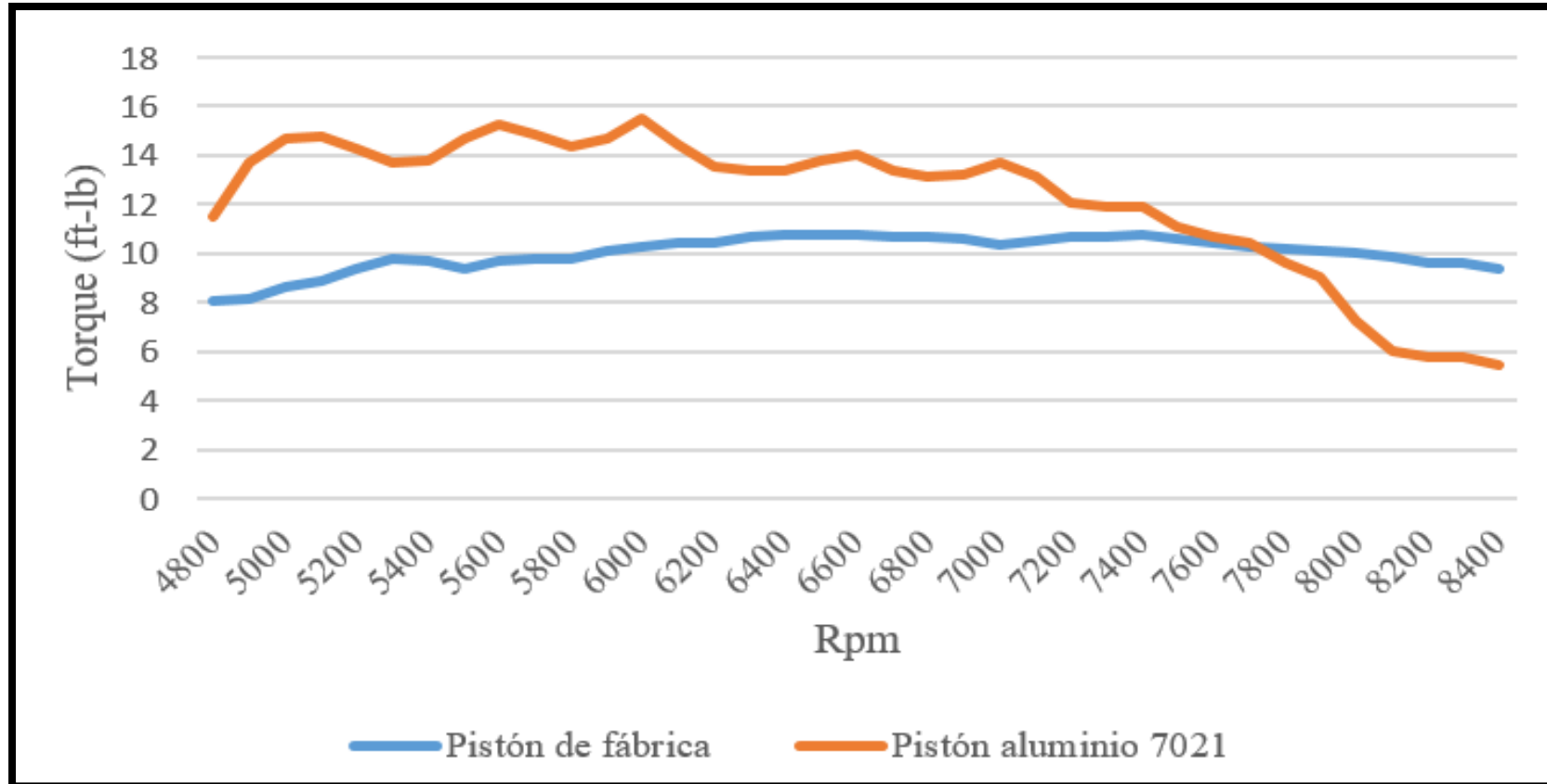


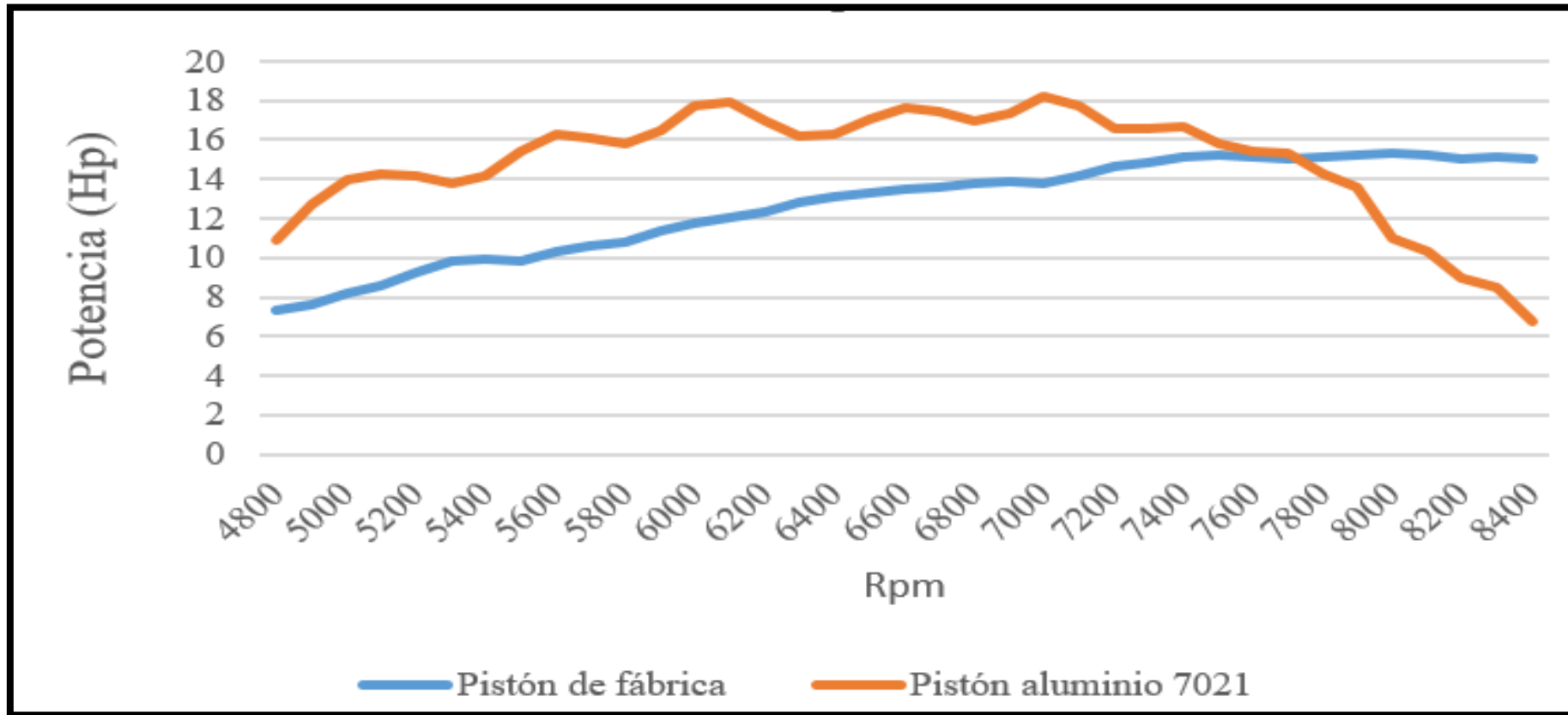
Blue	15
Green	11,359
Yellow	7,7184
Orange	4,0776
Red	0,43675

Pistón A390

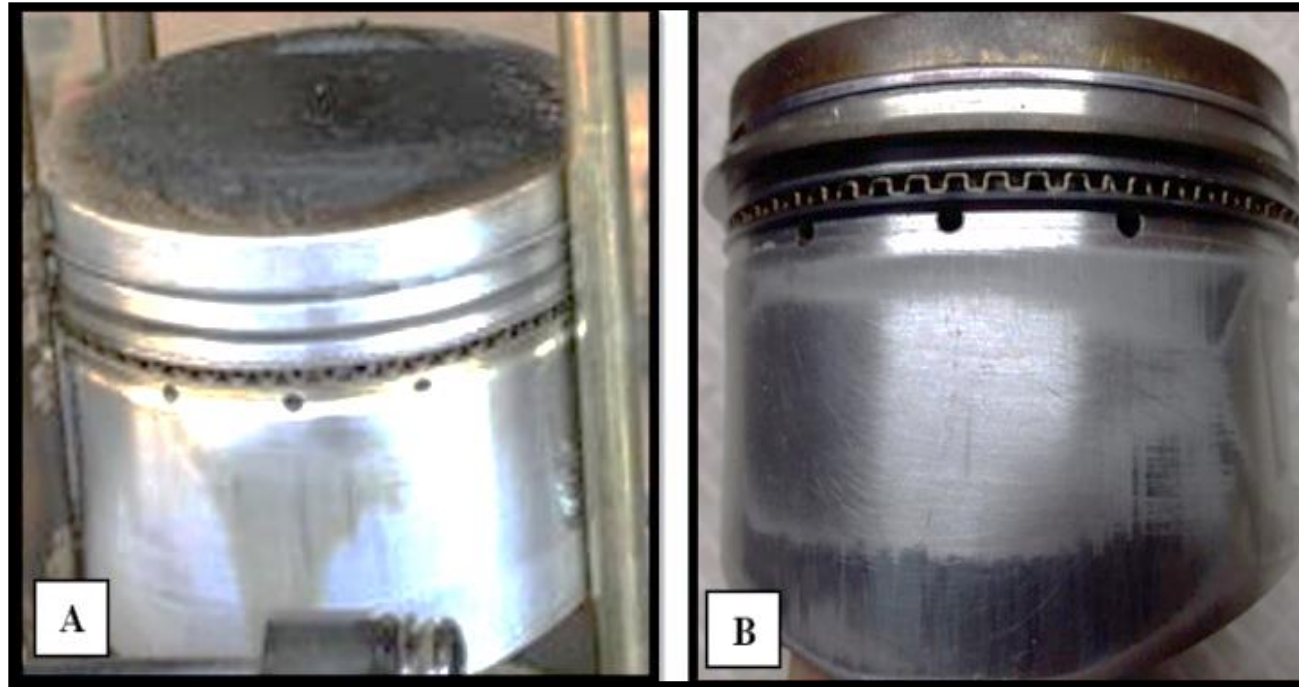


Curvas de potencia y torque.





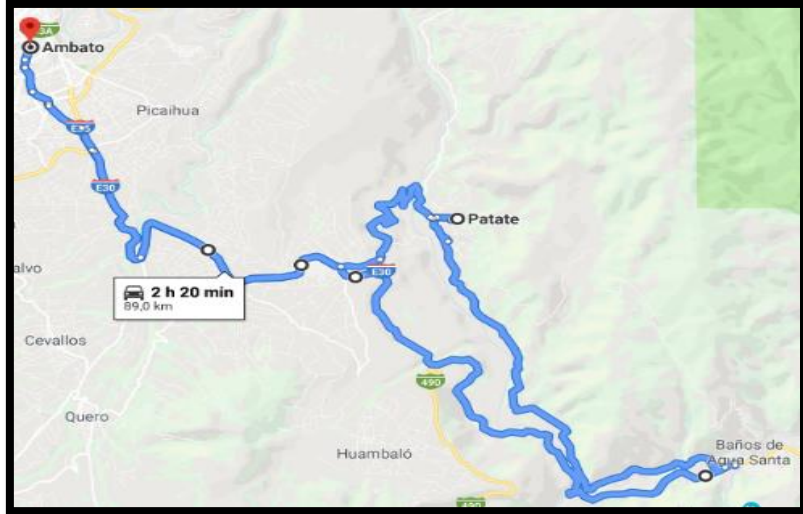
Viabilidad.



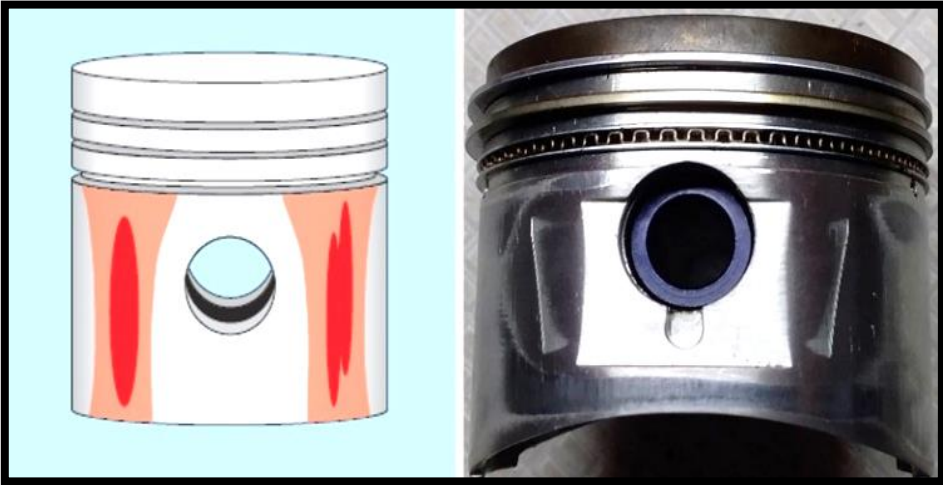
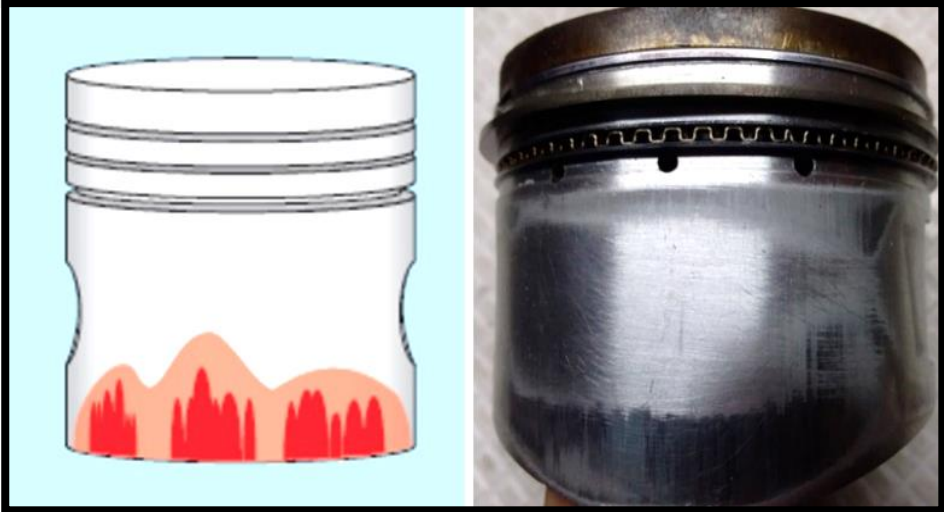
Pistón A390

Pistón Al 7021





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Conclusiones y Recomendaciones.



Conclusiones.

- 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.
- 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.



Conclusiones.

- 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 %.



Conclusiones.

- En 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.



Recomendaciones.

- 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.



Recomendaciones.

- 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.



Recomendaciones.

- 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



GRACIAS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA