

**SIMULACIÓN CON SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS DE LA
CORONA Y FALDA DEL PISTON MAHLE, BIELA Y BULÓN DE LAS
UNIDADES ALLEN 8S37G.**

RENZO HUMBERTO CÁRDENAS DÍAZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2009

**SIMULACIÓN CON SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS DE LA
CORONA Y FALDA DEL PISTÓN MAHLE, BIELA Y BULÓN DE LAS
UNIDADES ALLEN 8S37G**

RENZO HUMBERTO CÁRDENAS DÍAZ

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
Wilson Felipe Jaimes
Ing. Mecánico**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2009

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga 30 de Abril de 2009.

A DIOS POR EL AMOR Y LA SABIDURÍA
QUE ME HA IMPARTIDO PARA SURGIR
EN LA VIDA Y
A MI FAMILIA POR BRINDARME EL APOYO
INCONDICIONAL EN CADA ETAPA QUE HE
EMPRENDIDO.

RENZO HUMBERTO CÁRDENAS DÍAZ.

AGRADECIMIENTOS

El realizador de este proyecto le agradece de manera sincera a:

Al Ingeniero Juan Carlos López superintendente de la unidad de negocio de Generación de Energía de Occidental de Colombia, por permitir y por contribuir al desarrollo de este proyecto de Ingeniería Mecánica.

Al Ingeniero Christian Rodríguez Burbano líder de Generación de Energía en la Facilidad de Producción 2 (PF2), por servir de manera voluntaria como director de proyecto en Occidental de Colombia, y por contribuir con sus conocimientos de manera esencial durante el desarrollo del proyecto.

Al ingeniero Wilson Felipe Jaimes, por servir como director de proyecto por parte de la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, y por dirigir y compartir sus conocimientos de manera fundamental.

A la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, por brindarme la oportunidad de educarme y formarme integralmente como profesional.

Merece también mi agradecimiento los mecánicos especialista de la unidad de negocio de Generación de Energía en la Facilidad de Producción 1 (PF1) de Occidental de Colombia, Jesús Cardozo y Daniel Meneses, por aportar de manera fundamental con los conocimientos técnicos para el desarrollo de este proyecto.

Finalmente a todos y cada una de las personas de la unidad de negocio de Generación de Energía de Occidental de Colombia que de una forma u otra contribuyeron con sus conocimientos técnicos al desarrollo de este proyecto y al apoyo que me brindaron durante el período de la práctica empresarial en Occidental de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO.....	19
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2.1 JUSTIFICACIÓN	20
3 Objetivos.....	21
3.1 Objetivo General.....	21
3.2 Objetivos específicos.....	21
4 MARCO TEÓRICO.....	23
4.1 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.	23
4.2 Teoría general del método de los elementos finitos.	24
4.2.1 Conceptos generales del método.	24
4.2.2 Método de los residuos ponderados.	29
4.3 Descripción del Motor Allen.	30
4.3.1 Rotación:.....	31
4.3.2 Numeración y letras de los cilindros del Motor:.....	31
4.3.3 Orden del encendido: [1].....	31
4.4 Construcción del Motor.....	32
4.4.1 Bielas y Pistones.....	32
4.5 Sistema del Motor.....	32
4.5.1 Sistema de aire de arranque.....	32
4.6 Requerimientos básicos para el uso del APL en los Motores ALLEN de OXYCOL.....	33
4.6.1 Cilindro rayador.....	33
4.7 Fuerzas que actúan sobre la combustión.....	33

4.8 PREDICCIÓN	34
5 DISEÑO METODOLOGICO	35
5.1 ETAPA DE DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA	35
5.1.1 Revisión de Conceptos Básicos Relacionados con el Tema del Proyecto.....	35
5.1.2 Simulación de Corona de Pistones Mahle de los Motores Allen 8S37G36	
5.2 PLANEACIÓN	36
5.2.1 Selección de la información	36
5.2.2 Diseño.....	36
5.3 Simulación	36
5.4 ANÁLISIS Y INFORME FINAL	37
6 ESQUEMA TEMÁTICO	38
6.1 Modelo (Análisis Acoplado “Estructural y Térmico”).....	38
6.1.1 Geometría necesaria para generar los elementos.....	38
6.1.2 Geometría del conjunto motriz Allen importadas desde otra fuente (Solid Edge V16).....	39
6.1.3 Contactos.....	41
6.1.4 Enmallado.....	44
6.2 Ambiente	50
6.2.1 Condiciones de fronteras térmicas.....	50
6.2.2 Condiciones de frontera estructurales.....	60
6.3 Solución.....	63
6.3.1 Resultados Estructurales	63
6.3.2 Resultados Térmicos	65
6.3.3 Seguridad del esfuerzo equivalente.....	65
6.4 Apendice del software (ANSYS Workbench V10.0) para el Modelo “ Conjunto Motriz del Motor Allen”.....	66
6.4.1 Figuras.....	66
6.4.2 Propiedades de los materiales utilizados en el conjunto motriz del motor Allen.....	75

6.5 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	85
6.5.1 Interpretación de los resultados obtenidos en el software ANSYS para el análisis acoplado (térmico – estructural) de la corona Mahle:	85
6.5.2 Comparación de los resultados obtenidos entre el modelo desarrollado en Occidental de Colombia con el software ANSYS y el modelo desarrollado por AVL Powertrain Engineering, Inc con el software Patran y Abaqus V 6.5.	105
6.5.3 Resultados del máximo desbaste permisible en la corona Mahle.....	106
7 PERSONAS QUE PARTICIPARON EN EL PROYECTO.....	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Campos que gobiernan la Ecuación Diferencial.....	30
Tabla 2. Orden de encendido de motores Allen 8S37G.....	31
Tabla 3. Piezas del conjunto motriz Allen y sus propiedades mecánicas.....	40
Tabla 4. Condiciones de contacto.....	41
Tabla 5. Cantidad de nodos y elementos en las piezas del conjunto motriz Allen.....	44
Tabla 6. Valores de cargas térmicas para cada área del conjunto motriz Allen.....	50
Tabla 7. Cargas estructurales.....	60
Tabla 8. Precarga del perno sujetador de corona y falda del pistón.....	61
Tabla 9. Soportes Estructurales.....	62
Tabla 10. Weak Spring.....	63
Tabla 11. Valores Estructurales.....	63
Tabla 12. Seguimiento de convergencia.....	64
Tabla 13. Historial de Solución.....	64
Tabla 14. Convergencia del Esfuerzo Equivalente 2.....	64
Tabla 15. Valores Térmicos.....	65
Tabla 16. Definición.....	65
Tabla 17. Valor de Seguridad del Esfuerzo Equivalente.....	65
Tabla 18. Propiedades constantes de la falda.....	75
Tabla 19. Relación de Poisson.....	76
Tabla 20. Relación de Poisson.....	76
Tabla 21. Módulo de Young.....	77
Tabla 22. Módulo de Young.....	77
Tabla 23. Conductividad Térmica.....	78
Tabla 24. Conductividad Térmica.....	78
Tabla 25. Propiedades constantes de la corona.....	78

Tabla 26. Densidad.....	79
Tabla 27. Densidad.....	79
Tabla 28. Expansión Térmica.....	80
Tabla 29. Expansión Térmica.....	80
Tabla 30. Conductividad Térmica.....	81
Tabla 31. Conductividad Térmica.....	81
Tabla 32. Módulo de Young.	82
Tabla 33. Módulo de Young.	82
Tabla 34. Propiedades constantes del bronce.	82
Tabla 35. Propiedades constantes del "Acero 1020".	83
Tabla 36. Esfuerzos Alternantes.....	83
Tabla 37. Esfuerzos Alternantes.....	84
Tabla 38. Parámetros Vida - Esfuerzo.....	84
Tabla 39. Parametros de Vida - Esfuerzo.	85
Tabla 40. Desplazamiento vertical de la primera ranura de sello.	104
Tabla 41. Valores de factor de seguridad para diversos desbastes.....	108

LISTAS DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema Continuo.	25
Figura 2. Modelo de E.F.	25
Figura 3. Elemento Bidimensional.	26
Figura 4. Elemento Tridimensional.	27
Figura 5. Formulación matricial de un problema de elementos finitos	28
Figura 6. Partes que constituyen el conjunto motriz del motor Allen 8S37G. 40	
Figura 7. Contacto tipo soldado entre Falda - Bulón.....	42
Figura 8. Contacto tipo soldado entre Biela - Casquete.....	43
Figura 9. Contacto tipo sin fricción entre Bulón - Casquete.	43
Figura 10. Geometría seleccionada con el comando de enmallado.	45
Figura 11. Enmallado en la corona y demas piezas del conjunto motriz Allen.....	46
Figura 12 (a) Cuatro nodos - tetraédrico; (b) Diez nodos - tetraédrico.....	46
Figura 13. Error estructural en la corona Mahle.....	47
Figura 14. Área de interés en la corona del pistón Mahle.....	48
Figura 15. Region 1 (refinamiento para el analisis estructural de la corona). 49	
Figura 16. Valores de Refinamiento.....	49
Figura 17. Temperatura 1 y Coeficiente de Convección 1.	51
Figura 18. Temperatura 2 y Coeficiente de Convección 2.	51
Figura 19. Temperatura 3 y Coeficiente de Convección 3.	52
Figura 20. Temperatura 4 y Coeficiente de Convección 4.	52
Figura 21. Temperatura 5 y Coeficiente de Convección 5.	53
Figura 22. Temperatura 6 y Coeficiente de Convección 6.	53
Figura 23. Temperatura 7 y Coeficiente de Convección 7.	54
Figura 24. Temperatura 8 y Coeficiente de Convección 8.	54
Figura 25. Temperatura 9 y Coeficiente de Convección 9.	55
Figura 26. Temperatura 10 y Coeficiente de Convección 10.	55
Figura 27. Temperatura 11 y Coeficiente de Convección 11.	56

Figura 28. Temperatura 12 y Coeficiente de Convección 12.	56
Figura 29. Temperatura 13 y Coeficiente de Convección 13.	57
Figura 30. Temperatura 14 y Coeficiente de Convección 14.	57
Figura 31. Temperatura 15 y Coeficiente de Convección 15.	58
Figura 32. Temperatura 16 y Coeficiente de Convección 16.	58
Figura 33. Temperatura 17 y Coeficiente de Convección 17.	59
Figura 34. Temperatura 18 y Coeficiente de Convección 18.	59
Figura 35. Temperatura 19 y Coeficiente de Convección 19.	60
Figura 36. Área donde se encuentra aplicada la presión pico en el Pistón Mahle. .	61
Figura 37. Precarga del perno sujetador de la corona y falda del pistón Mahle.	62
Figura 38. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.	66
Figura 39. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.	66
Figura 40. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.	67
Figura 41. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.	67
Figura 42. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.	68
Figura 43. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.	68
Figura 44. Contorno de esfuerzo equivalente en la corona del pistón.	69
Figura 45. Contorno de esfuerzo equivalente en la corona del pistón.	69
Figura 46. Contorno de máximo esfuerzo cortante.	70
Figura 47. Contorno de máximo esfuerzo cortante.	70
Figura 48. Contorno de deformación total.	71
Figura 49. Contorno de temperatura.	71
Figura 50. Contorno de flujo total de calor.	72
Figura 51. Contorno de factor de seguridad por esfuerzo cortante.	72
Figura 52. Contorno de factor de seguridad por esfuerzo equivalente.	73
Figura 53. Deformación direccional en X.	73
Figura 54. Deformación direccional en Y.	74
Figura 55. Deformación direccional en Z.	74
Figura 56. Esfuerzo Equivalente 2.	75

Figura 57. Esfuerzo Equivalente en el análisis acoplado.....	85
Figura 58. Máximo Esfuerzo Cortante para el análisis acoplado.....	88
Figura 59. Máximo Esfuerzo Cortante y Fuerza Opuesta.....	89
Figura 60. Deformación total en el análisis acoplado.....	91
Figura 61. Vector Deformación Total y Deformaciones Relativas.....	93
Figura 62. Deformación de la corona del pistón en la dirección X.....	94
Figura 63. Deformación de la corona del pistón en la dirección Y.....	94
Figura 64. Deformación de la corona del pistón en la dirección Z.....	95
Figura 65. Temperatura de superficie conocida.....	97
Figura 66. Máxima Temperatura en la corona del pistón Mahle.....	98
Figura 67. Contorno de Flujo de calor en la corona de pistón Mahle.....	99
Figura 68. Localización del flujo máximo de calor en la corona.....	100
Figura 69. Dirección del flujo de calor en la corona del pistón.....	100
Figura 70. Camino que sigue el flujo calorífico desde la corona del pistón hacia el aceite de refrigeración entre la camisa y la falda.....	102
Figura 71. Localización del mínimo factor de seguridad para el análisis acoplado.....	102
Figura 72. Dirección en que se deforma la primera ranura de la corona Mahle para los tres análisis.....	104
Figura 73. Deformación de la primera ranura de la corona para el análisis acoplado.....	104
Figura 74. Comparación de Temperatura(⁰ C).....	105
Figura 75. Comparación de Esfuerzos Equivalentes (MPa).....	105
Figura 76. Comparación de Factor de Seguridad.....	105
Figura 77. Comparación de Factor de Seguridad.....	106
Figura 78. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 0,8 mm.....	106
Figura 79. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 1.0 mm.....	106
Figura 80. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 1.5 mm.....	107
Figura 81. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 2 mm.....	107
Figura 82. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 2.5 mm.....	107

Figura 83. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 3 mm..... 108

Figura 84. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 3.5 mm..... 108

Figura 85. Gráfica de mínimo factor de seguridad vs desbaste en la corona
(mm)..... 109

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. (Planos del Conjunto Motriz del Motor Allen).....	115
ANEXO B. (Fotos del Conjunto Motriz).....	131
ANEXO C. (Fotos de la biela del Motor Allen).....	132
ANEXO D. (Foto del Bulon del Motor Allen).....	133
ANEXO E. (Foto del Casquete del Motor Allen).....	134
ANEXO F. (Foto del Motor Allen).....	135
ANEXO G. (Cronograma de Actividades).....	136
ANEXO H. (Cálculo de la densidad de la Corona).....	137

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: SIMULACIÓN CON SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS DE LA CORONA Y FALDA DEL PISTON MAHLE, BIELA Y BULÓN DE LAS UNIDADES ALLEN 8S37G.

AUTOR: Renzo Humberto Cárdenas Díaz.

FACULTAD: Ingeniería Mecánica.

DIRECTOR: Wilson Felipe Jaimes.

Se elaboró un modelo propio del conjunto motriz en 3D utilizando Solid Edge de las unidades Allen 8S37G, basado en los planos suministrados por Occidental de Colombia Inc. Este modelo es la base para realizar los análisis que nos permiten predecir y conocer el comportamiento de un pistón de las características de un motor de este tipo.

El conjunto motriz consta de la corona, falda, biela, bulón, casquete y perno sujetador de corona y falda. La corona, biela y bulón son de material de fundición de hierro nodular, la falda de aluminio, el casquete de bronce y el perno de acero 1020. Las propiedades de los materiales están en función de la temperatura en un rango mínimo de 20 °C y máximo de 400 °C. Se simuló el conjunto motriz, teniendo en cuenta sólo la corona del pistón, puesto que es la pieza que compensa el mecanizado que se realizó internamente a la camisa del motor, y por consiguiente es en la corona donde se hace fundamentalmente necesario analizar el espesor de la pared. El mecanizado o torneado implementado en la corona del pistón está denominado como anillo APR (Anti Polishing Ring).

Los resultados que arroja la simulación realizada en Occidental de Colombia se comparan con el modelo que realizó la firma autorizada por Allen Rolls-Royce AVL Powertrain Engineering. Estos resultados nos permiten comparar y determinar si los dos modelos son convergentes en esfuerzos del material, deformación total, distribución de temperatura, flujo total de calor y factor de seguridad a la fluencia del material en la corona del pistón, y también nos permite comparar como altera en sus propiedades mecánicas la modificación propuesta en el diámetro de la corona del pistón.

PALABRAS CLAVE: Unidades Allen, Conjunto Motriz, Pistón, Anillo APR, Factor de Seguridad, Simulación, Allen Rolls-Royce, AVL Powertrain.

GENERAL ABSTRACT OF WORK DEGREE

TITTLE: SIMULATION WITH SOFTWARE FINITE ELEMENTS OF THE CROWN AND FALDA PISTON MAHLE, CONNECTING RODS AND BOLT UNITS 8S37G ALLEN.

AUTHOR: Renzo Humberto Cárdenas Díaz.

FACULTY: Mechanical Engineering

HEAD TEACHER: Wilson Felipe Jaimes.

A model was developed own set of driving 3D (Solid Edge) units 8S37G Allen, based on drawings supplied by the Occidental de Colombia Inc. This model is the basis for to carry out all analysis that us to predict and understand the behavior of a characteristics of the piston of an engine of this type.

The set consists of driving the crown, skirt, connecting rod, bolt, bolt and fastener cap crown and skirt. The crown, connecting rod and bolt material is nodular cast iron, the skirt of aluminum, brass cap and bolt steel 1020. Material properties are a function of the temperature range between a minimum of 20 °C and maximum of 400 °C. Was simulated driving all interested only in the piston crown, since it is the part that compensates machining that was performed internally to the engine cylinder liner, and it is in the crown where is primarily necessary to analyze the thickness of this. The machining or turning implemented in the crown of the piston is called ring APR (Anti Polishing Ring).

The results of the simulation conducted in Occidental of Colombia are compared with the model that made the company authorized by Allen Rolls-Royce AVL Powertrain Engineering. These results allow us to compare and determine whether the two models are converging in stress of the material, total deformation, temperature distribution, total heat flow and safety factor to the creep of the material in the piston crown, and also allows us to compare how alter the proposed amendment in the diameter of the piston crown.

KEYWORDS: Units Allen, Set of Driving, Piston, Ring APR, Safety Factor, Simulation, Allen Rolls-Royce, AVL Powertrain.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo pretende dar a conocer la corroboración térmica y estructural mediante la técnica de los Elementos Finitos de las variables a las que se encuentra sometida la corona mecanizada Mahle, entre el modelo desarrollado en 3D por la firma AVL Powertrain Engineering Inc y el modelo propio que se desarrollo en 3D en la compañía Occidental de Colombia, mediante el software ANSYS Workbench en la Universidad Pontificia Bolivariana - seccional Bucaramanga.

La compañía Occidental de Colombia preocupada por el error que se presentó al mecanizar la corona de unos pistones Mahle implementando el anillo APR, decidió realizar mediante la técnica de elementos finitos varias simulaciones para el modelo implementado y evaluar el efecto del mecanizado en las coronas de los pistones, para saber cuanto es el máximo desgaste permisible en el área donde trabaja el denominado anillo.

El principal interés de este estudio es el de elaborar, evaluar y determinar que las cargas térmicas y estructurales a la que esta sometida la corona del pistón Mahle converjan en resultados de las variables que se encuentran aplicada en esta, como: distribución de esfuerzos equivalentes, máximo esfuerzo cortante, deformación total, distribución de temperatura, flujo total de calor y factor de seguridad a la fluencia. La convergencia de las variables es entre el modelo desarrollado por AVL Powertrain Engineering, Inc y el modelo propio que se desarrolló en Occidental de Colombia.

1 ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

SIMULACIÓN CON SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS DE CORONA Y FALDA DEL PISTÓN MAHLE, BIELA Y BULÓN DE LAS UNIDADES ALLEN 8S37G.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al modificar la geometría de la corona del pistón Mahle del motor Allen 8S37G por medio de la reducción del diámetro superior de la corona de 323.70 mm a 321.00 mm, se modifica la configuración de la corona Mahle para que compense internamente el mecanizado que también se realizó a la camisa del Motor Allen. La corona mecanizada del pistón se le analizará cargas de tipo estructural y térmico. Este análisis se considera estático justo en el momento que el pistón alcanza el punto muerto superior cuando va a empezar a realizar el ciclo de potencia, por lo tanto las cargas térmicas y estructurales en condiciones de operación son de estado estable.

El análisis estructural y térmico se realizó solamente a la corona mecanizada del pistón puesto que es la pieza de interés, y se asume que el resto de las piezas que componen el pistón no serán modificadas ni serán afectadas por la modificación realizada a esta.

El pistón se encuentra sometido a una presión pico de 150 bares (15MPa) y a una temperatura máxima de 750⁰C durante el proceso de trabajo, siendo estos valores los máximos durante las condiciones de operación del pistón, ya sea a plena carga para un Motor Allen acoplado a un Generador GEC de 2MW o a un Motor Allen acoplado a una bomba centrífuga horizontal multietapa Ingersollrand de 80.000 barriles de crudo por día.

2.1 JUSTIFICACIÓN

Para reducir el consumo de aceite en el Motor Allen Rolls – Royce se requería implementar un anillo APL (Anti Polishing Liner) en la camisa del Motor, el cuál consistía en reducir el diámetro de la camisa desde la parte de abajo hasta el PMS (Punto Muerto Superior), para ello también se requería reducir en un 1/32” de radio en la corona del pistón mediante torneado para compensar la reducción de diámetro interior que se realizó a la camisa del Motor. Para conocer la integridad estructural de la corona y las propiedades mecánicas de ésta se solicitó mediante la técnica de elementos finitos realizar este estudio en la corona del pistón Mahle, para saber que la corona no se valla a ver afectada con este cambio de diámetro realizado y además cumpla con la misma vida de servicio a la corona original.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Elaborar un modelo propio en 3D del conjunto motriz de las unidades Allen 8S37G de Occidental de Colombia, Inc basado en los planos suministrados por OXY. El modelo se encuentra constituido por el pistón Mahle, biela y bulón. Evaluar las cargas térmicas y estructurales del modelo propio del conjunto Motriz para la corona mecanizada, con el fin de determinar que estas converjan en resultados tanto térmicos como estructurales en comparación con el modelo realizado por la firma AVL Powertrain Engineering, además determinar cual es el máximo desbaste permisible del diámetro en la corona mecanizada del pistón, con el fin de tener un criterio de ingeniería en el caso de presentarse un error en el mecanizado, evaluando mediante el modelo implementado el efecto del mecanizado en las coronas de los pistones Mahle mediante el anillo APR (Anti Polishing Ring).

3.2 Objetivos específicos

- Elaborar un modelo propio en 3D del conjunto motriz de las unidades Allen 8S37G de Occidental de Colombia, Inc basado en los planos suministrados por OXY. El modelo del conjunto motriz se encuentra constituido por el pistón Mahle, biela y bulón.
- Evaluar las cargas térmicas y estructurales del modelo propio del conjunto Motriz para la corona mecanizada, con el fin de determinar que estas converjan en resultados tanto térmicos como estructurales

en comparación con el modelo realizado por la firma AVL Powertrain Engineering.

- Determinar cual es el máximo desgaste permisible de diámetro en la corona del pistón, con el fin de tener un criterio de ingeniería en el caso de presentarse un error en el mecanizado, evaluando mediante el modelo implementado el efecto del mecanizado en las coronas de los pistones Mahle mediante el anillo APR (Anti Polishing Ring).

4 MARCO TEÓRICO

4.1 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales.[9]

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculos del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. [9]

El método de los Elementos Finitos como formulación matemática es relativamente nuevo; aunque su estructura básica es conocida desde hace bastante tiempo, en los últimos años ha sufrido un gran desarrollo debido a los avances informáticos. [4]

Fueron Turner, Clough, Martin y Topp quienes presentaron el MEF en la forma aceptada hoy en día. En su trabajo introdujeron la aplicación de elementos finitos simples (barras y placas triangulares con carga en su plano) al análisis de estructuras aeronáuticas, utilizando los conceptos de discretización y funciones de forma. [11]

Los ordenadores han aportado el medio eficaz de resolver la multitud de ecuaciones que se plantean en el MEF, cuyo desarrollo práctico ha ido caminando parejo de las innovaciones obtenidas en el campo de la arquitectura de los ordenadores. [7]

4.2 Teoría general del método de los elementos finitos.

El MEF (Método de los Elementos Finitos), permite resolver problemas de la ingeniería imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales.

La necesidad de realizar prototipos, ensayos físicos y mejoras iterativas ocasiona altas inversiones económicas y de tiempo.

Los prototipos, por lo tanto siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el MEF permite acercarse más al diseño óptimo.

La fundamentación matemática del MEF y su estructura básica han sido propuestos desde hace tiempo (50 años), sin embargo el avance de las máquinas computacionales personales ha permitido el desarrollo del método a pasos agigantados.

Hoy en día existe una gran cantidad de programas a disposición de los usuarios para realizar cálculos con elementos finitos. El manejo correcto de estas aplicaciones exige conocer los principios del MEF para garantizar los resultados obtenidos.[8]

4.2.1 Conceptos generales del método.

La idea general del MEF es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo, regirán también el del elemento.

Se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial, a un sistema con un número de

grados de libertad finitos, cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones. [10]

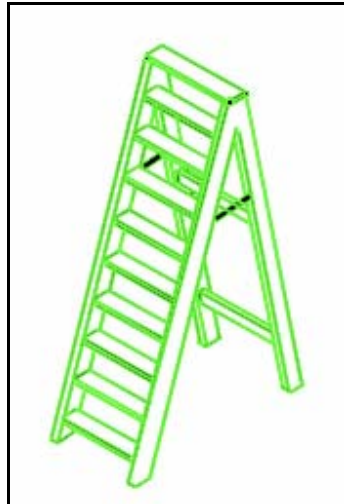


Figura 1. Sistema Continuo. Zienkiewicz Olgwierd. Metodo de Elementos Finitos. Reverte

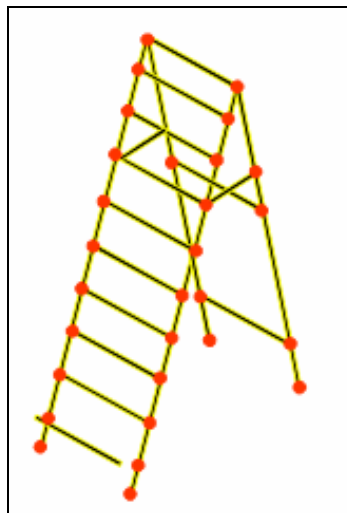


Figura 2. Modelo de E.F. Zienkiewicz Olgwierd. Metodo de Elementos Finitos. Reverte

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- **Dominio:** Es el espacio geométrico donde se va a analizar el sistema. [10]
- **Condiciones de frontera:** Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema (cargas, desplazamientos, temperaturas, voltajes, focos de calor, etc). [10]
- **Incógnitas:** Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de frontera han actuados sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas.[10]
- **Discretización:** Este paso consiste en dividir el dominio de la solución en Elementos Finitos. Los puntos de intersección de las líneas que forman los lados de los elementos se conocen como nodos y los lados se conocen como líneas nodales o planos nodales. [10]

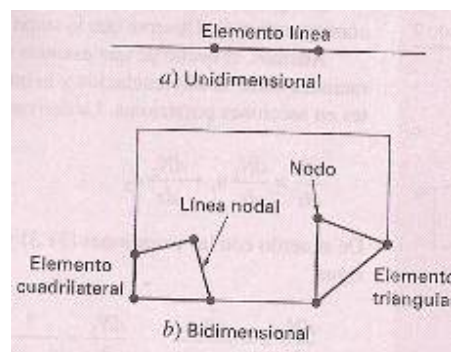


Figura 3. Elemento Bidimensional. Diaz Juan José y Dominguez Francisco José. Introduccion al Metodo de Elementos Finitos del Prgrama ANSYS. ETS Ingenieros Industriales. 2004

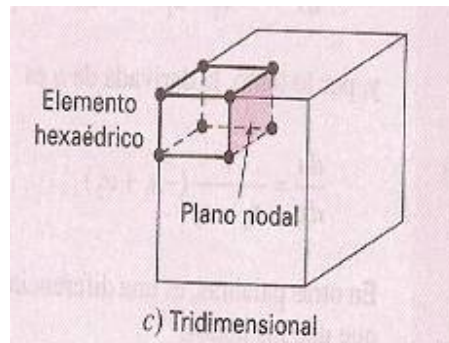


Figura 4. Elemento Tridimensional. Diaz Juan José y Dominguez Francisco José. Introducción al Metodo de Elementos Finitos del Programa ANSYS. ETS Ingenieros Industriales. 2004

- Los elementos se definen mediante un número discreto de puntos llamados nodos, conectados entre sí. [10]
 - Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de elementos estructurales, estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de estos podemos calcular el resto de incógnitas que nos interesan: tensiones, deformaciones. [10]
 - A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que determinan el estado y/o posición del mismo.[10]
-
- Los grados de libertad de cada nodo serán: [3]
 - *Desplazamientos en dirección x*
 - *Desplazamientos en dirección y*
 - *Giro según z*
 - *Temperatura*

- El sistema debido a las condiciones de frontera: empotramiento, fuerza puntual y temperatura, evoluciona hasta un estado final. Así conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema podemos determinar cualquier otra incógnita deseada: tensiones, deformaciones, etc. También será posible obtener la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad. [3]

- El problema se formula en forma matricial debido a la facilidad de manipulación de las matrices mediante ordenador. Conocidas las matrices que definen el comportamiento del elemento (en el caso estructural serán las llamadas matrices de rigidez, amortiguamiento y masa, aunque esta terminología ha sido aceptada en otros campos de conocimiento) se ensamblan y se forma un conjunto de ecuaciones algebraicas, lineales o no, que resolviéndolas nos proporcionan los valores de los grados de libertad en los nodos del sistema. [7]

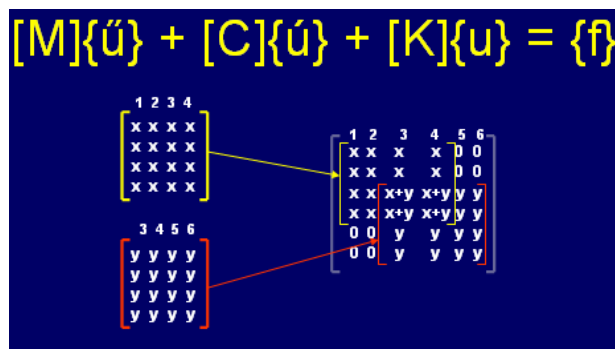


Figura 5. Formulación matricial de un problema de elementos finitos. Zienkiewicz Olguierd. Metodo de Elementos Finitos. Reverte.

4.2.2 Método de los residuos ponderados.

- La intención de utilizar los métodos numéricos en la ingeniería es resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan los fenómenos físicos, ya que en muchos casos no es suficiente ni práctico resolverlas analíticamente. [10]
- Los métodos de residuos ponderados proponen sustituir una solución aproximada en la ecuación diferencial, minimizando el error introducido mediante funciones de peso que llevan el resultado a cero.[10]

$D \frac{d^2 y}{dx^2} + Q = 0$ (1)	—————▶	Ecuación diferencial.
$y = h(x)$ (2)	—————▶	Solución aproximada.
$D \frac{d^2 h(x)}{dx^2} + Q = R(x) \neq 0$ (3)	—————▶	Mediante la sustitución se introduce un error.
$\int_0^k W_i(x) R(x) dx = 0$ (4)	—————▶	El método requiere que la integral del error sea cero (0). El residuo R(x) es multiplicado por una función de peso $W_i(x)$.
$W_i(x) = \frac{X_j - x}{L}$ (5)	—————▶	Las funciones de peso son conocidas y pueden ser polinomios, funciones trigonométricas.
$W_i(x) = x^{i-1}$ (6)	—————▶	Existen tantas funciones de peso como coeficientes desconocidos en la solución aproximada.
$W_i(x) = \text{Seno}(i\pi x)$ (7)		

- La ecuación diferencial que gobierna el problema a solucionar se puede emplear en la formulación de diversos problemas: [10]

$$D \frac{d^2 y}{dx^2} + Q = 0 \quad (1) \quad \text{Ecuación diferencial.}$$

Campo	Variable primaria y	D	Fuente Q	Variable secundaria Q
1. Deflexión transversal de un cable.	Deflexión transversal	Tensión en cable	Carga transversal distribuida	Fuerza axial
2. Deformación axial de una barra	Desplazamiento longitudinal	EA (E= Módulo, A= sección.	Fricción o fuerza de contacto en la superficie de la barra	Fuerza axial.
3. Transferencia de calor.	Temperatura	Conductividad térmica.	Generación de calor.	Calor
4. Flujo en tuberías	Presión hidrostática.	$\pi D^4 / 128 \mu$, D= diámetro μ = viscosidad	Fuente de flujo	Rata de flujo
5. Flujo laminar incomprensible bajo presión.	Velocidad	Viscosidad	Gradiente de presión	Esfuerzo axial.
6. Flujo en medio poroso.	Cabeza de flujo.	Coefficiente de permeabilidad	Flujo	Flujo
7. Electroestática	Potencial electrostático.	Constante dieléctrica.	Carga	Flujo eléctrico.

Tabla 1. Campos que Gobierna la Ecuación Diferencial. Moaveni Saeed. Finite Element Analys Theory and Aplication with ANSYS. Minesota Prentice Hall. 1999.

4.3 Descripción del Motor Allen.

Los motores Allen S37-G son del tipo de encendido por compresión e inyección sólida, y funcionan en el ciclo de cuatro tiempos. El motor S37-G-BC va cargado a presión por medio de un turbocargador propulsado por el gas de escape y tiene enfriamiento del aire de carga. [1]

Los cilindros van dispuestos en línea. El diámetro del pistón sin mecanizado es de 325 mm y la carrera de 370 mm. [1]

4.3.1 Rotación:

La rotación normal del motor es de derecha a izquierda cuando se mira hacia el extremo del volante. [1]

4.3.2 Numeración y letras de los cilindros del Motor:

Si se mira desde adelante, o sea, el lado de funcionamiento, el extremo libre de un motor normal está a la izquierda y el extremo del volante a la derecha. Los distintos cilindros se numeran de manera que el cilindro número 1 es el más cercano al volante. [1]

4.3.3 Orden del encendido: [1]

Tipo de motor	Rotación normal	Rotación inversa
Motores de 8 cilindros a 750 R.P.M.	1, 4, 7, 6, 8, 5, 2, 3	1, 3, 2, 5, 8, 6, 7, 4

Tabla 2. Orden de encendido de motores Allen 8S37G. Allen W. H. Manual de Instrucciones para los Motores Diesel Allen. Bedford Inglaterra. N E I ltd.

4.4 Construcción del Motor

4.4.1 Bielas y Pistones

Cada biela tiene una tapa inferior desmontable, cuyas superficies de unión van estriadas para la colocación e inclinadas para permitir que se pueda sacar la biela a través del orificio del cilindro. La tapa se sujeta a la biela por medio de 4 pernos de acero de gran tenacidad. En el extremo inferior se acoplan rodamientos con camisas previamente acabadas de bronce al plomo con una copa delgada de acero de refuerzo, y un recubrimiento de plomo estaño, y en el extremo superior casquillos con revestimiento de cobre al plomo reforzados con una capa delgada de acero. Los pistones son de hierro fundido nodular con una cámara de enfriamiento fundida en la masa y los lados de los canales de los aros superior y segundo van templados por inducción. Para reducir el desgaste, las superficies de fricción de todos los aros de pistón van cromadas. Los muñones de pistón son completamente flotantes y se sujetan por medio de grapas circulares y van perforados para producir el conducto de suministro de aceite de enfriamiento del pistón. [1]

4.5 Sistema del Motor

4.5.1 Sistema de aire de arranque

Los Motores se ponen en marcha por medio de aire comprimido que se admite a todos los cilindros. La culata de válvulas receptoras de aire va dotada de un tapón fusible. También se puede acoplar, como componente adicional, una válvula de desahogo ajustable.

Se lleva el aire comprimido a una válvula de control accionada a mano que admite el aire a los conductos de distribución del motor, directamente

conectados a las válvulas de puesta en marcha separadas accionadas por el árbol de levas, estando cada válvula conectada a una válvula de arranque automático en la culata de cilindros.

Normalmente se acopla un disco de rotura en la conducción del distribuidor de aire de puesta en marcha. Este disco se rompe e impide averías que podrían causarse cuando hay presiones excesivas.

Las cavidades del centro de las bielas llevan el aceite a los casquillos del pie de biela y a las cámaras de enfriamiento del pistón. [1]

4.6 Requerimientos básicos para el uso del APL en los Motores ALLEN de OXYCOL.

4.6.1 Cilindro rayador

Un cilindro rayador convencional usado en motores marinos con pico de presión entre 120 – 150 bar, el espesor de la pared es requerido para 1.0". Debido a las condiciones de trabajo que el APR esta sujeto, no pueden ser pequeñas las dimensiones del pistón maquinado que fueron establecidas. [6]

4.7 Fuerzas que actúan sobre la combustión.

Carga de combustión (presión del gas). La carga de combustión en la corona del pistón del motor Allen actúa desde el Punto Muerto Superior (PMS) hasta el tercer anillo de sello con un valor de 15 MPa. [5]

4.8 PREDICCIÓN

Se busca conseguir que la corona mecanizada con el denominado anillo APR (Anti Polishing Ring), preste las mismas condiciones de servicio a la corona original sin verse afectada la integridad estructural de esta, durante las condiciones de trabajo ya sea para un motor Allen que se encuentre acoplado a un Generador GEC de 2MW o a una bomba centrífuga horizontal multietapa Ingersollrand de 80.000 barriles de crudo por día, también se busca obtener un factor de seguridad por encima de 1.4 para garantizar que la razón de la carga de falla a la carga de trabajo de la corona del pistón Mahle no supere el esfuerzo máximo de fluencia del material 42CrMo4, siendo esto nuestro punto de interés. [2]

Se tiene en cuenta trabajar en el análisis del conjunto motriz Allen con un factor de seguridad por encima de 1.4, debido a que un valor por debajo de este implicaría un riesgo de criticidad en la integridad estructural del pistón, durante la operación del motor, y un riesgo grave para la seguridad industrial de la compañía, y daños a otros equipos de la compañía. Las áreas donde operan dichos motores Allen son de criticidad C, lo cual implica que los componentes mecánicos, eléctricos, de instrumentación, etc; deben ser seguros para el personal de operaciones y otros.

5 DISEÑO METODOLOGICO

En este proyecto se elaborará un modelo del conjunto motriz de un Motor Diesel de generación y bombeo mecánico con el propósito de evaluar las cargas térmicas y estructurales a las cuales se encuentra sometido dicho conjunto motriz.

En forma general el proyecto esta enmarcado en cuatro grandes etapas:

- La primera etapa consistió en la documentación teórica de información
- En la segunda etapa del proyecto se diseñó el modelo en 3D del conjunto motriz del Motor Allen.
- La tercera etapa se importa el modelo a una herramienta de elementos finitos, la cual nos permite simular las variables de operación a las que se encuentra sometido dicho modelo.
- Finalmente en la cuarta etapa se analizan los resultados obtenidos en la etapa de simulación y se entrega un informe final el cual resume la aplicación del proyecto y las conclusiones que se obtuvieron del mismo.

5.1 ETAPA DE DOCUMENTACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta parte del proyecto se desarrolla un proceso de adquisición de información necesaria para llevar a cabo el proyecto.

5.1.1 Revisión de Conceptos Básicos Relacionados con el Tema del Proyecto.

Se examina la bibliografía general del tema y la documentación relacionada con la investigación que se va a llevar a cabo con el propósito de tener una base para la ejecución de dicho proyecto.

5.1.2 Simulación de Corona de Pistones Mahle de los Motores Allen 8S37G

Simular el comportamiento térmico y estructural de la corona Mahle, y determinar las condiciones de operación de las variables que se encuentran involucradas en este estudio.

5.2 PLANEACIÓN

En esta etapa se adquiere la información necesaria y relacionada con el tema de corona de pistones Mahle. Se hará un análisis de los recursos con los cuales cuenta el proyecto, y se creará en un ambiente de simulación de las condiciones de operación del conjunto motriz.

5.2.1 Selección de la información

En el medio existe gran cantidad de información relacionada con el tema de investigación, pero cabe aclarar que no toda nos ofrece una información clara y verídica para el desarrollo del proyecto. Por ello se hace filtrado de información, buscando la más idónea con el tema de investigación.

5.2.2 Diseño

Se elaborará en 3D el conjunto motriz del Motor Allen para llevar a cabo la simulación y así determinar el comportamiento de la corona Mahle.

5.3 Simulación

Esta parte del proyecto es fundamental debido a que se simulará las condiciones térmicas y estructurales de la corona del pistón para conocer y

determinar el mínimo margen de seguridad y la integridad estructural de dicho componente.

5.4 ANÁLISIS Y INFORME FINAL

En esta etapa se observa los resultados que nos proporciona ANSYS (Workbench), lo cual nos permite revisar, interpretar y analizar los parámetros de comportamiento que influyen en el cambio del sistema. Con esta información obtenida se procede a comparar con los resultados realizados de un estudio de similares características por la firma AVL Powertrain Engineering, con el propósito de llegar a los resultados obtenidos por esta firma.

La última etapa del proyecto está enfocada a la documentación de los desarrollos obtenidos, y la divulgación de los resultados, conclusiones, y propuestas para nuevos proyectos.

6 ESQUEMA TEMÁTICO

6.1 Modelo (Análisis Acoplado “Estructural y Térmico”)

El modelo se obtiene ensamblando las geometrías en Solid Edge V16.0 en la opción de conjunto. Se ensambló corona, falda y perno de sujeción de estas dos piezas, biela, bulón y casquete.

- Las piezas en el modelo se encuentran posicionadas por las siguientes medidas: 0.16, 0.16 y 9.96E-2 metros a lo largo de los ejes globales X, Y y Z, respectivamente.
- El modelo de un cuarto del conjunto motriz del motor Allen tiene una masa total de 33,42 kg.
- El modelo de un cuarto del conjunto motriz del motor Allen tiene un volumen total de $6.76 \times 10^{-3} \text{ m}^3$.

6.1.1 Geometría necesaria para generar los elementos.

Se optó por crear sólo un cuarto de las geometrías en 3D con el software CAD Solid Edge V16 para las siguientes piezas: corona y falda Mahle, biela, casquete y bulón Allen. Se creó el cuarto de cada una de estas piezas, ya que son simétricas tanto en geometría como en cargas.

Las piezas del conjunto motriz Allen son simétricas en cuanto a geometría porque no cambian su perfil cuando se realiza un corte longitudinal del pistón. También es simétrico el modelo del conjunto motriz Allen en cuanto a la carga estructural (carga del gas = presión pico), ya que está es la misma en cualquier área de la corona del pistón.

Una vez creadas las geometrías del conjunto motriz Allen y ensambladas en Solid Edge se importaron a el software ANSYS Workbench V10.0 de elementos finitos.

Las ventajas que nos ofreció haber creado las geometrías en el CAD Solid Edge, es que nos permite modificar con facilidad cualquiera de las cotas que necesitábamos o requeríamos para nuestro análisis en el software de flementos finitos ANSYS Workbench V10.0.

Se usa la metodología de análisis simplificado en el modelo del conjunto motriz Allen, con el fin de reducir el volumen de elementos finitos en este. Por esta razón se ensambló un cuarto de cada pieza de dicho modelo. Al aplicar este análisis simplificado se obtiene respuestas más rapidas y precisas del modelo.

Modificaciones posteriores al diseño de las geometría, resultó más fácil realizarlas para un cuarto de la geometría de la pieza que necesitabamos.

6.1.2 Geometría del conjunto motriz Allen importadas desde otra fuente (Solid Edge V16).

Las geometrías del conjunto motriz del motor Allen 8S37G consta de: Corona, falda, biela, bulón, casquete y perno sujetador de corona – falda, se elaboraron y se importaron desde Solid Edge (ver figura 6).

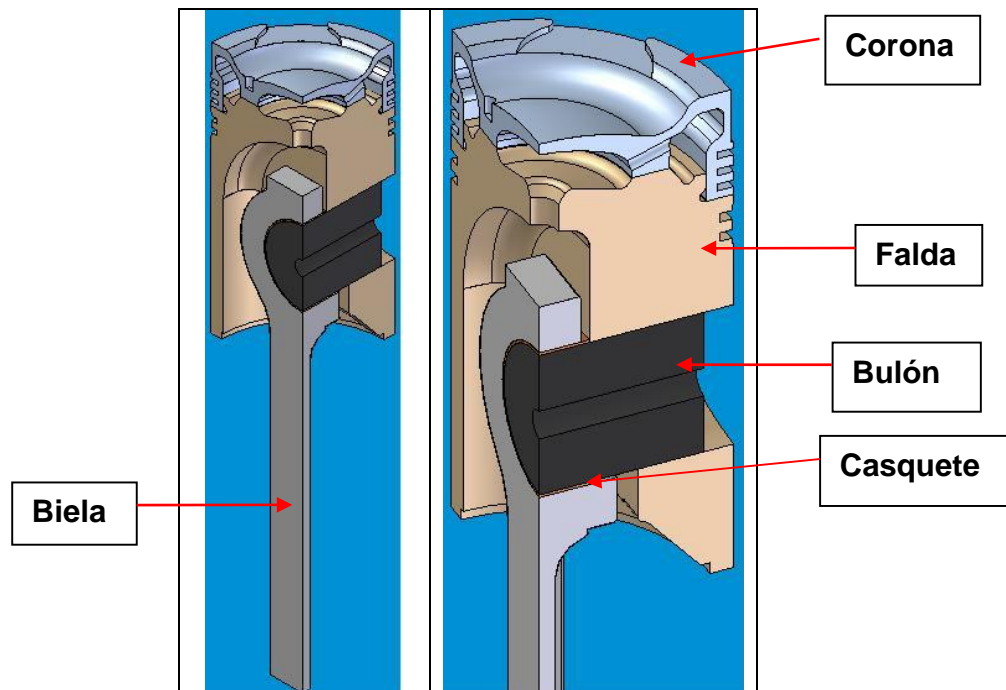


Figura 6. Partes que constituyen el conjunto motriz del motor Allen 8S37G.

Nombre	Material	Efectos del Material lineal	Posición de las piezas (m)	Masa (kg)	Volumen (m ³)
Falda	Aleación de Mahle designación 124P	Si	0.0, 0.0, 0.0	10.59	3.85E-3
Biela	42CrMo4	Si	0.0, 0.0, 0.0	10.34	1.32E-3
Bulon	42CrMo4	Si	0.0, 0.0, 0.0	6.85	8.75E-4
Perno	Acero 1020	Si	0.0, 0.0, 0.0	0.27	3.45E-5
Casquete	Bronce	Si	0.0, 0.0, 0.0	0.19	2.19E-5
Solo un cuarto de Corona	42CrMo4	Si	0.16, 0.16, 9.96E-2	5.17	6.61E-4

Tabla 3. Piezas del conjunto motriz Allen y sus propiedades masicas.

6.1.3 Contactos

Se utilizan contactos con una tolerancia de 6,3143 E-4 metros para la detención automática.

Nombre	Tipo de contacto	Coefficientes de fricción	Cuerpos asociados	Comportamiento	Formulación	Conductancia termica
Falda a Perno	soldado	N/A	Falda y Perno	Simetrico	Penetracion pura	Controlada por el programa
Falda a Bulon	soldado	N/A	Falda y Bulon	Simetrico	Penetracion pura	Controlada por el programa
Biela a Casquete	soldado	N/A	Biela y Casquete	Simetrico	Penetracion pura	Controlada por el programa
Bulon a Casquete	sin friccion	N/A	Bulon y Casquete	Simetrico	Penetracion pura	Controlada por el programa
Falda a solo un cuarto de Corona	con friccion	0.15	Falda y solo un cuarto de Corona	Simetrico	Penetracion pura	Controlada por el programa
Perno a solo cuarto de Corona	soldado	N/A	Perno y solo un cuarto de Corona	Simetrico	Penetracion pura	Controlada por el programa

Tabla 4. Condiciones de contacto.

6.1.3.1 Tipos de contactos que se utilizaron en las piezas del conjunto Motriz Allen.

Se utilizó contacto tipo soldado entre la falda y el bulón del pistón Mahle, ver figura 7.

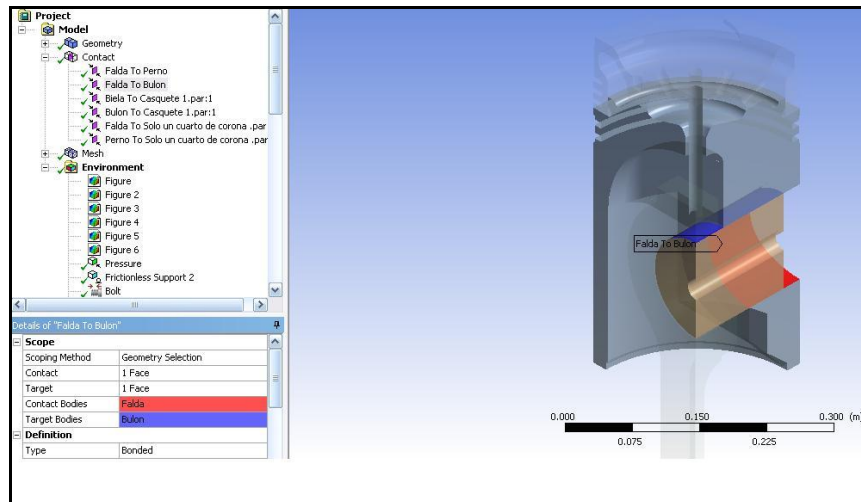


Figura 7. Contacto tipo soldado entre Falda - Bulón.

Este tipo de contacto nos ofrece las siguientes características:

6.1.3.1.1 Contacto tipo soldado:

Esta es la configuración por defecto de contacto para las regiones. En caso de presentarse en las regiones de contacto condiciones de servidumbre, deslizamientos o separación entre caras o bordes no esta permitido. Se piensa en la región como pegados. Este tipo de contacto permite una solución lineal ya que el contacto en la parte de longitud/área no cambiará durante la aplicación de la carga.

Se utilizó contacto tipo soldado entre la biela y el casquete del conjunto motriz Allen, ver figura 8.

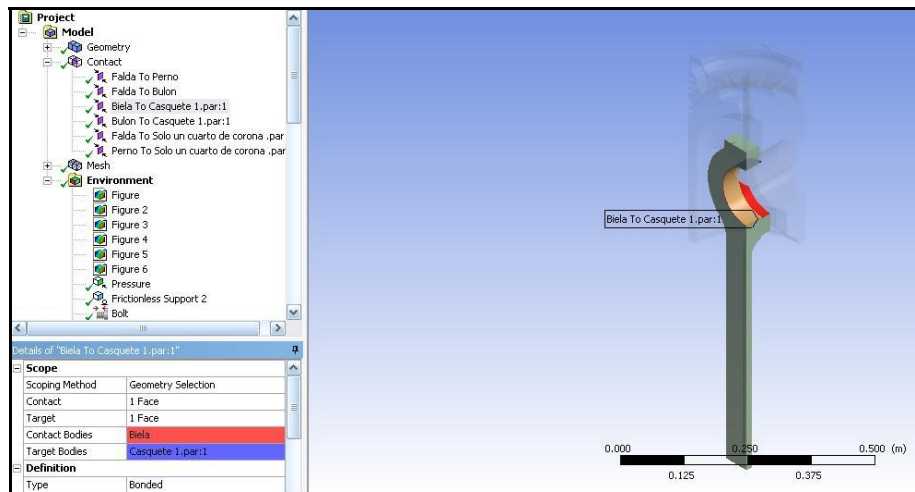


Figura 8. Contacto tipo soldado entre Biela - Casquete.

El contacto soldado que se aplicó entre la biela y el casquete nos ofrece las mismas características como las mencionadas anteriormente entre las áreas de contacto de la faldá y el bulón.

Finalmente se utilizó contacto tipo sin fricción entre las piezas bulón – casquete del conjunto motriz Allen, ver figura 9.

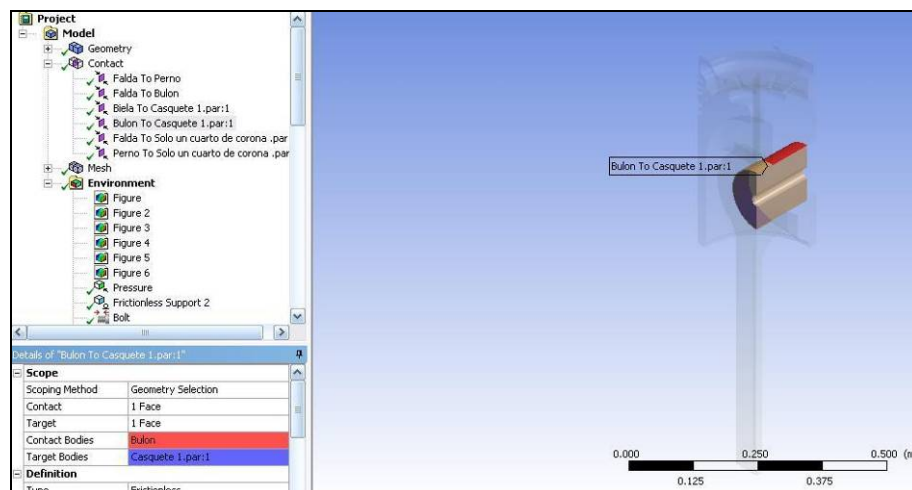


Figura 9. Contacto tipo sin fricción entre Bulón - Casquete.

El contacto tipo sin fricción que se aplicó entre las piezas bulón – casquete, nos ofrece las siguientes características:

6.1.3.1.2 Contacto tipo sin fricción:

Esta configuración es estándar de los modelos de contacto unilateral, es decir, la presión normal es igual a cero si se llegase a producir la separación. Sólo se aplica a las regiones de caras. Por lo tanto puede formar vacíos en el modelo entre los cuerpos en función de la carga. Esta solución es no lineal debido a que el área de contacto puede cambiar a medida que la carga es aplicada. Un coeficiente cero de fricción, por lo tanto se supone que no permite un libre deslizamiento. El modelo se encuentra bien limitado con el uso este contacto, para ayudar a estabilizar el modelo, a fin de lograr una solución razonable.

6.1.4 Enmallado

- La malla asociada con el “modelo” tiene una relevancia del 40%.
- La malla contiene 46686 nodos y 27009 elementos.

Nombre	Material	Efectos del material lineal	Nodos	Elementos
Falda	Aleacion Mahle designacion 124P	Si	14548	9327
Biela	42CrMo4	Si	3085	1658
Bulon	42CrMo4	Si	1536	264
Perno	Acero 1020	Si	1312	250
Casquete	Bronce	Si	382	42
Solo un cuarto de corona	42CrMo4	Si	25823	15468

Tabla 5. Cantidad de nodos y elementos en las piezas del conjunto motriz Allen.

6.1.4.1 Procedimiento para enmallar las geometrías del conjunto motriz Allen con el software ANSYS Workbench V10.0

Las geometrías del conjunto motriz de las unidades Allen, se enmallaron efectuando un simple comando. El procedimiento de enmallado es: seleccionamos toda la geometría (corona del pistón) y luego hacemos click en el comando body en el software ANSYS Workbench V 10.0, ver figura 10.

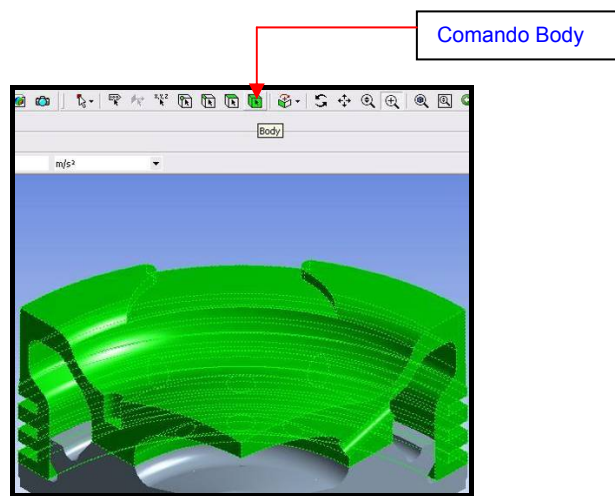


Figura 10. Geometría seleccionada con el comando de enmallado.

Posteriormente hacemos click en el comando mesh, y luego click en preview mesh para obtener el enmallado en toda la geometría del conjunto motriz, ver figura 11. Se utilizó este procedimiento de enmallado seleccionando cada una de las piezas del conjunto motriz Allen: Corona, falda, biela, bulón, casquete y perno.

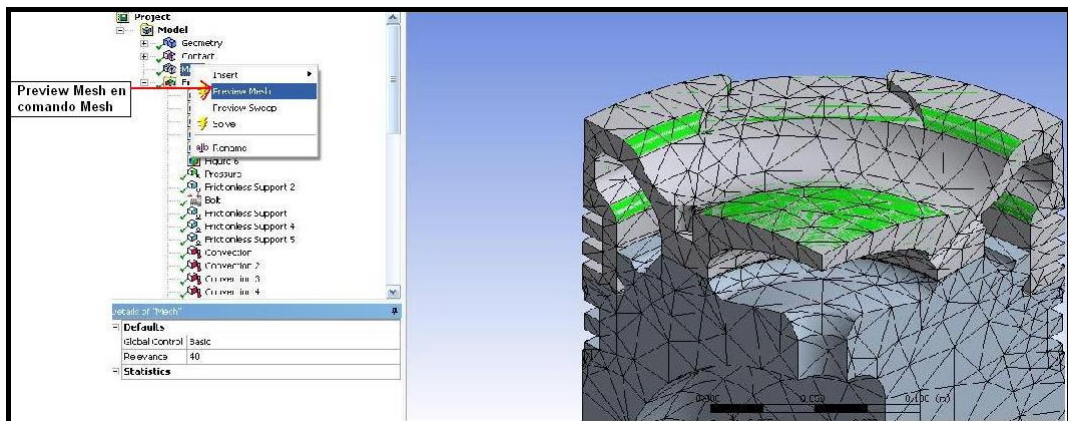


Figura 11. Enmallado en la corona y demas piezas del conjunto motriz Allen.

Finalmente aplicamos el procedimiento mencionado en: *control de malla*, para obtener resultados más precisos. Los resultados más precisos se consiguen debido a la discretización de nodos que se aplicó en el enmallado del modelo “corona del pistón Mahle”.

6.1.4.2 Tipo de elemento que se utilizó:

Se usó elemento Tetraédrico para el análisis del conjunto motriz Allen, ya que este tipo de elemento tiene sólo tres grados de libre translación por nodo, ver figura 12(a). La exactitud del elemento Tetraédrico y Hexaédrico es aumentada por la introducción adicional de nodos a la media cara, ver figura 12(b).

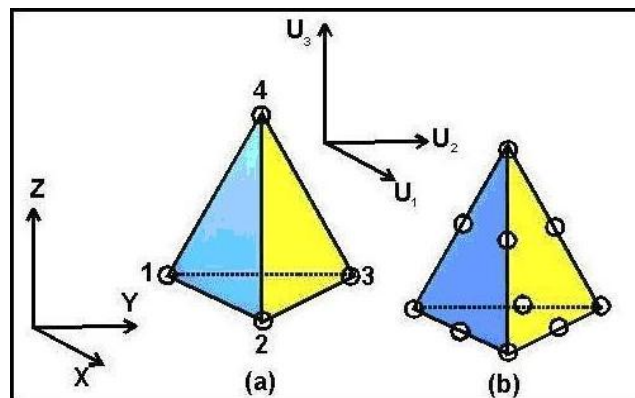


Figura 12 (a) Cuatro nodos - tetraédrico; (b) Diez nodos - tetraédrico.

La técnica de generación de malla automática favorece para elementos Tetraédrico y Hexaédrico por encima de elementos ladrillos (elementos rígidos) creado para modelos detallados de tres sistemas de dimensiones con geometrías complejas. Todos los elementos Tetraédrico son más versátiles modelando desde geometrías complicadas, y facilita la transición desde regiones de enmallado de manera ordinaria a regiones de enmallado finamente en un modelo.

6.1.4.3 Procedimiento de control de malla.

Se solicitó una respuesta de error estructural para valorar la calidad del mallado del modelo, buscando definir estrategias para mejorar la calidad de los resultados, de acuerdo a los valores máximos y mínimos de energía en la corona del pistón, ver figura 13. La estrategia para mejorar los resultados de esfuerzo equivalentes y temperatura se consigue analizando la malla alrededor de los valores máximos y mínimos de energía.

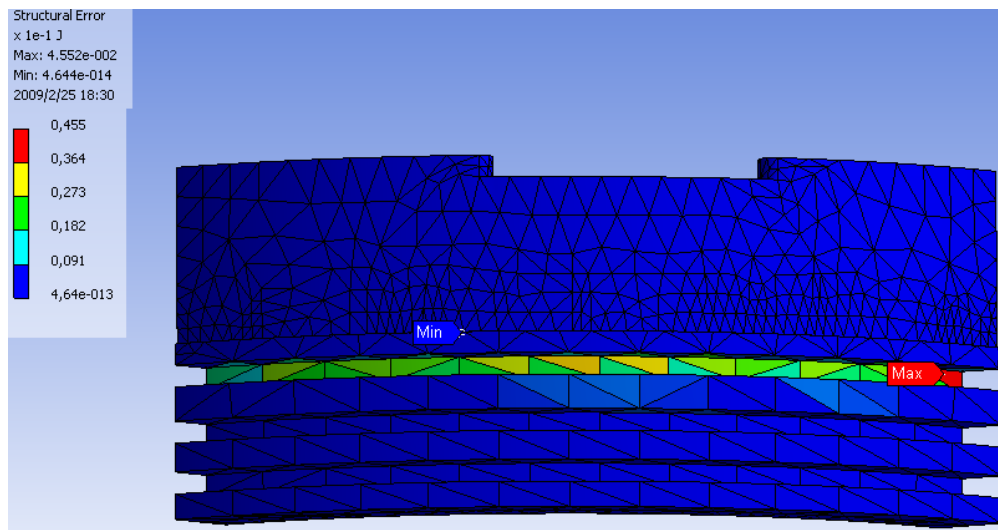


Figura 13. Error estructural en la corona Mahle.

Una distribución de los valores del enmallado uniforme se consigue utilizando la herramienta de convergencia, en la cuál se aplicó un

esfuerzo equivalente para la parte estructural, en el área donde se localizó, el máximo y mínimo valor de energía en el error estructural, que se aplicó en la corona.

Obtener un enmallado uniforme en la corona Mahle es fundamental ya que esta pieza lo requiere por la implementación del anillo APR, por sus siglas en inglés Anillo Anti Brillo. La implementación del APR hace que el área entre el orificio interno de lubricación y la pared del anillo APR (ver figura 14), sea de bastante interés ya que la reducción de material disminuye la integridad estructural de está.

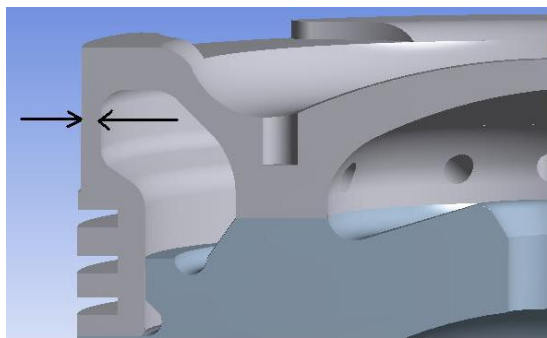


Figura 14. Área de interés en la corona del pistón Mahle.

6.1.4.4 Control realizado en el enmallado de la corona Mahle.

En la región 1 (refinamiento para el análisis estructural), a los respectivos elementos tetraédrico del enmallado se les aplicó un refinamiento con un valor de 4 y profundidad de refinamiento de 1 (ver figura 16). Se aplicó esta metodología de refinamiento para el área de la corona que se muestra en la figura 15.

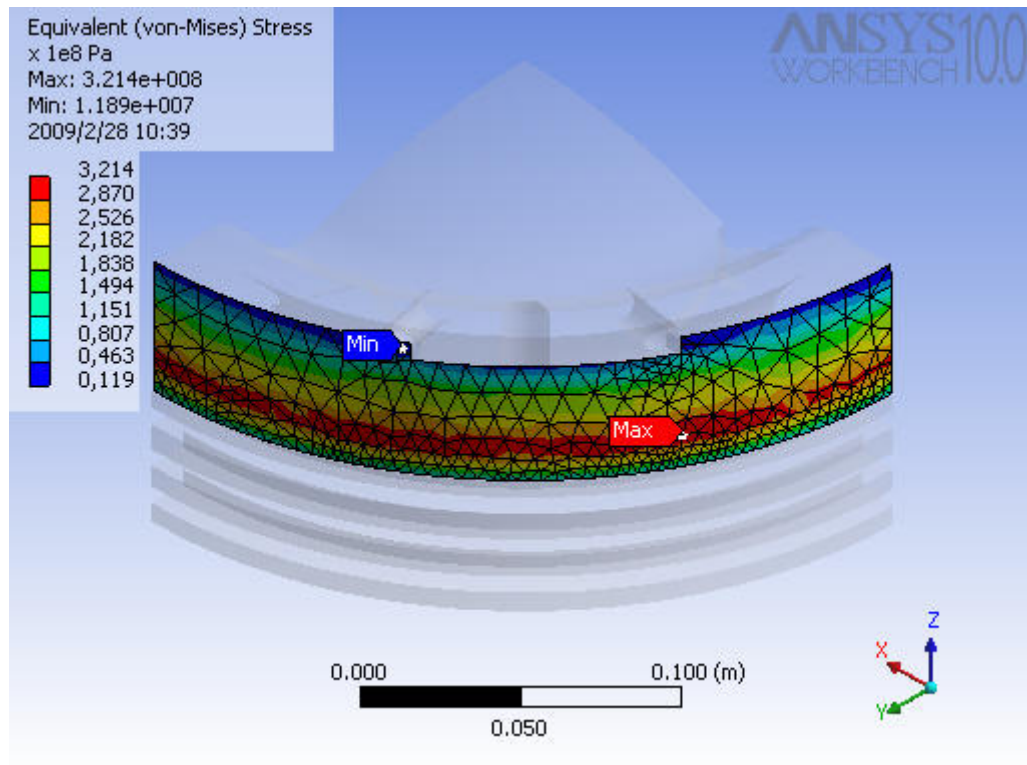


Figura 15. Region 1 (refinamiento para el analisis estructural de la corona).

La regione refinadas con este procedimiento se encuentran dentro de un tamaño fino y uniforme, dado que el valor numérico asignado en el software “ANSYS Workbench V10.0”, es el idóneo para este estudio.

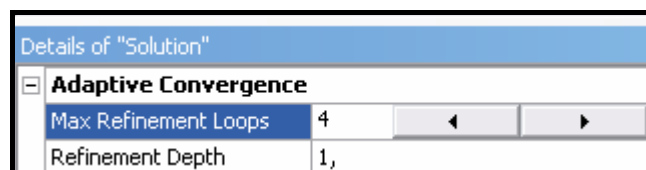


Figura 16. Valores de Refinamiento.

6.2 Ambiente

- El tipo de análisis es estático.
- El tipo de análisis es de esfuerzo térmico.

"Las condiciones de frontera en el ambiente se muestran desde la figura 18 hasta la 36, que contiene todas las condiciones de carga térmicas definidas para el "modelo" en este escenario.

6.2.1 Condiciones de fronteras térmicas

Nombre	Tipo	Temperatura de ambiente ($^{\circ}C$)	Coefficiente de película ($W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$)	Reacción	Piezas que se le aplicaron las condiciones de frontera	Ver figura
Convección 1	Constante	752	530	1281.15 W	Cuarto de Corona	17
Convección 2	Constante	752	970	3170.88 W	Cuarto de Corona	18
Convección 3	Constante	752	700	328.63 W	Cuarto de Corona	19
Convección 4	Constante	752	500	806.23 W	Cuarto de Corona	20
Convección 5	Constante	752	600	906.35 W	Cuarto de Corona	21
Convección 6	Constante	752	600	136.95 W	Cuarto de Corona	22
Convección 7	Constante	752	200	180.7 W	Cuarto de Corona	23
Convección 8	Constante	150	9000	196.2 W	Cuarto de Corona	24
Convección 9	Constante	140	3000	79.01 W	Cuarto de Corona	25
Convección 10	Constante	140	1500	60.32 W	Cuarto de Corona	26
Convección 11	Constante	130	500	31.45 W	Falda	27
Convección 12	Constante	120	500	36.88 W	Falda	28
Convección 13	Constante	115	750	-261.83 W	Falda	29
Convección 14	Constante	115	1350	-12.35 W	Falda	30
Convección 15	Constante	115	1800	-97.52 W	Falda	31
Convección 16	Constante	115	1800	-1,308.96 W	Cuarto de Corona	32
Convección 17	Constante	110	2250	-501.92 W	Cuarto de Corona	33
Convección 18	Constante	105	2250	-391.28 W	Falda	34
Convección 19	Constante	105	2250	-4.640.81 W	Cuarto de Corona	35

Tabla 6. Valores de cargas térmicas para cada área del conjunto motriz Allen.

6.2.1.1 Areas que se le efectuaron las condiciones de frontera térmicas de acuerdo a la tabla 6.

- Temperatura 1 y coeficiente de convección 1 en la región superior de la corona = $752\text{ }^{\circ}\text{C}$, $530\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 17.

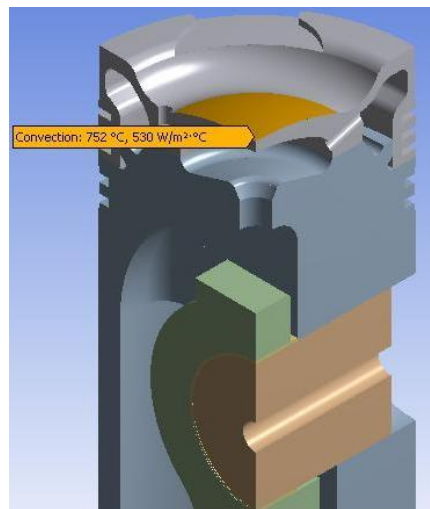


Figura 17. Temperatura 1 y Coeficiente de Convección 1.

- Temperatura 2 y coeficiente de convección 2 en la región superior de la corona = $752\text{ }^{\circ}\text{C}$, $970\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 18.

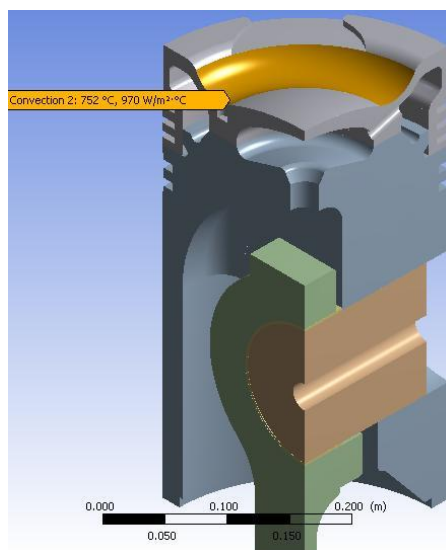


Figura 18. Temperatura 2 y Coeficiente de Convección 2.

- Temperatura 3 y coeficiente de convección 3 en la región superior de la corona = $752\text{ }^{\circ}\text{C}$, $700\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 19.

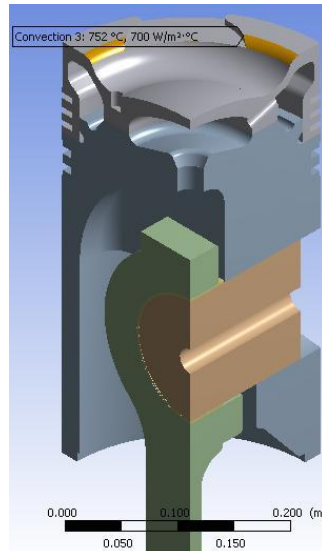


Figura 19. Temperatura 3 y Coeficiente de Convección 3.

- Temperatura 4 y coeficiente de convección 4 en la región superior de la corona = $752\text{ }^{\circ}\text{C}$, $500\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 20.

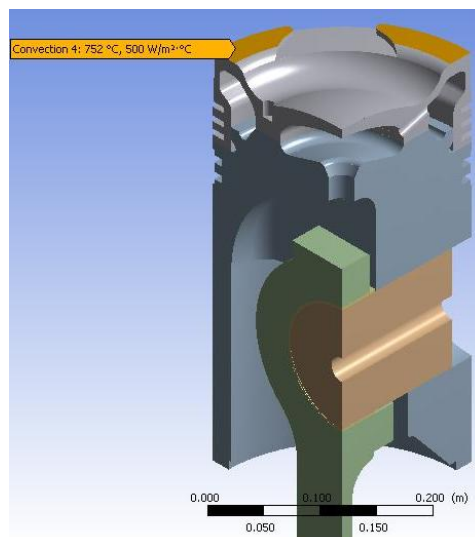


Figura 20. Temperatura 4 y Coeficiente de Convección 4.

- Temperatura 5 y coeficiente de convección 5 en la región superior de la corona = $752\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ W/ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 21.

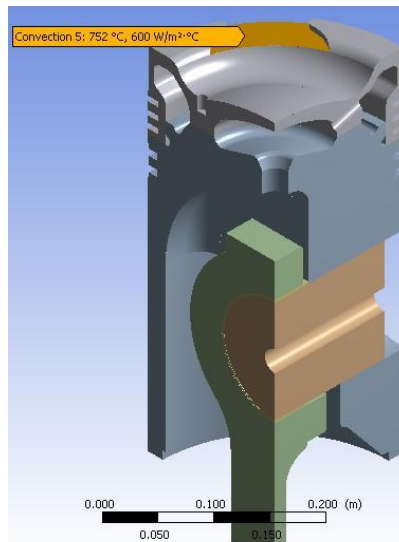


Figura 21. Temperatura 5 y Coeficiente de Convección 5.

- Temperatura 6 y coeficiente de convección 6 en la región superior de la corona = $752\text{ }^{\circ}\text{C}$, $600\text{ W/ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 22.

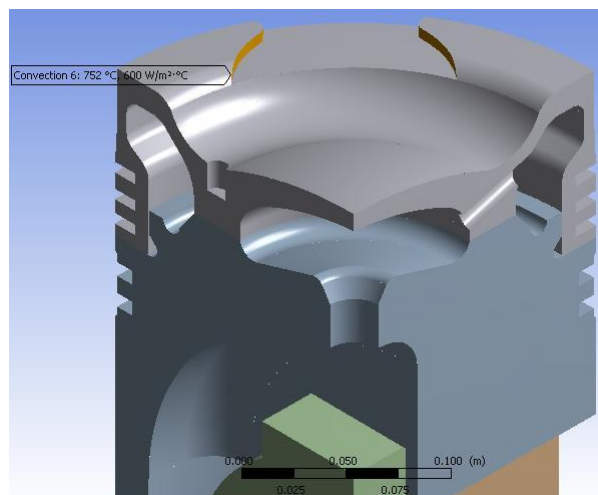


Figura 22. Temperatura 6 y Coeficiente de Convección 6.

- Temperatura 7 y coeficiente de convección 7 entre el anillo de fuego (APR) y la ranura del primer anillo de sello de la corona = 752°C , $200\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 23.

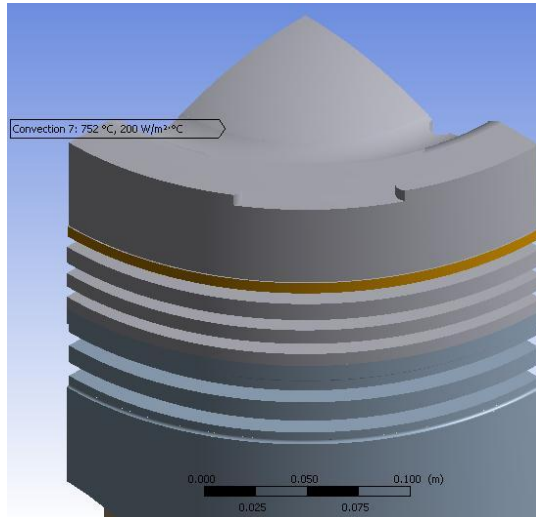


Figura 23. Temperatura 7 y Coeficiente de Convección 7.

- Temperatura 8 y coeficiente de convección 8 en la ranura del primer anillo de sello de la corona = 150°C , $9000\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 24.

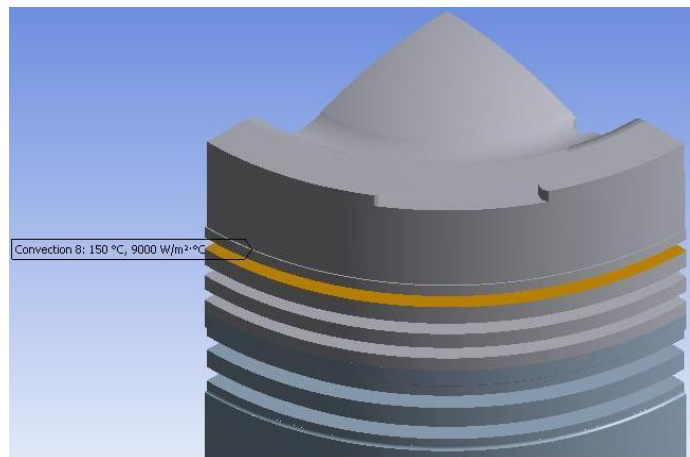


Figura 24. Temperatura 8 y Coeficiente de Convección 8.

- Temperatura 9 y coeficiente de convección 9 en la ranura del segundo anillo de sello de la corona = $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3000\text{ W/ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 25.

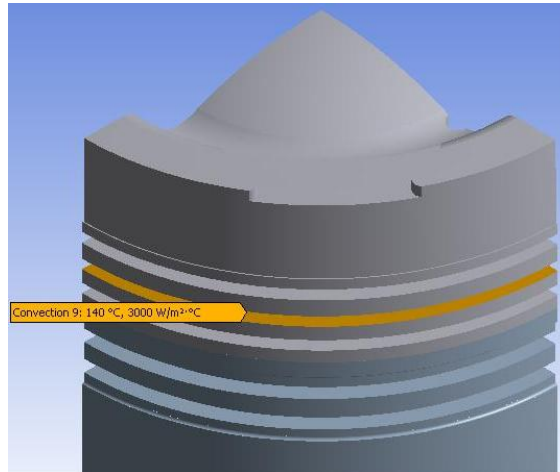


Figura 25. Temperatura 9 y Coeficiente de Convección 9.

- Temperatura 10 y coeficiente de convección 10 en la ranura del tercer anillo de sello de la corona = $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1500\text{ W/ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 26.

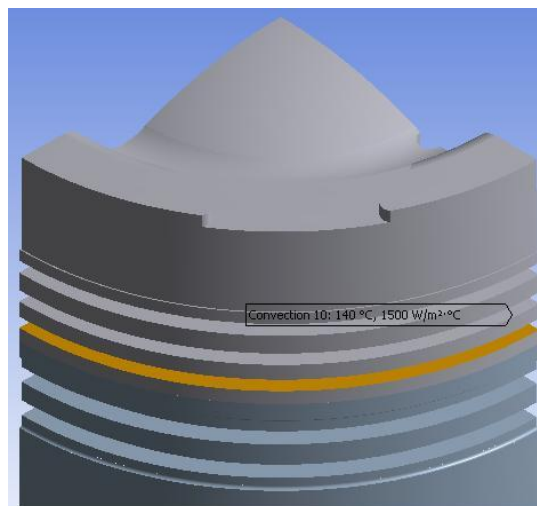


Figura 26. Temperatura 10 y Coeficiente de Convección 10.

- Temperatura 11 y coeficiente de convección 11 entre la primera ranura y la tercera ranura de los anillos raspadores de aceite de la falda del pistón Mahle = 130 ° C, 500 W/ m² ° C, ver figura 27.

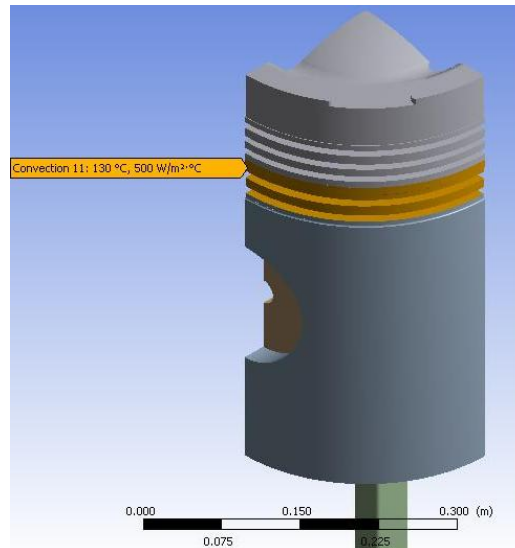


Figura 27. Temperatura 11 y Coeficiente de Convección 11.

- Temperatura 12 y coeficiente de convección 12 entre la tercera ranura del anillo raspador de aceite y la parte inferior de la falda del pistón Mahle = 120 ° C, 500 W/ m² ° C, ver figura 28.

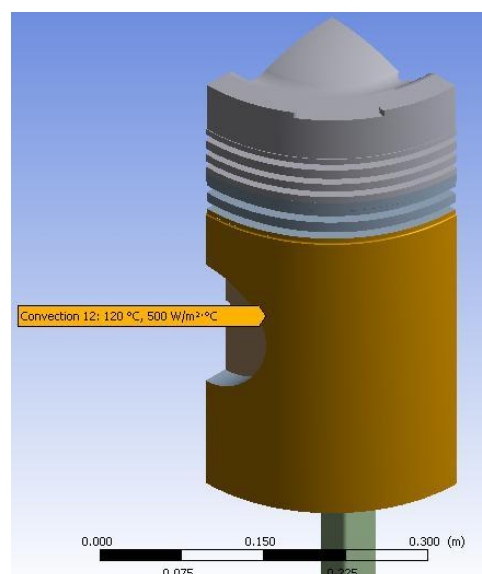


Figura 28. Temperatura 12 y Coeficiente de Convección 12.

- Temperatura 13 y coeficiente de convección 13 en la parte interior de la falda del pistón Mahle = $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, $750\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 29.

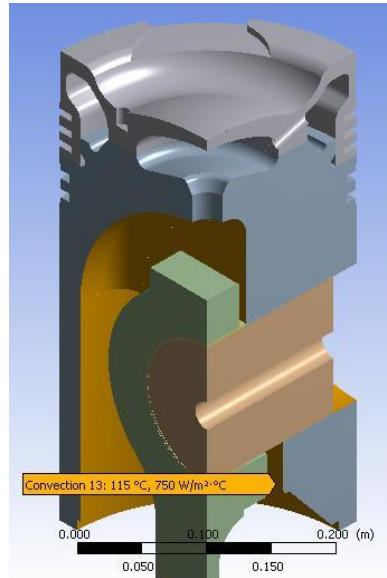


Figura 29. Temperatura 13 y Coeficiente de Convección 13.

- Temperatura 14 y coeficiente de convección 14 en el orificio interno central de lubricación de la falda del pistón Mahle = $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1350\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 30.

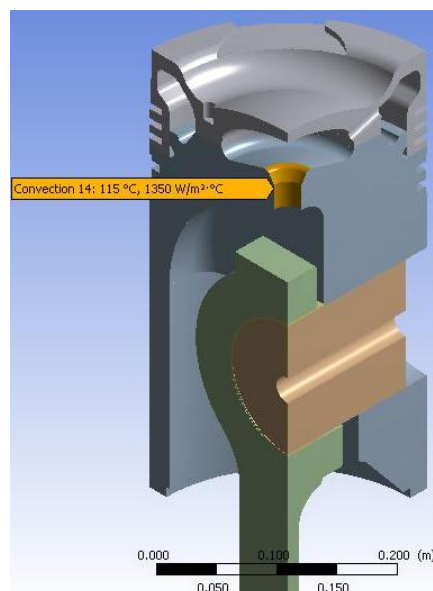


Figura 30. Temperatura 14 y Coeficiente de Convección 14.

- Temperatura 15 y coeficiente de convección 15 en la parte superior central de la falda del pistón Mahle = $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1800\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 31.

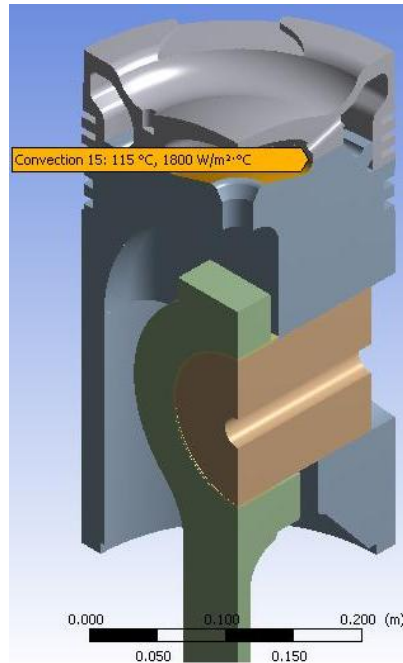


Figura 31. Temperatura 15 y Coeficiente de Convección 15.

- Temperatura 16 y coeficiente de convección 16 en la parte interna central de la corona del pistón Mahle = $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1800\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 32.

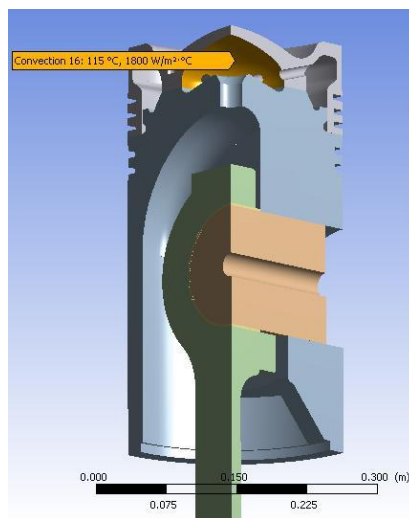


Figura 32. Temperatura 16 y Coeficiente de Convección 16.

- Temperatura 17 y coeficiente de convección 17 en la parte interior de los dos orificios de lubricación de la corona del pistón Mahle = $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2250\text{ W/ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 33.

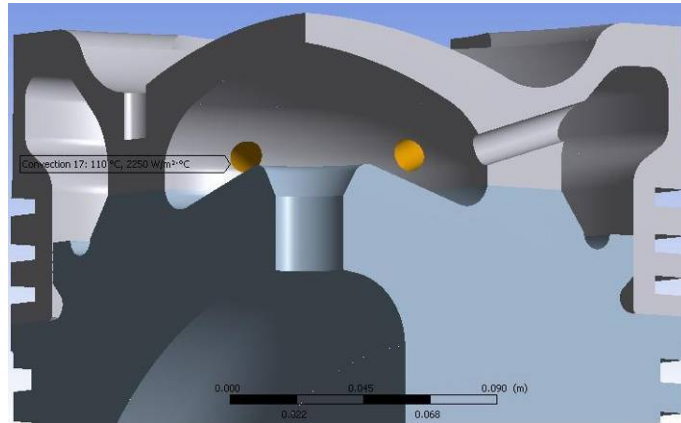


Figura 33. Temperatura 17 y Coeficiente de Convección 17.

- Temperatura 18 y coeficiente de convección 18 en la parte superior libre contigua a la base de arriba entre corona y falda del pistón Mahle = $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, $2250\text{ W/ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$, ver figura 34.

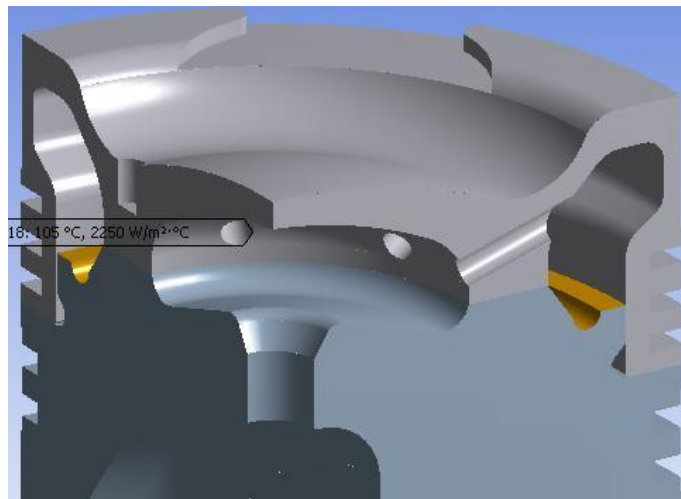


Figura 34. Temperatura 18 y Coeficiente de Convección 18.

- Temperatura 19 y coeficiente de convección 19 en la parte superior interna de la corona del pistón Mahle = 105 ° C, 2250 W/ m² °C, ver figura 35.

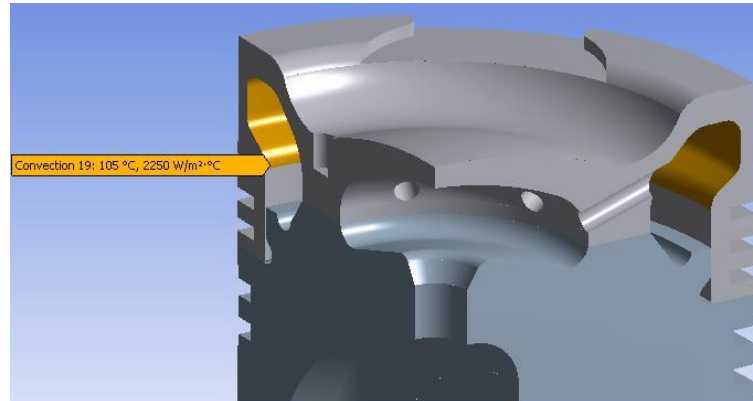


Figura 35. Temperatura 19 y Coeficiente de Convección 19.

6.2.2 Condiciones de frontera estructurales.

Nombre	Tipo	Magnitud	Vector	Fuerza de reaccion	Vector fuerza de reaccion	Momento de reaccion	Vector momento de reaccion	Cuerpos asociados o piezas que se le aplicaron la presion
Presion	Presion	1.5E+7 Pa	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Solo un cuarto de corona

Tabla 7. Cargas estructurales.

- Presión pico en el área superior de la corona Mahle hasta el tercer anillo de sello. Presión pico = 15 MPa, ver figura 36.

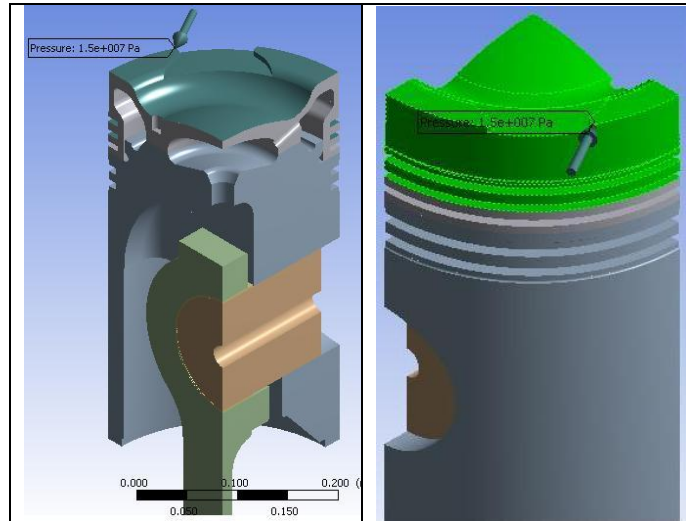


Figura 36. Área donde se encuentra aplicada la presión pico en el pistón Mahle.

Nombre	Tipo	Definición por	Precarga	Reacción de ajuste	Carga de Trabajo	Cuerpos asociados o piezas que se le aplicaron la precarga
Perno	Cara lateral del perno	Carga	53 000 N	1.63 E-5 m	79,134.0 N	Perno

Tabla 8. Precarga del perno sujetador de corona y falda del pistón.

- La precarga entre el perno sujetador de corona y falda del pistón Mahle con un valor de 53 kN, se encuentra aplicada en el área del perno, ver figura 37.

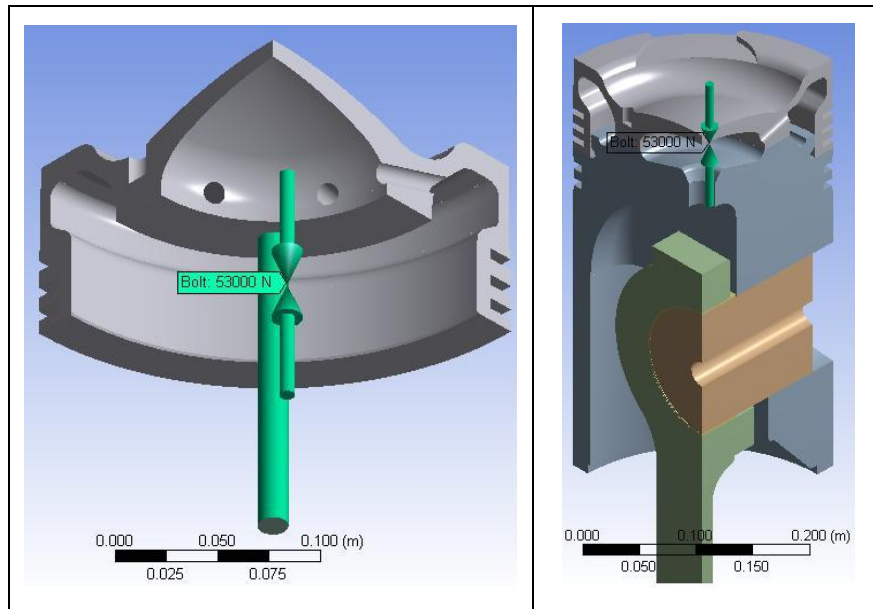


Figura 37. Precarga del perno sujetador de la corona y falda del pistón Mahle.

6.2.2.1 Soportes estructurales

Nombre	Tipo	Fuerza de reaccion	Vector fuerza de reaccion	Momento de reaccion	Vector momento de reaccion	Cuerpos asociados
Soportes sin friccion 2	Soportes sin friccion	111,347.59 N	[81,142.85 N x, -76,250.39 N y, -2.04×10 ⁻¹³ N z]	9,257.98 N·m	[-6,602.43 N·m x, -6,482.59 N·m y, -306.89 N·m z]	Solo un cuarto de corona
Soportes sin friccion 1	Soportes sin friccion	434,385.36 N	[-434,375.86 N x, 2,874.21 N y, 0.0 N z]	21,085.66 N·m	[139.52 N·m x, 21,085.01 N·m y, -89.91 N·m z]	Falda
Soportes sin friccion 4	Soportes sin friccion	189,762.05 N	[177,298.24 N x, -67,638.52 N y, -9.82×10 ⁻¹³ N z]	27,817.81 N·m	[16,537.42 N·m x, 14,713.05 N·m y, -16,848.45 N·m z]	Bulon
Soportes sin friccion 5	Soportes sin friccion	154,841.78 N	[142,205.18 N x, -41,106.99 N y, 45,429.92 N z]	22,701.55 N·m	[11,378.59 N·m x, 19,619.9 N·m y, -973.35 N·m z]	Biela
Soportes sin friccion 6	Soportes sin friccion	188,064.16 N	[1,244.37 N x, 188,060.04 N y, 0.0 N z]	2,567.98 N·m	[-806.75 N·m x, 5.34 N·m y, 2,437.96 N·m z]	Falda
Soportes sin friccion 7	Soportes sin friccion	42,461.29 N	[-13,507.85 N x, 40,255.42 N y, -9.28×10 ⁻¹⁴ N z]	362.3 N·m	[109.17 N·m x, 110.66 N·m y, -327.25 N·m z]	Casquete
Soportes sin friccion 8	Soportes sin friccion	305,784.15 N	[-2.78 N x, 10.21 N y, 305,784.15 N z]	3,854.65 N·m	[-3,589.44 N·m x, -1,405.09 N·m y, 0.11 N·m z]	Biela

Tabla 9. Soportes Estructurales.

Paso	Magnitud de la fuerza de reaccion	Vector fuerza de reaccion
Pao 1	1.39×10^{-2} N	$[4.99 \times 10^{-3}$ N x, -6.22×10^{-3} N y, -1.14×10^{-2} N z]

Tabla 10. Weak Spring.

6.3 Solución

- Las soluciones son controladas en el programa.
- El paso weak spring es controlado en el programa.
- Las grandes deformaciones se encuentran neutralizadas.

La solución contiene los cálculos de las respuestas para el modelo (corona del pistón Mahle en el conjunto motriz del motor Allen) que se encuentra cargado con las condiciones de frontera definidas en el ambiente.

- La expansión térmica utiliza cálculos a una temperatura de referencia constante de 22°C para todas las piezas en el modelo “conjunto Motriz del Motor Allen”. Teóricamente a una temperatura uniforme de 22°C no resulta esfuerzos desde la expansión o contracción térmica.

6.3.1 Resultados Estructurales

Nombre	Figura	Campo	Mínimo	Máximo	Mínimo ocurrió en	Máximo ocurrió en	Alerta crítica
Esfuerzo Equivalente	Ver Figura 45 y 46.	Solo un cuarto de Corona	4.195×10^6 Pa	4.486×10^8 Pa	Solo un cuarto de Corona	Solo un cuarto de Corona	Ninguna
Máximo Esfuerzo Cortante	Ver Figura 47 y 48.	Solo un cuarto de Corona	2.418×10^6 Pa	2.482×10^8 Pa	Solo un cuarto de Corona	Solo un cuarto de Corona	Ninguna
Deformación Total	Ver Figura 49.	Solo un cuarto de Corona	4.218×10^{-4} metros	7.734×10^{-4} metros	Solo un cuarto de Corona	Solo un cuarto de Corona	Ninguna

Tabla 11. Valores Estructurales.

Nombre	Tipo	Cambio Admisible	Ultimo Cambio	Estado
"Equivalent Stress 2"	Maximum	± 5.0%	-1.84%	Converged

Tabla 12. Seguimiento de convergencia.

Nombre	Solucion Base	Refinamiento 1	Refinamiento 2
"Equivalent Stress 2"	3.17×10^8 Pa	3.27×10^8 Pa [+3.36%]	3.21×10^8 Pa [-1.84%]
Mesh properties	Nodes: 27139 Elements: 14873	Nodes: 36376 Elements: 20744	Nodes: 46686 Elements: 27009

Tabla 13. Historial de Solución.

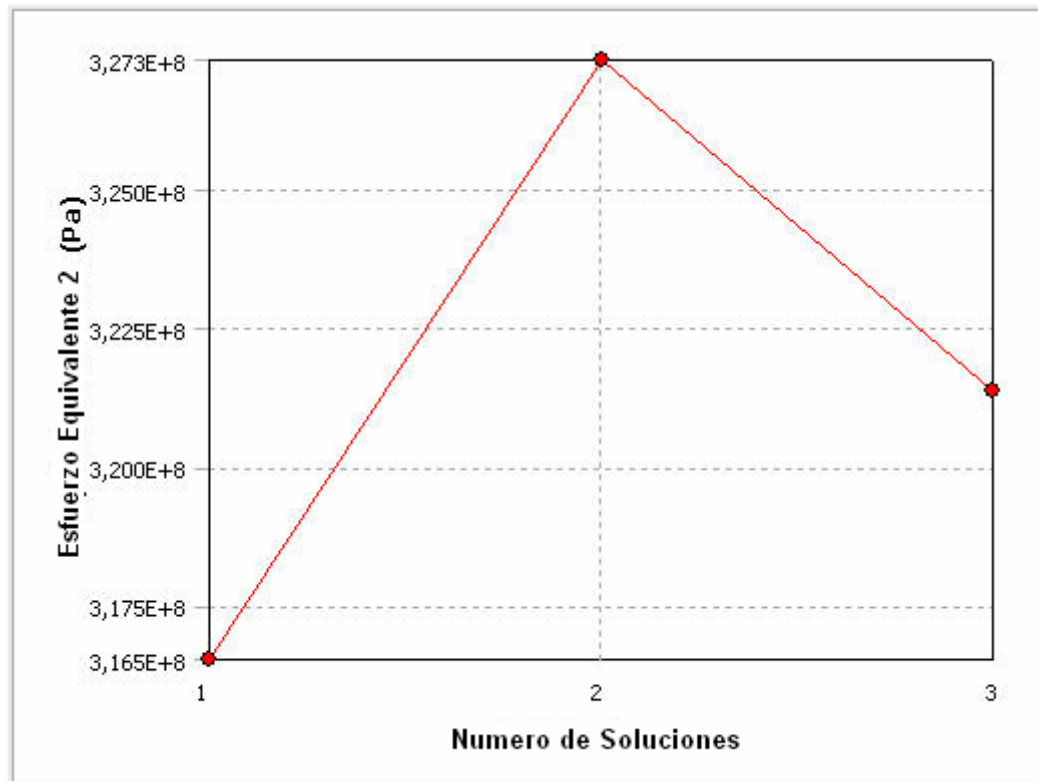


Tabla 14. Convergencia del Esfuerzo Equivalente 2.

6.3.2 Resultados Térmicos

Nombre	Figura	Campo	Mínimo	Máximo	Mínimo ocurrió en	Máximo ocurrió en	Alerta Crítica
Temperatura	Ver Figura 50.	Solo un cuarto de Corona	128.0 °C	378.7 °C	Solo un cuarto de Corona	Solo un cuarto de Corona	Ninguna
Flujo Total de calor	Ver Figura 51.	Solo un cuarto de Corona	5.453 W/m ²	8.024W/m ²	Solo un cuarto de Corona	Solo un cuarto de Corona	Ninguna

Tabla 15. Valores Térmicos.

6.3.3 Seguridad del esfuerzo equivalente

Nombre	Límite de Esfuerzo
"Herramienta de Esfuerzo"	Límite elástico para el material

Tabla 16. Definición.

Nombre	Figura	Campo	Tipo	Mínimo	Alerta Crítica
"Herramienta de Seguridad"	Ver Figura 52 y 53.	Solo un cuarto de Corona	Factor de Seguridad	2.0061	Ninguna

Tabla 17. Valor de Seguridad del Esfuerzo Equivalente.

6.4 Apendice del software (ANSYS Workbench V10.0) para el Modelo “ Conjunto Motriz del Motor Allen”.

6.4.1 Figuras

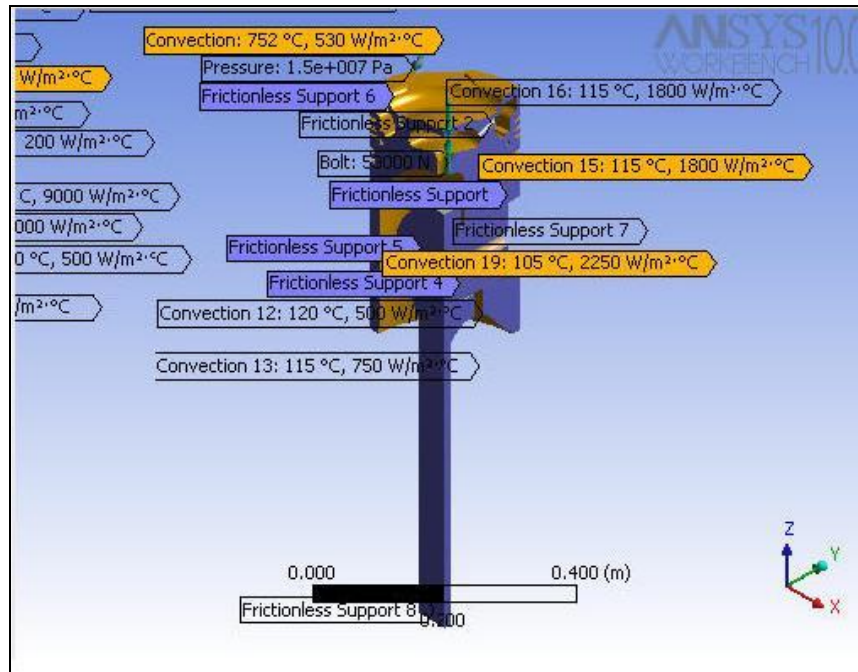


Figura 38. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.

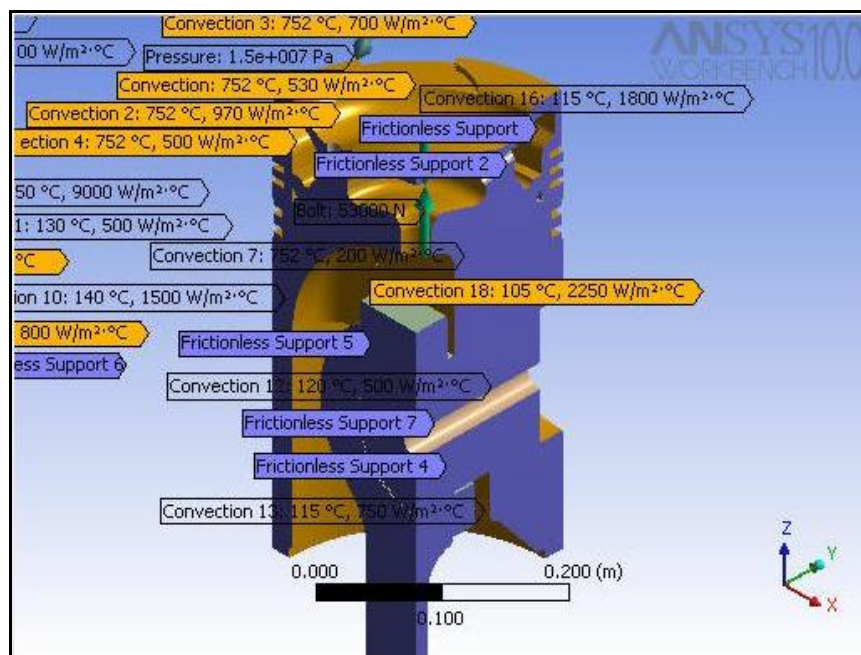


Figura 39. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.

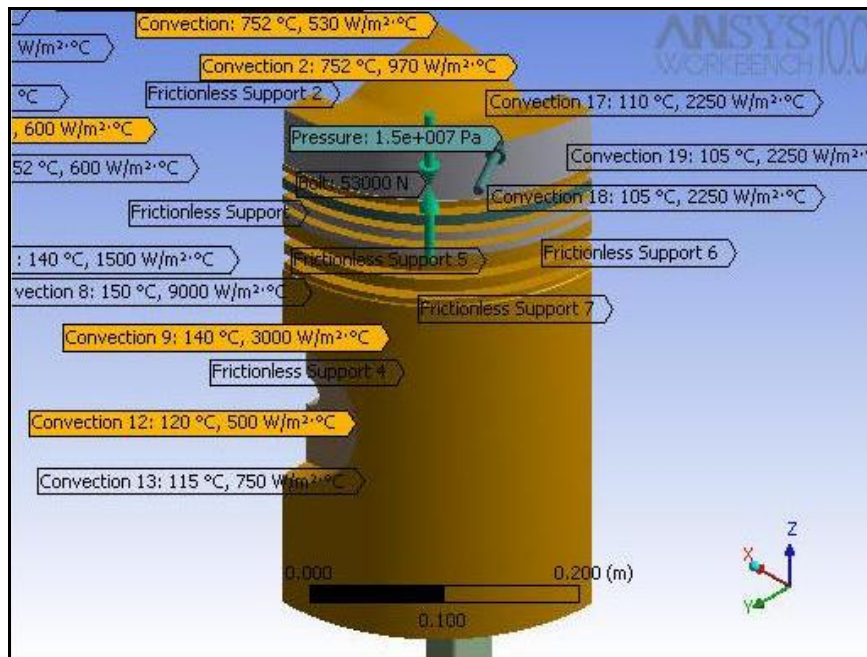


Figura 40. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.

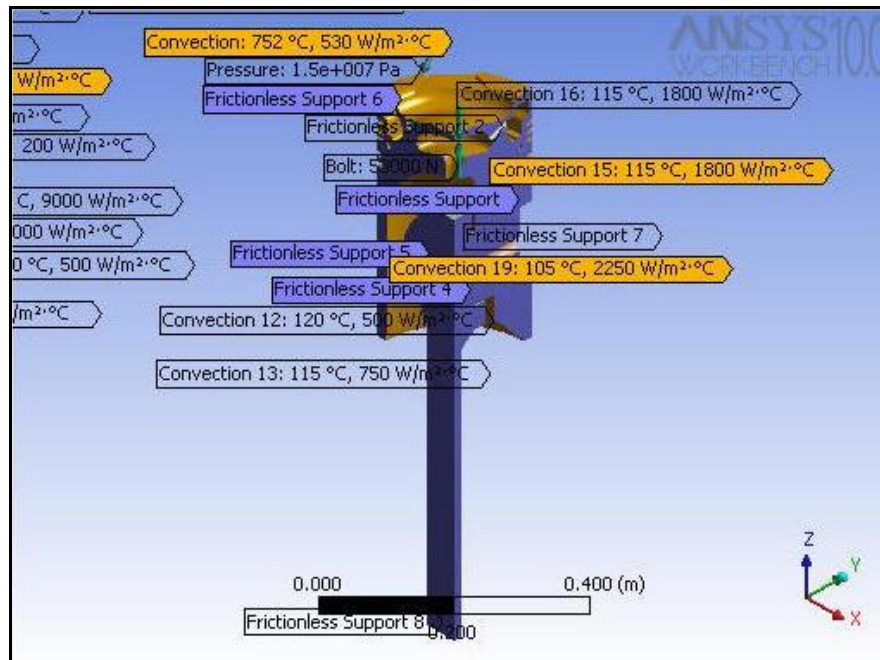


Figura 41. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.

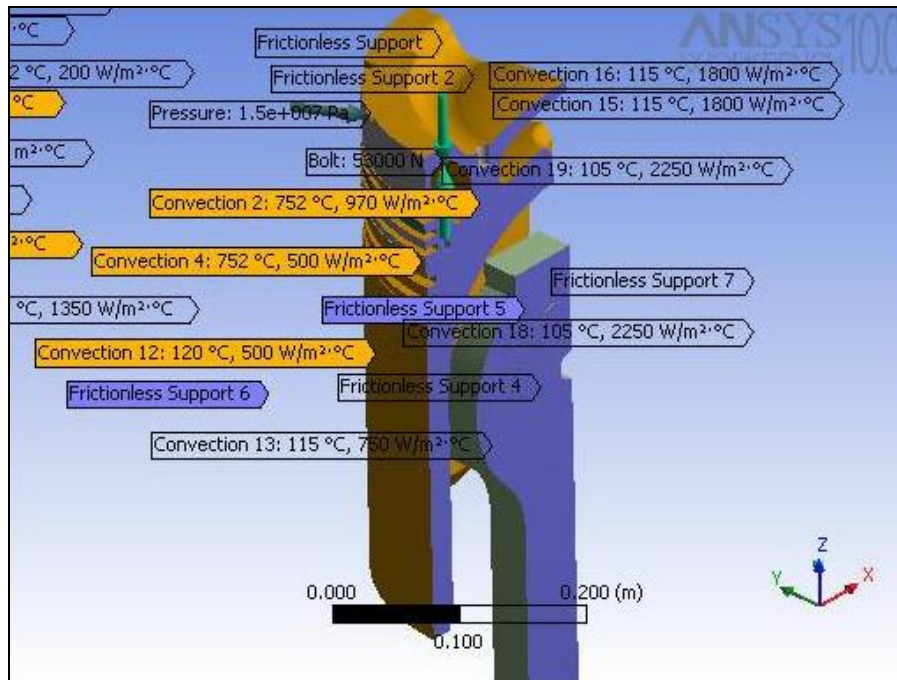


Figura 42. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.

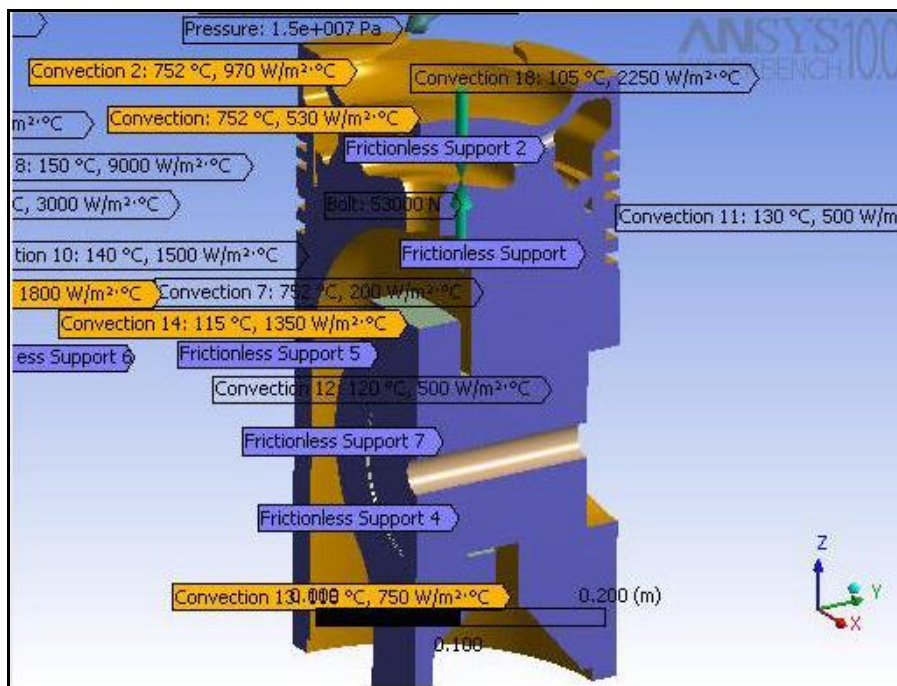


Figura 43. Condiciones de frontera en el ambiente de la geometría del pistón.

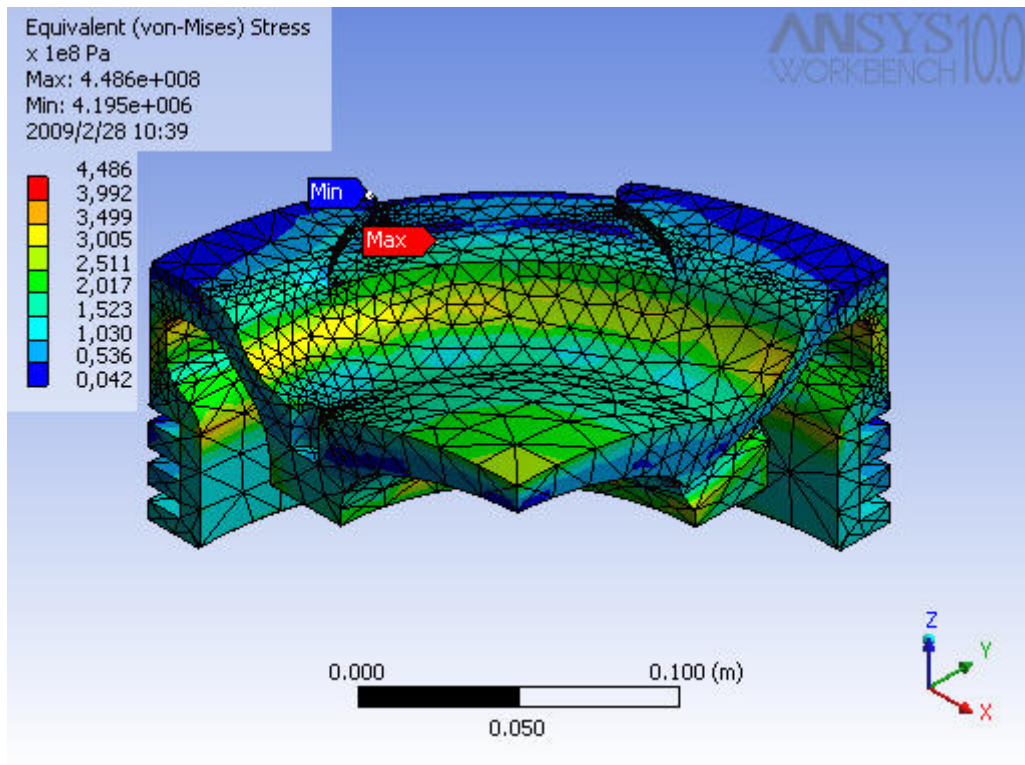


Figura 44. Contorno de esfuerzo equivalente en la corona del pistón.

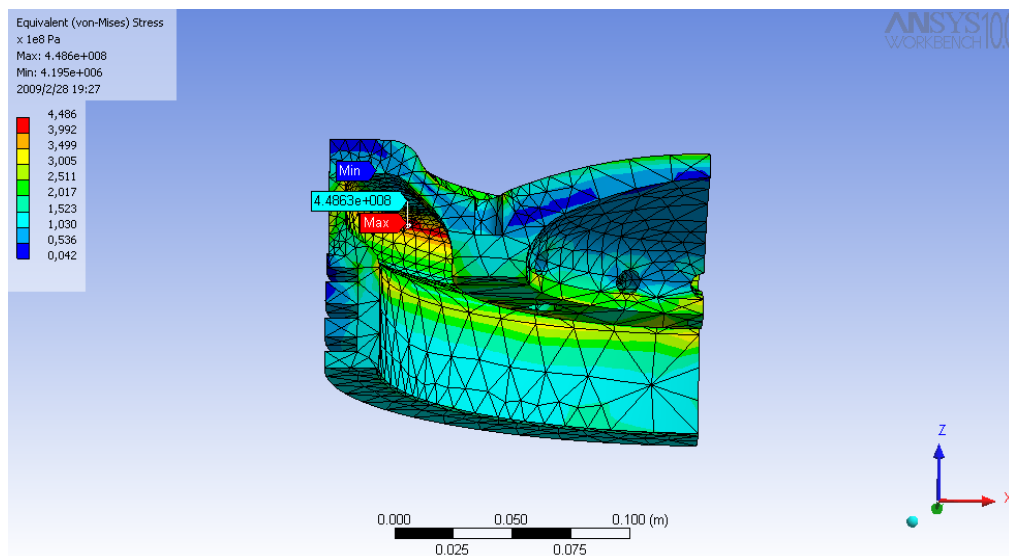


Figura 45. Contorno de esfuerzo equivalente en la corona del pistón.

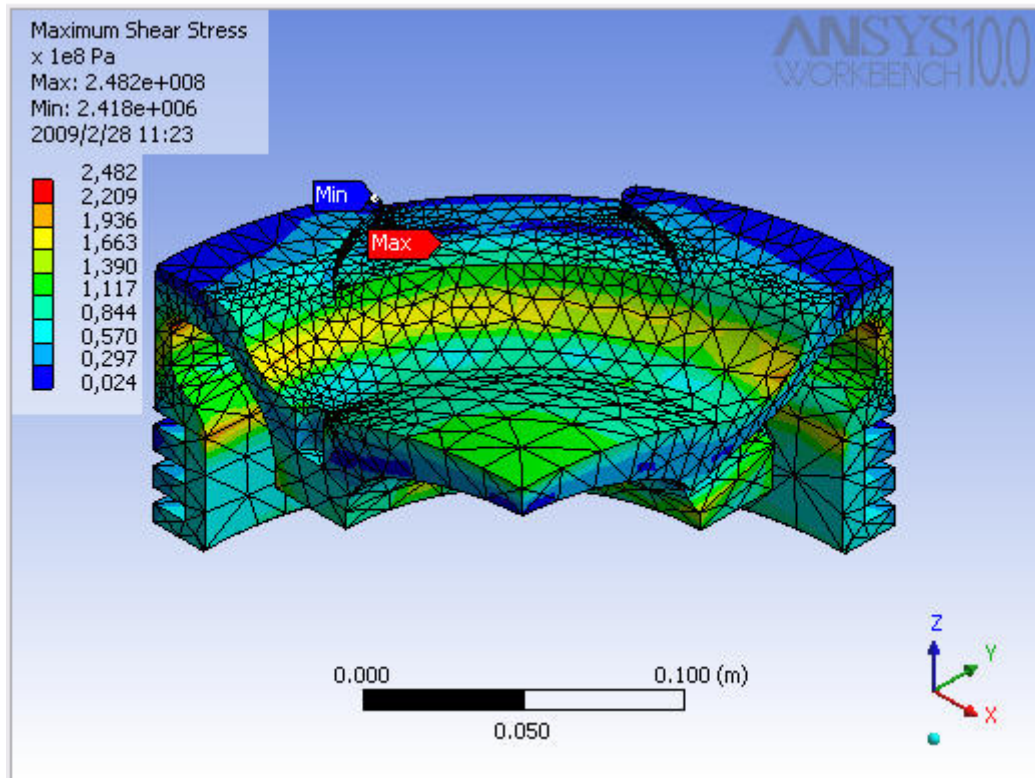


Figura 46. Contorno de máximo esfuerzo cortante.

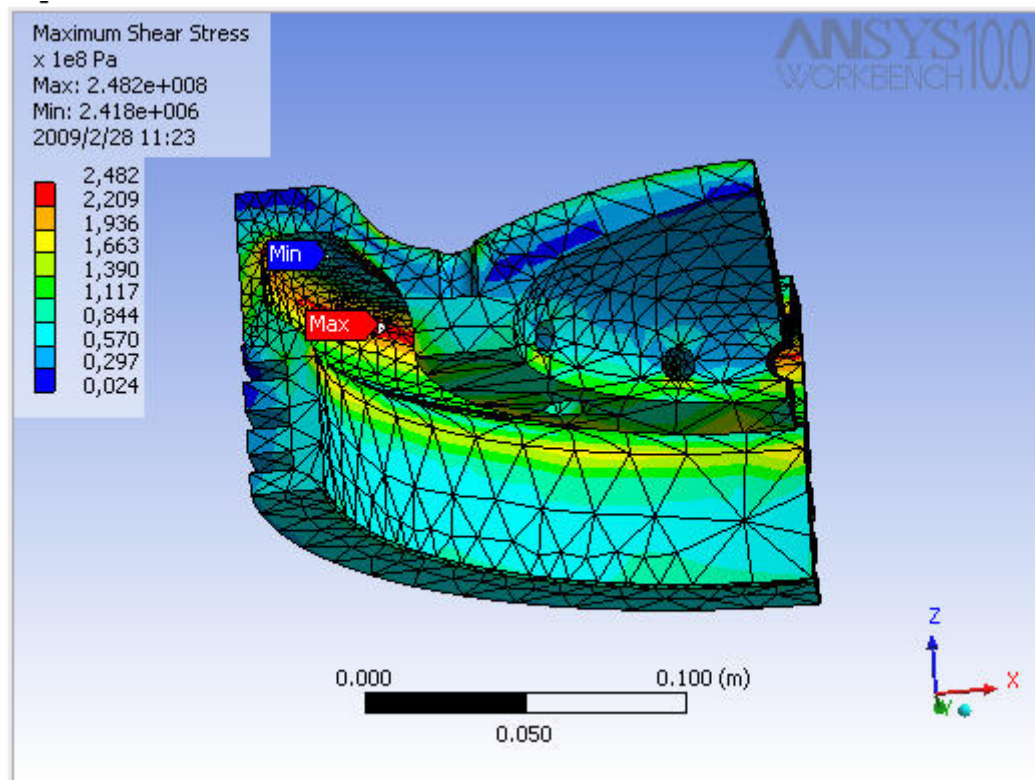


Figura 47. Contorno de máximo esfuerzo cortante.

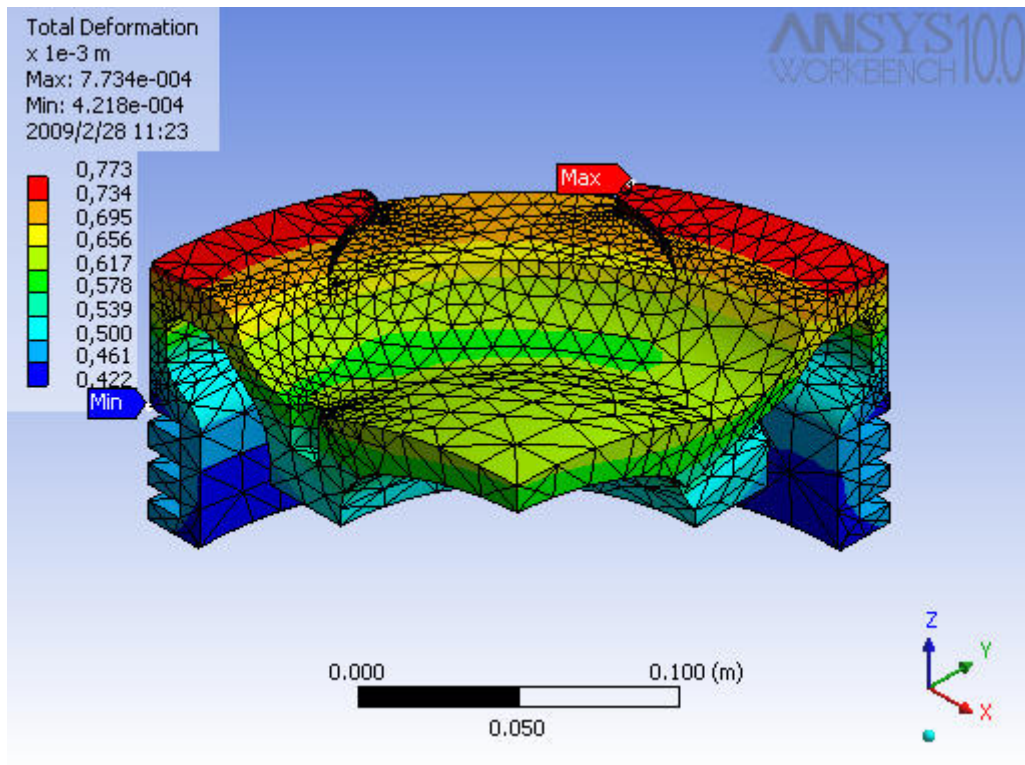


Figura 48. Contorno de deformacion total.

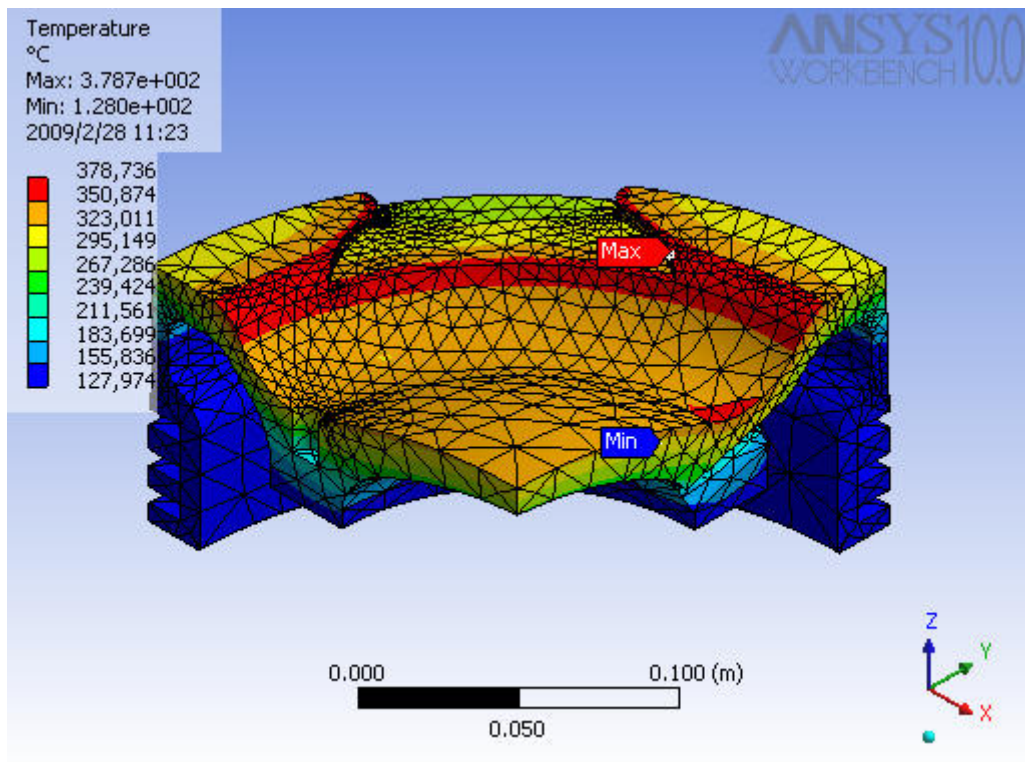


Figura 49. Contorno de temperatura.

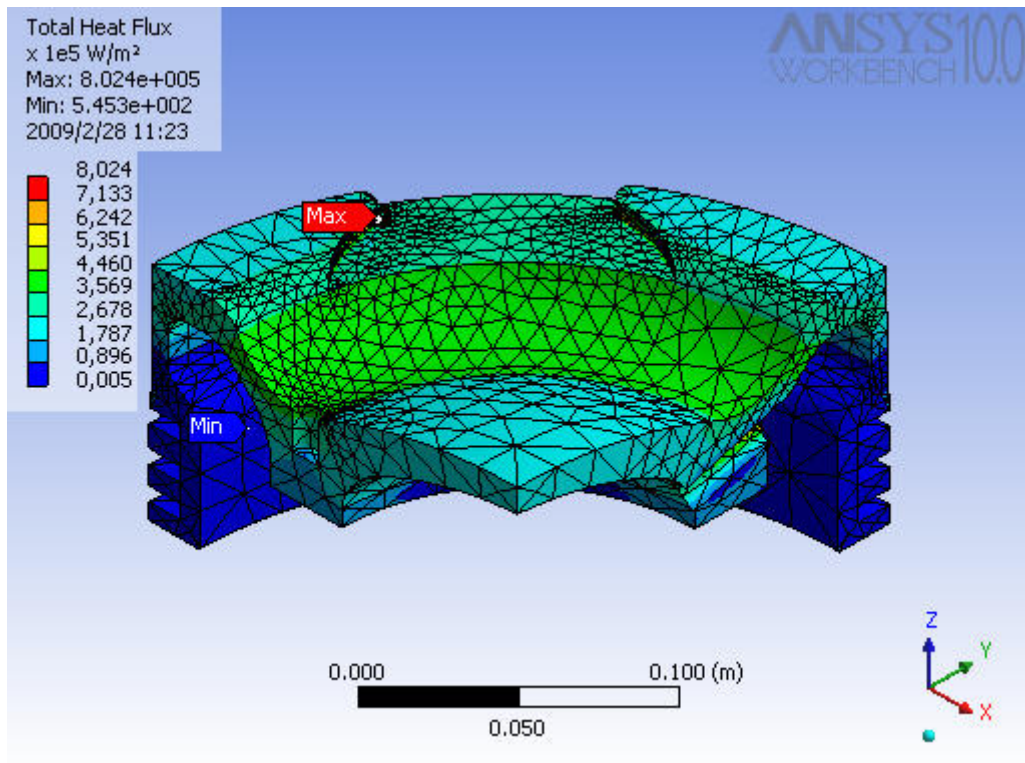


Figura 50. Contorno de flujo total de calor.

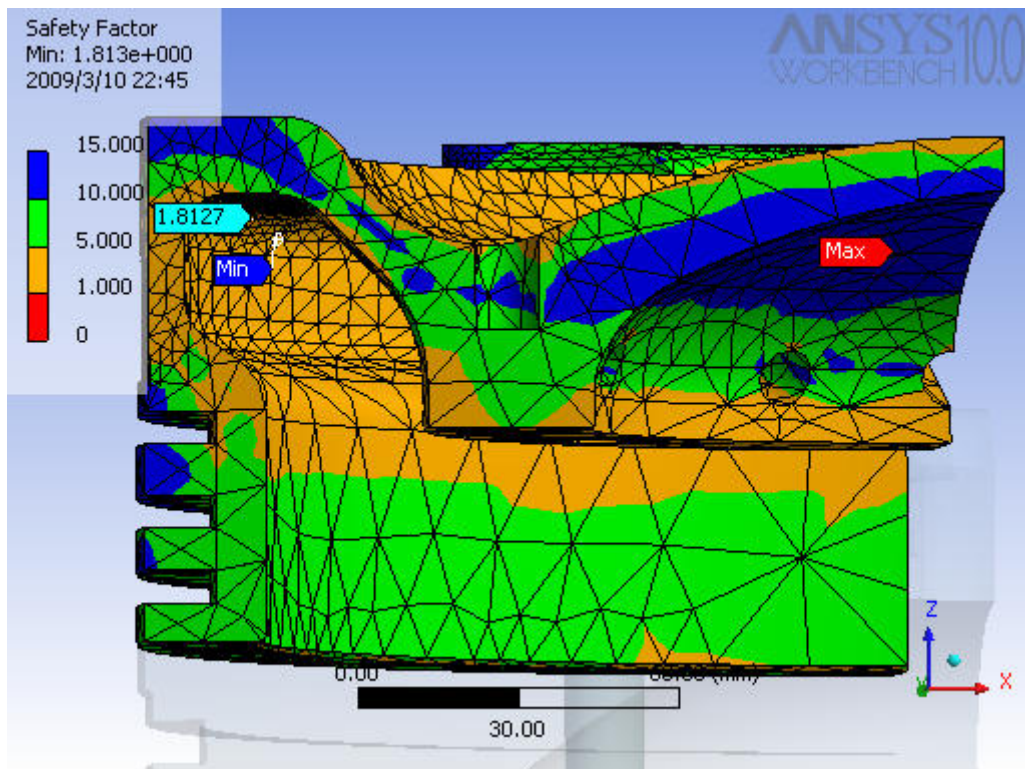


Figura 51. Contorno de factor de seguridad por esfuerzo cortante.

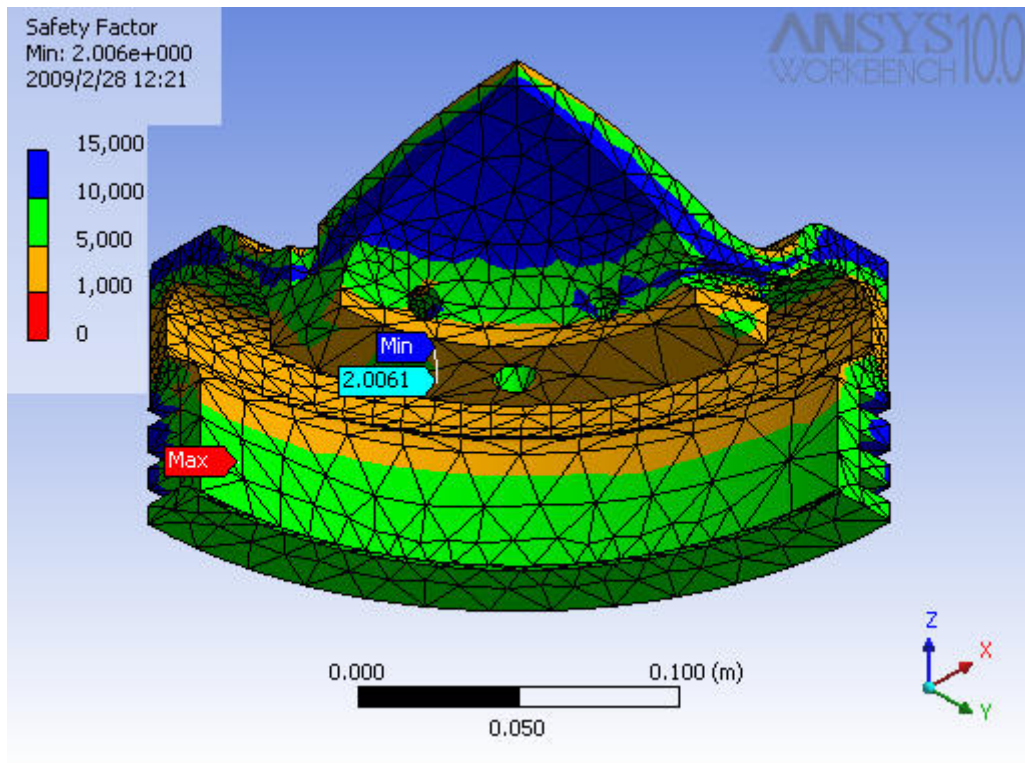


Figura 52. Contorno de factor de seguridad por esfuerzo equivalente.

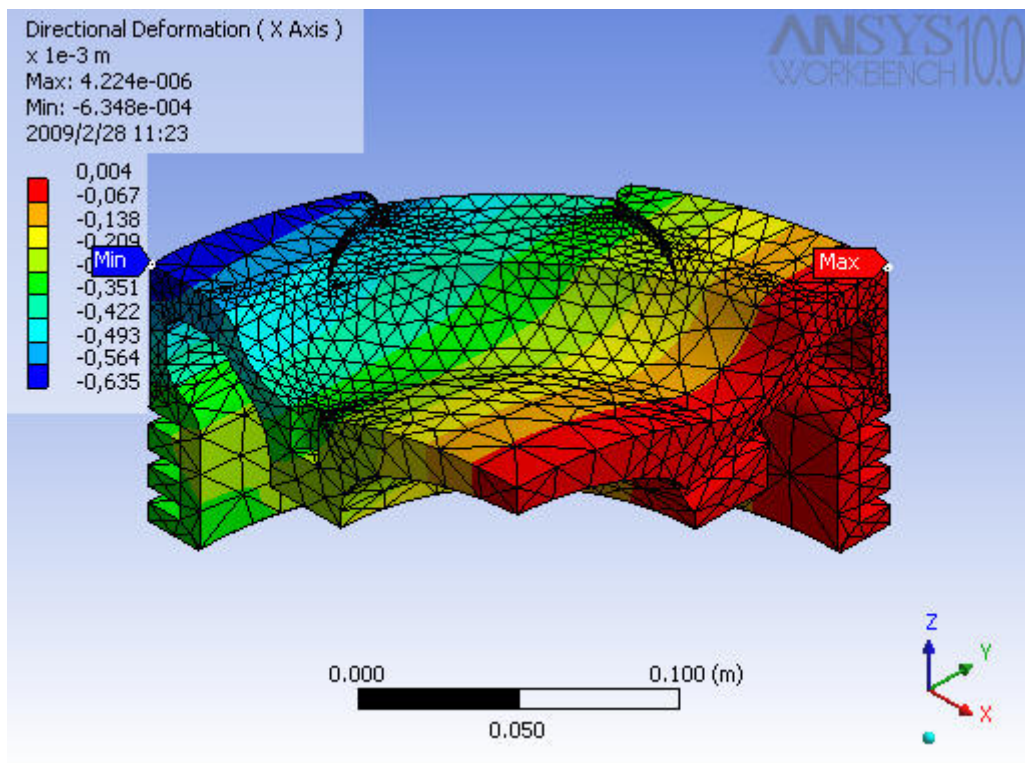


Figura 53. Deformación direccional en X.

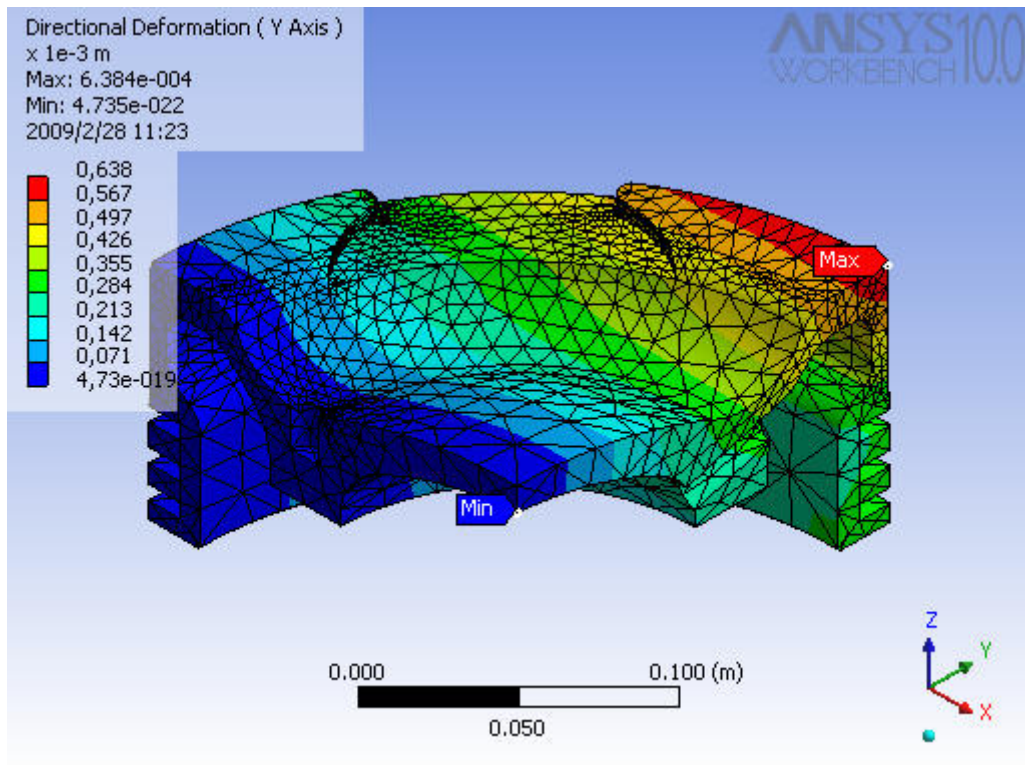


Figura 54. Deformación direccional en Y.

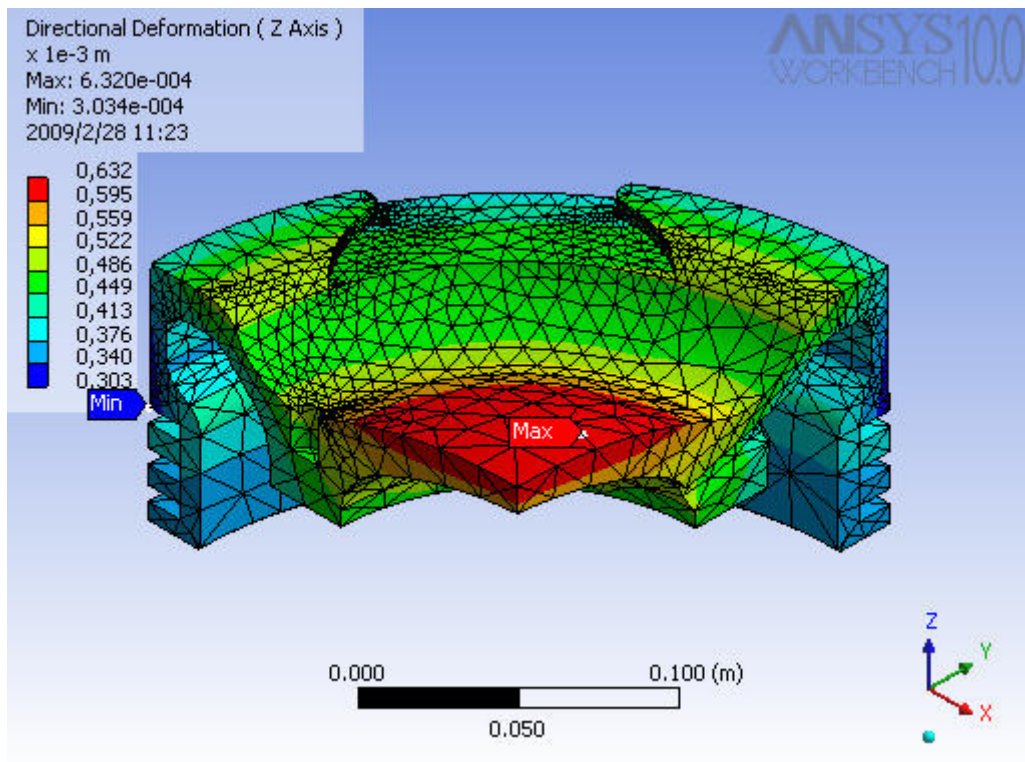


Figura 55. Deformación direccional en Z.

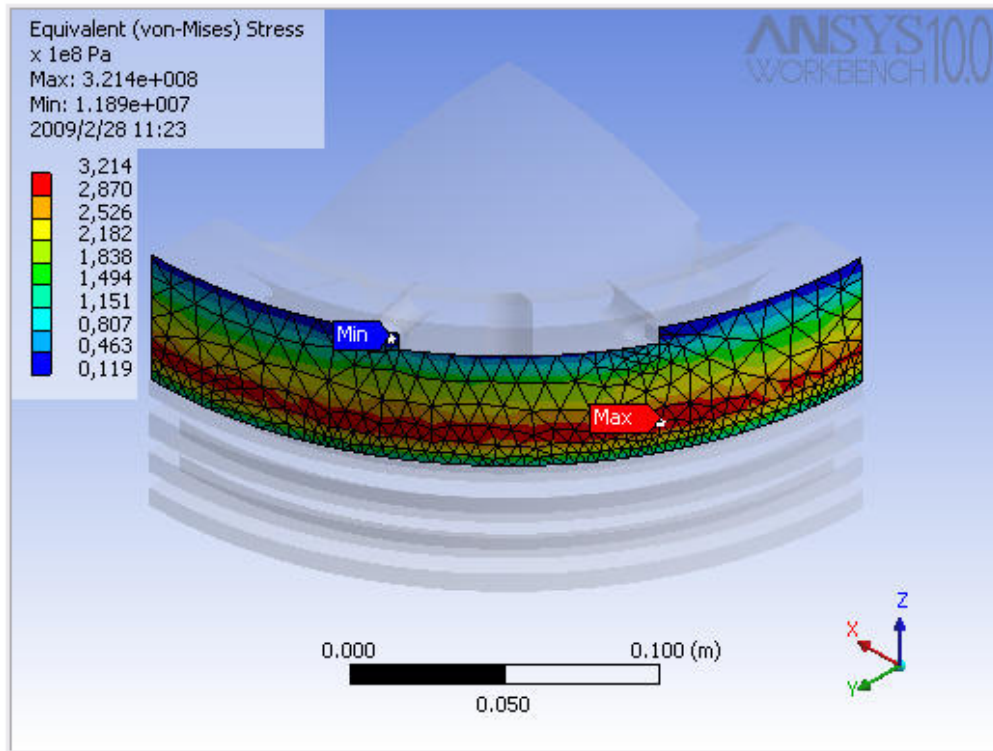


Figura 56. Esfuerzo Equivalente 2.

6.4.2 Propiedades de los materiales utilizados en el conjunto matriz del motor Allen.

6.4.2.1 Definición de propiedades para la falda “Aleación de Mahle designación 124”.

Nombre	Valor
Specific Heat	0.0 J/kg·°C
Tensile Yield Strength	9.0×10^8 Pa
Tensile Ultimate Strength	1.1×10^9 Pa
Density	2,750.0 kg/m ³
Thermal Expansion	2.1×10^{-5} 1/°C

Tabla 18. Propiedades constantes de la falda.

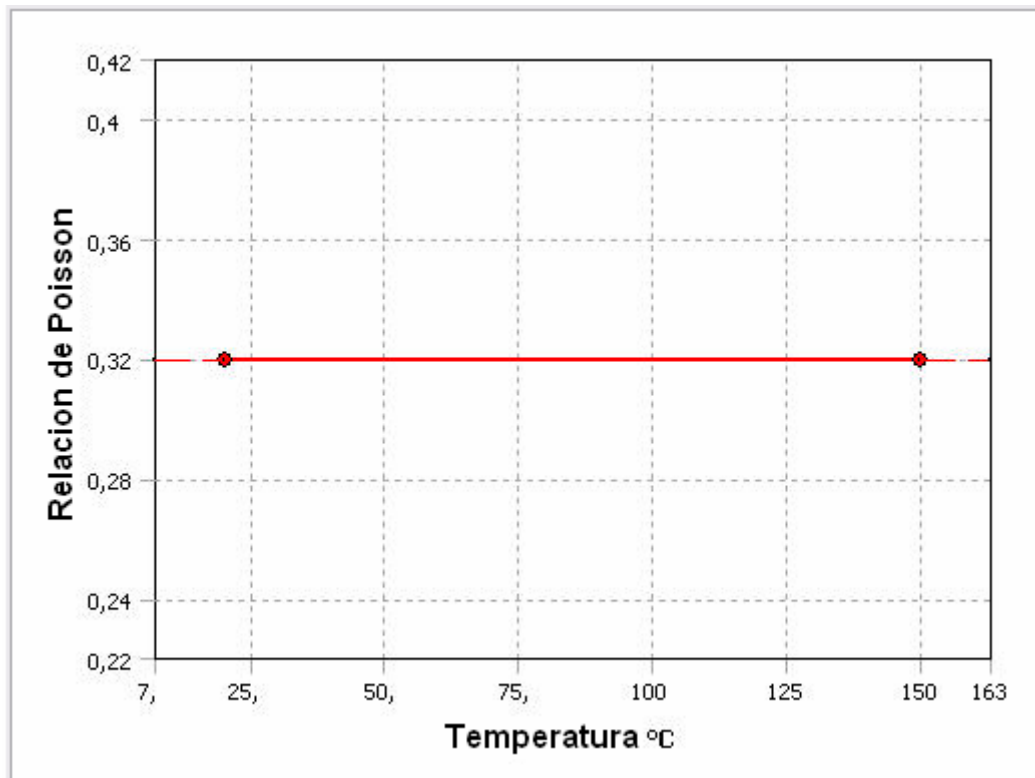


Tabla 19. Relación de Poisson.

Temperatura °C	Relacion de Poisson
20.0	0.32
150.0	0.32

Tabla 20. Relacion de Poisson.

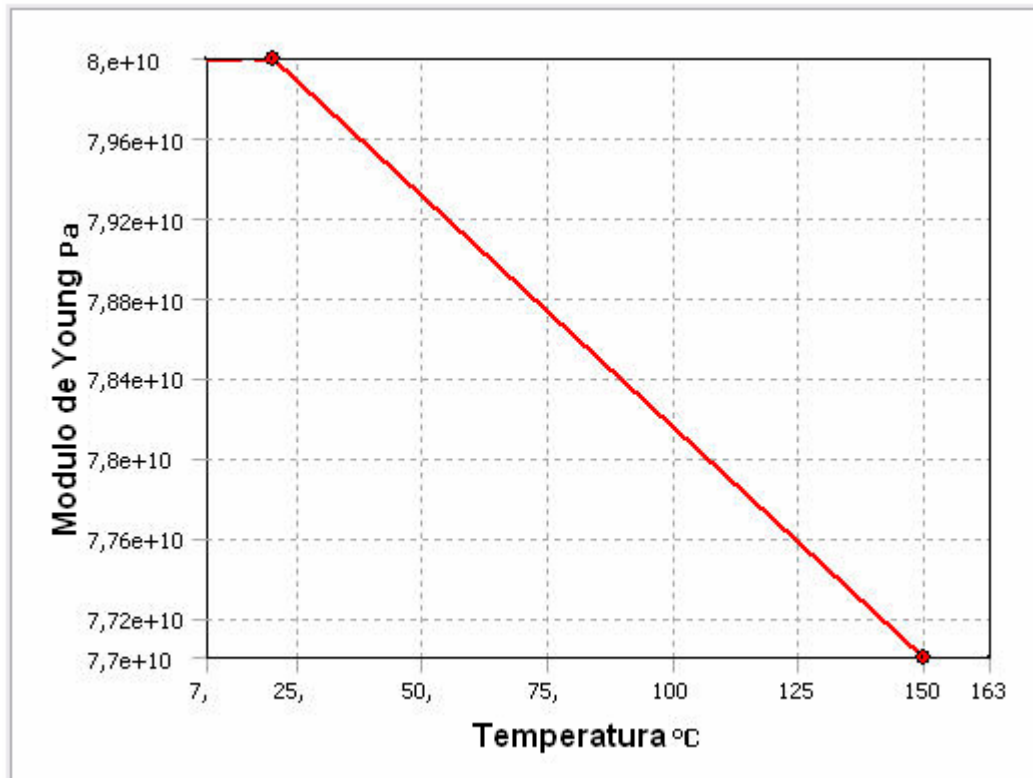


Tabla 21. Módulo de young.

Temperatura °C	Modulo de Young Pa
20.0	8.0×10^{10}
150.0	7.7×10^{10}

Tabla 22. Módulo de Young.

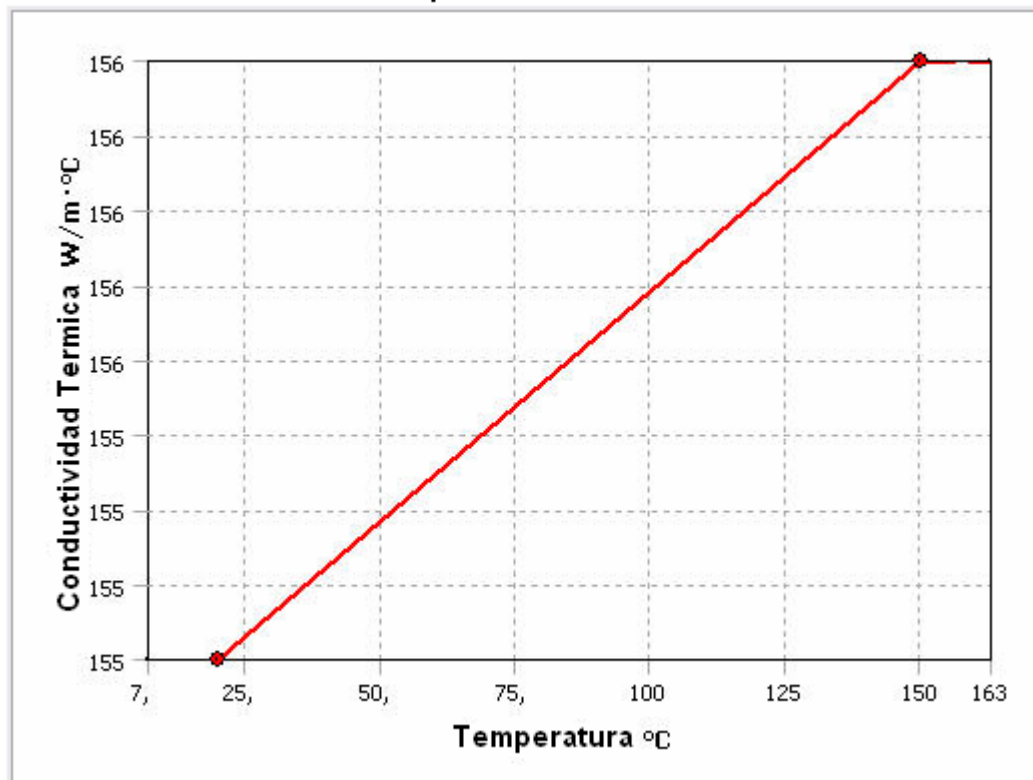


Tabla 23. Conductividad Térmica.

Temperatura °C	Conductividad Térmica · W/m·°C
20.0	155.0
150.0	156.0

Tabla 24. Conductividad Térmica.

6.4.2.2 Definición de propiedades del material para la corona, biela y bulón “42CrMo4”.

Nombre	Valor
Specific Heat	0.0 J/kg·°C
Tensile Yield Strength	9.0×10^8 Pa
Tensile Ultimate Strength	1.1×10^9 Pa
Poisson's Ratio	0.3

Tabla 25. Propiedades constantes de la corona.

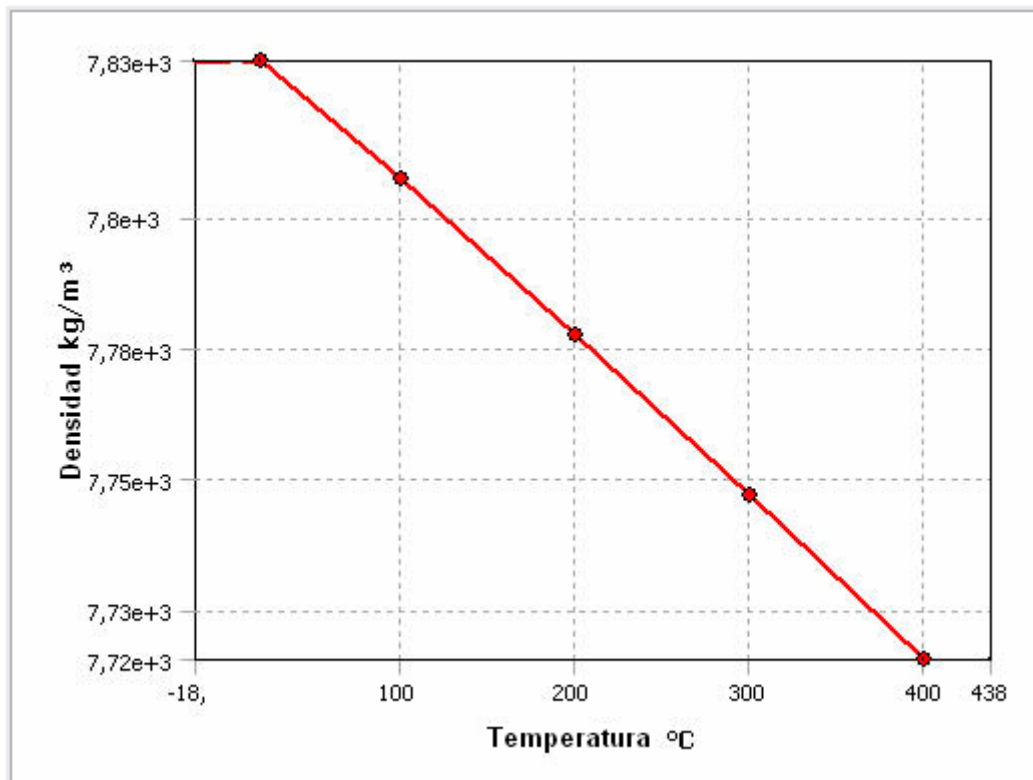


Tabla 26. Densidad.

Temperatura °C	Densidad kg/m³
20.0	7,830.0
100.0	7,807.33
200.0	7,777.69
300.0	7,747.02
400.0	7,715.54

Tabla 27. Densidad.

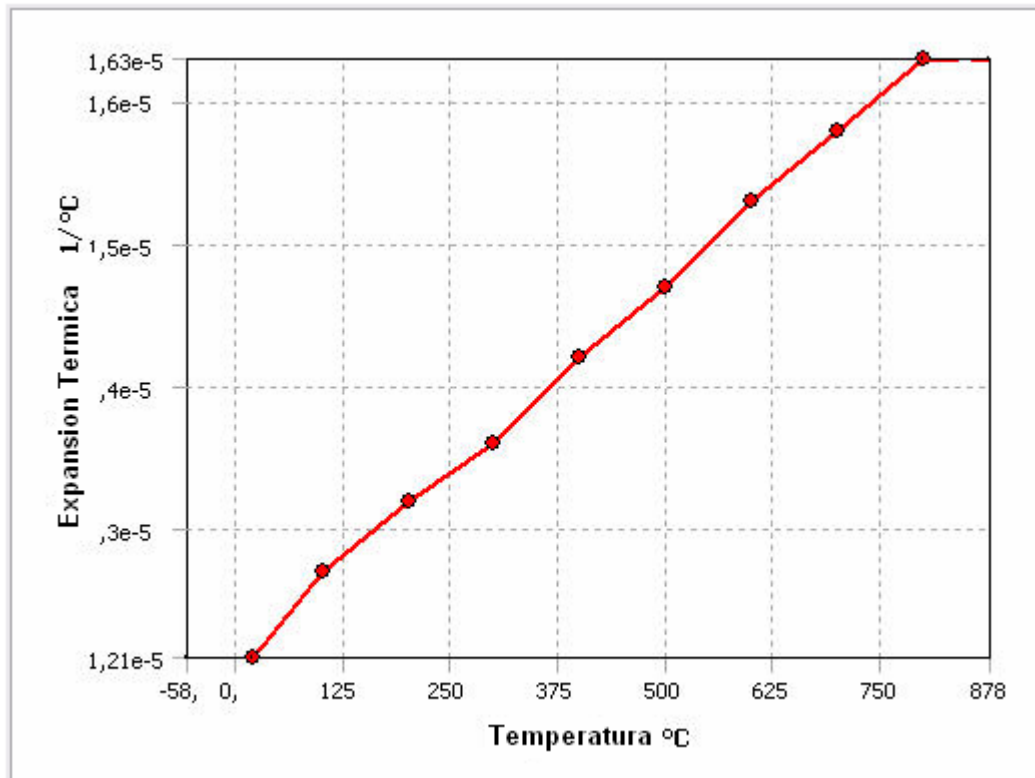


Tabla 28. Expansión Térmica.

Temperatura °C	Expansion Termica 1/°C
20.0	1.21×10^{-5}
100.0	1.27×10^{-5}
200.0	1.32×10^{-5}
300.0	1.36×10^{-5}
400.0	1.42×10^{-5}
500.0	1.47×10^{-5}
600.0	1.53×10^{-5}
700.0	1.58×10^{-5}
800.0	1.63×10^{-5}

Tabla 29. Expansión Térmica.

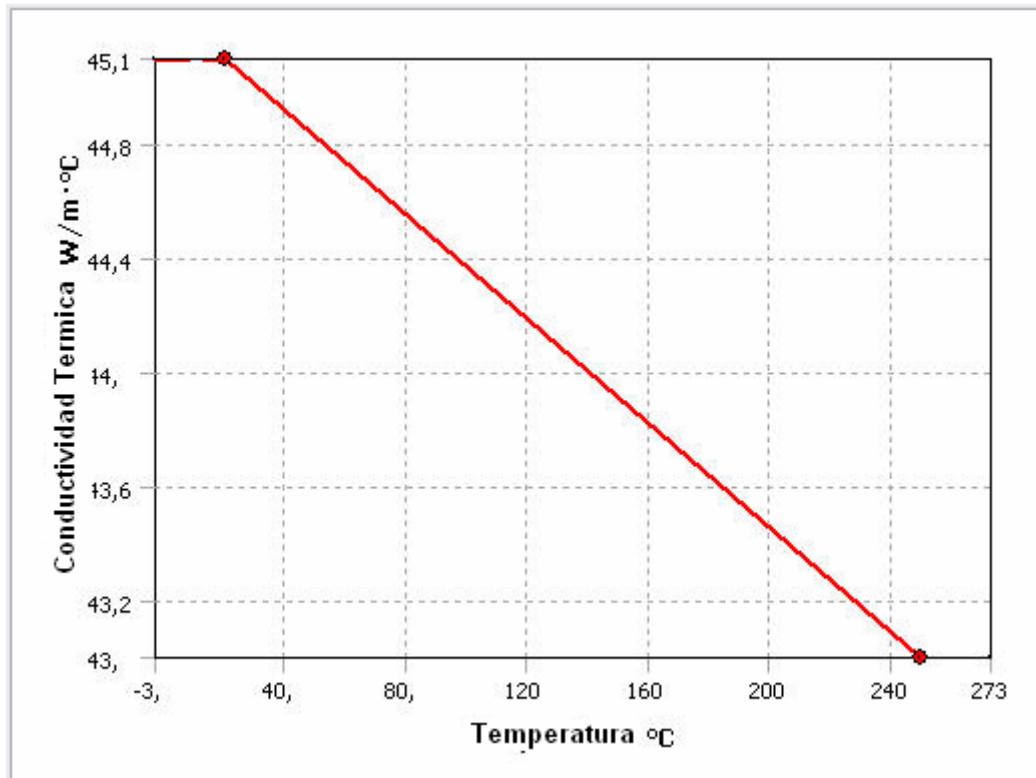


Tabla 30. Conductividad Térmica.

Temperature °C	Thermal Conductivity W/m·°C
20.0	45.1
250.0	43.0

Tabla 31. Conductividad Térmica.

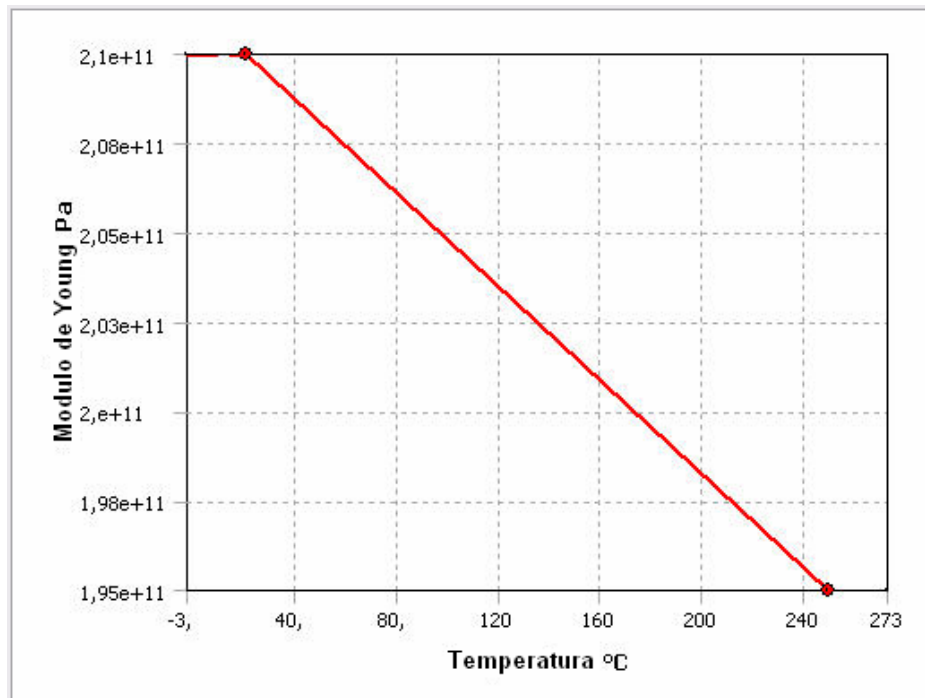


Tabla 32. Módulo de Young.

Temperatura °C	Modulo de Young Pa
20.0	2.1×10^{11}
250.0	1.95×10^{11}

Tabla 33. Módulo de Young.

6.4.2.3 Definición de propiedades del material para el casquete “Bronce”.

Nombre	Valor
Density	8,820.0 kg/m ³
Poisson's Ratio	0.31
Young's Modulus	9.3×10^{10} Pa
Specific Heat	0.0 J/kg·°C
Thermal Conductivity	71.9 W/m·°C
Tensile Yield Strength	1.25×10^8 Pa
Tensile Ultimate Strength	2.25×10^8 Pa
Thermal Expansion	1.9×10^{-5} 1/°C

Tabla 34. Propiedades constantes del bronce.

6.4.2.4 Definición de propiedades del material para el perno “Acero 1020”.

Nombre	Valor
Compressive Ultimate Strength	4.2×10^8 Pa
Compressive Yield Strength	3.5×10^8 Pa
Density	7,870.0 kg/m ³
Poisson's Ratio	0.29
Tensile Yield Strength	3.5×10^8 Pa
Tensile Ultimate Strength	4.2×10^8 Pa
Young's Modulus	2.05×10^{11} Pa
Thermal Expansion	1.2×10^{-5} 1/°C
Specific Heat	486.0 J/kg·°C
Thermal Conductivity	51.9 W/m·°C

Tabla 35. Propiedades constantes del "Acero 1020".

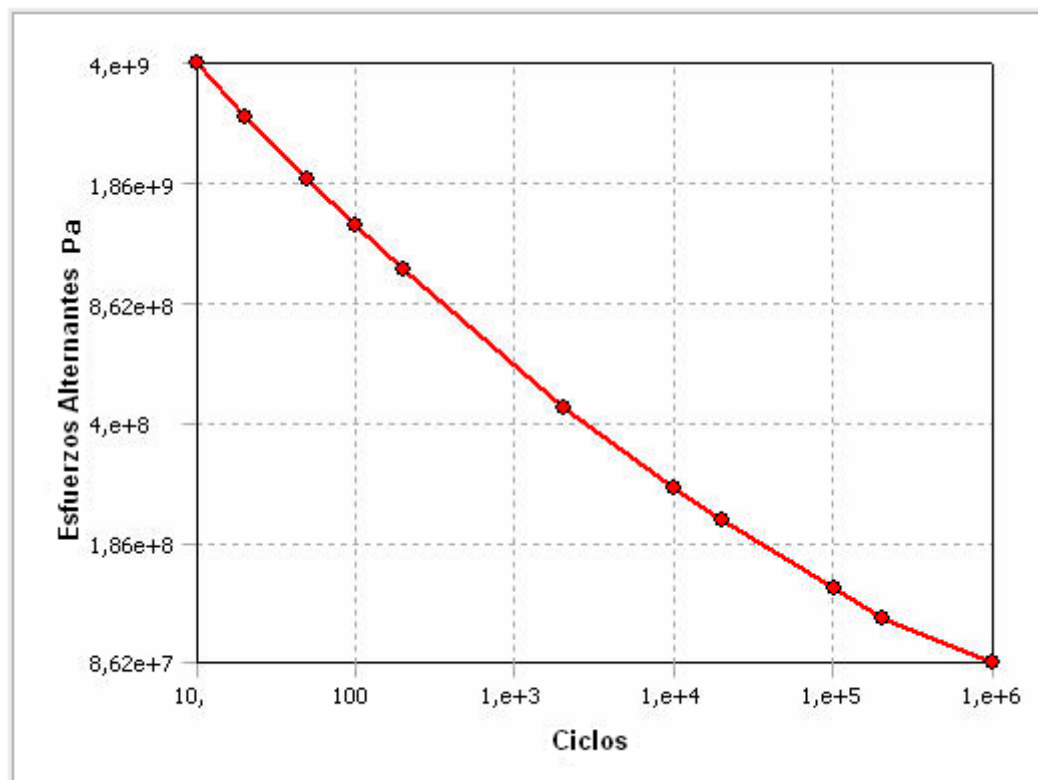


Tabla 36. Esfuerzos Alternantes.

- Promedios de valor 0.0.

Ciclos	Esfuerzos Alternantes
10.0	4.0×10^9 Pa
20.0	2.83×10^9 Pa
50.0	1.9×10^9 Pa
100.0	1.41×10^9 Pa
200.0	1.07×10^9 Pa
2,000.0	4.41×10^8 Pa
10,000.0	2.62×10^8 Pa
20,000.0	2.14×10^8 Pa
100,000.0	1.38×10^8 Pa
200,000.0	1.14×10^8 Pa
1,000,000.0	8.62×10^7 Pa

Tabla 37. Esfuerzos Alternantes.

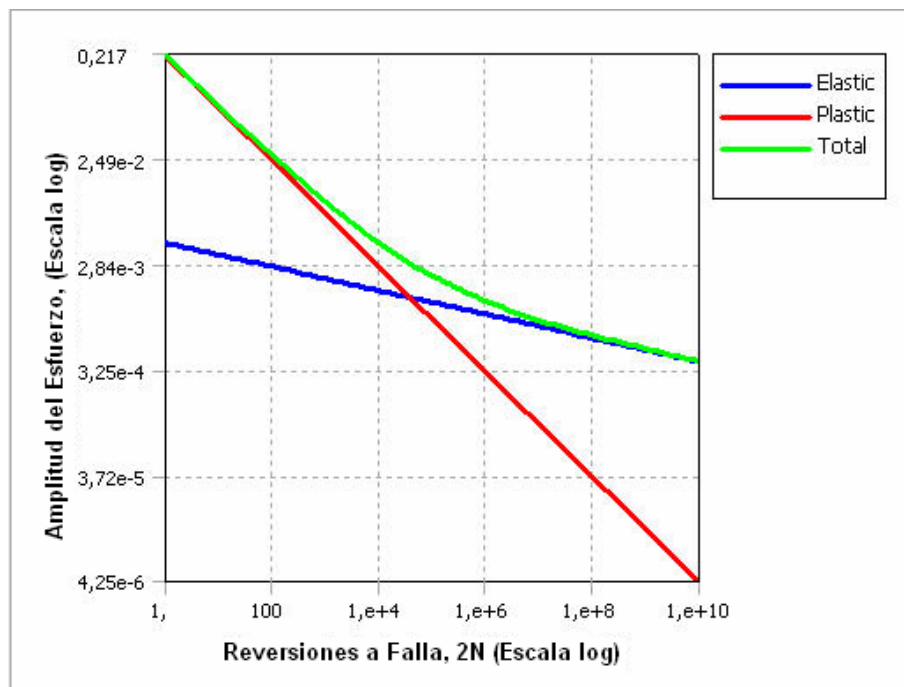


Tabla 38. Parámetros Vida - Esfuerzo.

Strength Coefficient	9.2×10^8 Pa
Strength Exponent	-0.11
Ductility Coefficient	0.21
Ductility Exponent	-0.47
Cyclic Strength Coefficient	1.0×10^9 Pa
Cyclic Strain Hardening Exponent	0.2

Tabla 39. Parametros de Vida - Esfuerzo.

6.5 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.

6.5.1 Interpretación de los resultados obtenidos en el software ANSYS para el análisis acoplado (térmico – estructural) de la corona Mahle:

6.5.1.1 Esfuerzo Equivalente:

El máximo esfuerzo equivalente que se obtuvo para el análisis acoplado en la corona Mahle es de un valor de 448.6 MPa, se localiza en la parte interna de la corona, ver figura 57.

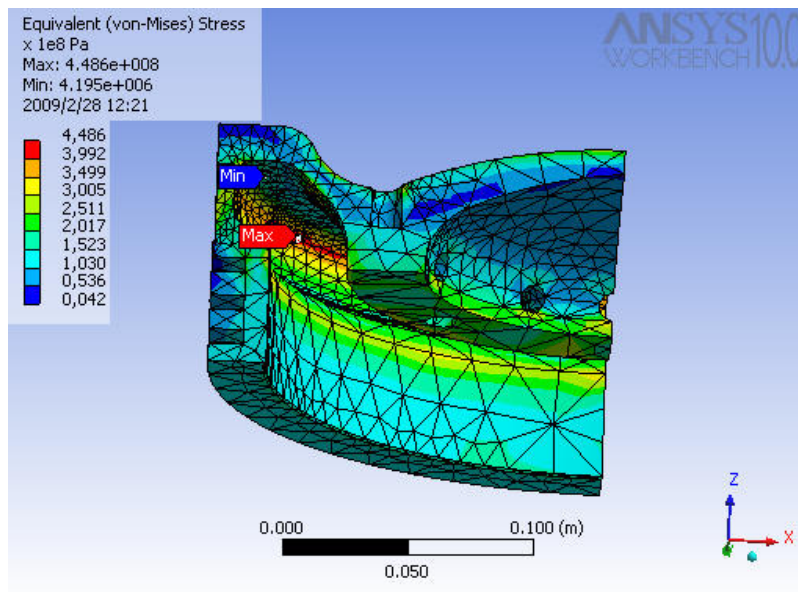


Figura 57. Esfuerzo Equivalente en el análisis acoplado.

La localización del máximo esfuerzo equivalente en la corona del pistón Mahle en la parte interna, es debido a que en esta área la corona tiene un redondeo en el vaciado, lo cual hace que la geometría concentre los esfuerzos que recibe de la carga del gas más la carga térmica de la combustión.

El máximo esfuerzo equivalente se basa en la teoría de falla para material dúctil, también se refiere a la teoría de los esfuerzos von Mises-Hencky ó a el esfuerzo cortante de la teoría octaédrica ó la máxima distorsión (o cortante) de la teoría de la energía. De las cuatro teorías de falla mencionadas anteriormente, la teoría de falla para material dúctil es generalmente considerada como la más apropiada para materiales como aluminio, latón y acero.

La teoría principal de esfuerzo demuestra que la causa de falla del máximo esfuerzo equivalente en una estructura ocurre cuando el esfuerzo equivalente iguale o supere el esfuerzo de fluencia del material, para esto tenemos la siguiente expresión:

$$\sigma_e \geq S_{limit}$$

Expresando la teoría como un objetivo del diseño; tenemos:

$$\frac{\sigma_e}{S_{limit}} < 1 \quad (1)$$

Si la falla está definida para material a la cedencia, el objetivo del diseño es limitar el máximo esfuerzo equivalente para ser menor que el límite elástico del material:

$$\frac{\sigma_e}{S_y} < 1 \quad (2)$$

De la ecuación 2 tenemos:

σ_e (máximo esuerzo equivalente, este esuerzo es el obtenido de la simulación del análisis acoplado en la corona del pistón Mahle) = 448.6 MPa.

S_y (esfuerzo de fluencia del material de la corona del pistón Mahle) = 900MPa.

Reemplazando los valores en la ecuación 3, tenemos la razón de esfuerzos para la corona Mahle:

$$\frac{\sigma_e}{S_y} = \frac{448.6 \text{ Mpa}}{900 \text{ Mpa}} = 0,5 < 1 \quad (3)$$

La teoría indica rangos. Los rangos están definidos de **0 a 1**. Cero representa una predicción de no material en esa región del modelo. Uno representa plenamente el material denso en las regiones del modelo.

Regiones comprendidas entre **0.4 y 0.6 (Marginal)** son regiones del material de la corona Mahle que representan el difuminado o incertidumbre entre el material que se conserva y el material que se elimina. Predice que la región marginal lleva a un nivel relativamente la carga en comparación con el material que se conserva.

El resultado obtenido del esuerzo equivalente (σ_e) en la simulación (corona del pistón Mahle) con el software ANSYS Workbench V.10.0 y analizando este con el esuerzo de fluencia (S_y) del material de la corona Mahle en la ecuación 3 nos arroja que el esuerzo equivalente en la corona del pistón se encuentra dentro de un rango de 0.5. Este valor representa que la corona del pistón lleva la carga térmica y estructural que recibe durante su funcionamiento.

6.5.1.2 Máximo esfuerzo cortante:

El máximo esfuerzo cortante que se obtuvo en la corona para el análisis acoplado es de 248.2 MPa, se localiza también en la parte interna de la corona, ver figura 58.

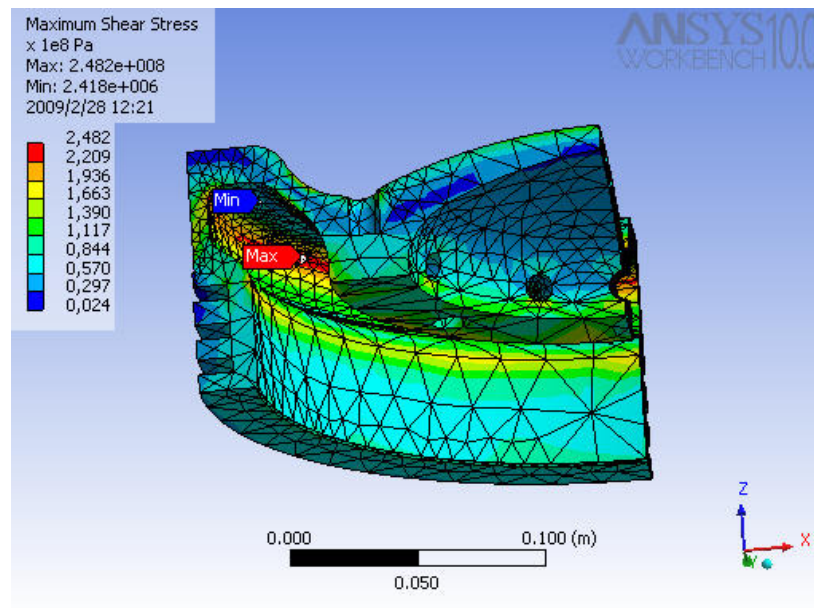


Figura 58. Máximo Esfuerzo Cortante para el análisis acoplado.

La localización del máximo esfuerzo cortante se encuentra en esta región dado que la corona recibe la presión pico ($P_p = 15\text{MPa}$) de los gases de la combustión como se aprecia en la figura 37, y en forma opuesta la fuerza que se encuentra soportada en el cigüeñal del motor (ver figura 59), la cual se transmite hasta la corona del pistón para generar el máximo esfuerzo cortante como se observa en la figura 58.

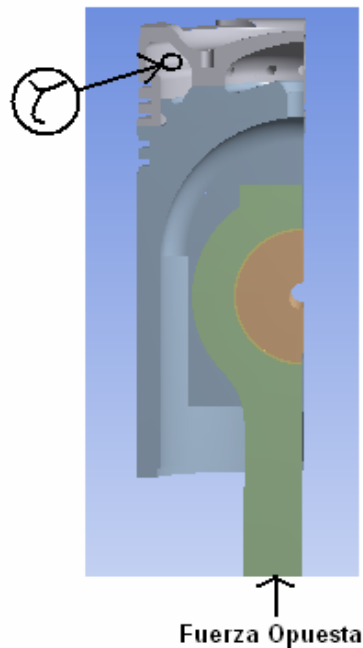


Figura 59. Máximo Esfuerzo Cortante y Fuerza Opuesta.

El máximo esfuerzo cortante esta basado en la teoria de falla para material dúctil.

La teoría principal de esfuerzo demuestra que las causas de falla del maximo esfuerzo cortante en una estructura ocurre cuando el máximo cortante iguale o supere el esfuerzo de fluencia del material, para esto tenemos la siguiente expresión:

$$\tau_{\max} \geq f_{\text{limit}}$$

En una estricta aplicación de la teoría, $f = 0.5$. Expresando la teoría como un objetivo del diseño; tenemos:

$$\frac{\tau_{\max}}{f_{\text{limit}}} < 1 \quad (4)$$

Si la falla esta definida para materiales de fluencia, el siguiente objetivo de diseño es limitar el esfuerzo cortante para ser menos que la fracción de la fuerza de fluencia del material.

Utilizando la siguiente ecuación, vamos a observar en que rango se encuentra el máximo esfuerzo cortante (τ_{max}) de la corona del pistón en función inversa al esfuerzo de fluencia del material de la corona del pistón Mahle.

$$\frac{\tau_{max}}{fS_y} < 1 \quad (5)$$

De la ecuación 5 tenemos:

τ_{max} (máximo esfuerzo cortante, obtenido de la simulación en la corona del pistón) = 248.2 MPa.

S_y (esfuerzo de fluencia en el material de la corona del pistón Mahle) = 900 MPa.

$f = 0.5$

Reemplazando los valores en la ecuación 6, tenemos:

$$\frac{\tau_{max}}{fS_y} = \frac{248.2 \text{ MPa}}{(0,5)(900 \text{ MPa})} = 0.55155 \quad (6)$$

La teoría indica rangos. Rangos que van desde **0 a 1.0**. Cero representa una predicción de no material en esa región del modelo. Uno representa plenamente el material denso en las regiones del modelo.

Regiones comprendida entre **1.0 y 0.6 (Mantener)** son regiones de material que lleva de manera eficiente la carga térmica y estructural dada en la corona del pistón. En muchos casos, la eliminación de material

procedente de estas regiones no tendrá el mayor impacto sobre el esfuerzo en el área donde se localice.

El resultado obtenido del máximo esfuerzo cortante (τ_{max}) en la simulación de la corona del pistón Mahle con el software ANSYS Workbench V.10.0 y analizando este con el esfuerzo de fluencia (S_y) del material de la corona del pistón en la ecuación 6.0, se consigue que el máximo esfuerzo cortante en la corona del pistón se encuentra dentro de un rango de 0.6, este valor hace referencia que la corona del pistón resiste las fuerzas que tienden a cortarla en la parte interna, como se observa en la figura 58.

6.5.1.3 Deformación total:

La máxima deformación total arroja un valor de $7.734E-4m$ ($773,4 \mu m$), se localiza en la parte superior de la corona del pistón, ver figura 60.

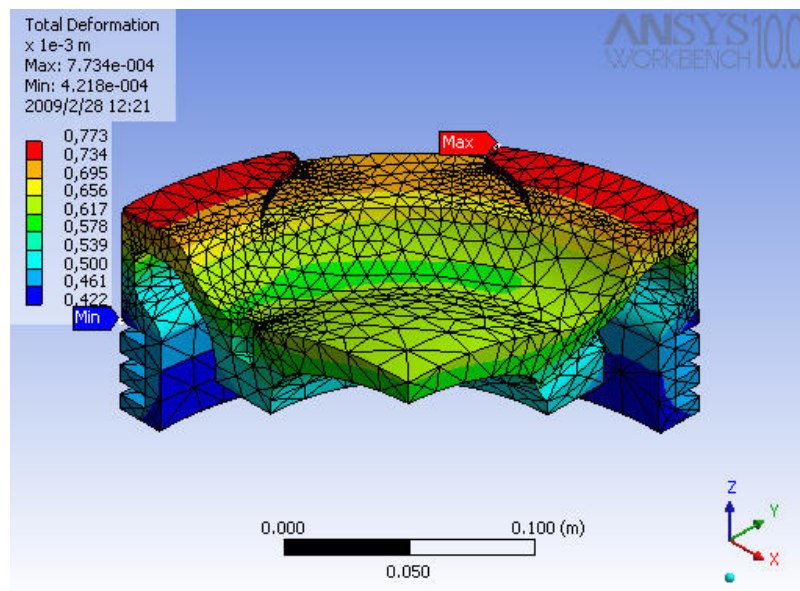


Figura 60. Deformación total en el análisis acoplado.

La deformación total en la corona del pistón se localiza en la parte superior de esta y ocurre por dos factores fundamentales cuando el pistón del motor alcanza el PMS (Punto Muerto Superior):

- Por regla general, la parte de la corona de pistones diesel se deforma por la presión de los gases que recibe el pistón durante su funcionamiento, presión de la mezcla aire comprimido más combustible diesel. La corona de pistones diesel suele ser más gruesa con el fin de que soporte la presión de los gases deformándose muy poco.
- El otro factor por el cual se deforma la corona de pistones diesel es debido a las altas temperaturas, estas están al alrededor de 750 grados celsius. Durante el funcionamiento, el diámetro de los pistones aumenta a consecuencia del aumento de temperatura y, para tener en cuenta que la dilatación o crecimiento térmico es mayor en la zona de mayor temperatura, los pistones reciben en la corona un ligero ahusamiento o conificado, de forma que el diámetro es mayor en la parte donde la falda se une con la corona y va siendo progresivamente menor hacia la parte superior.

Las deformaciones físicas en la corona pueden ser calculadas sobre y dentro de una parte o el montaje, en nuestro caso se realizó el cálculo con el software "ANSYS" para toda la corona del pistón, el resto de piezas en el conjunto motriz no se le realizaron cálculos de deformación puesto que son piezas que no interesan en el análisis del modelo.

Los soportes fijos en el conjunto motriz del pistón previenen las deformaciones en la corona; las deformaciones relativas se calcularon para la corona en el *Mundo del Sistema de Coordenadas*, las cartesianas globales fijas que se usaron para hallar cada valor de la deformación en

función de sus coordenadas fueron (X, Y, Z), es un sistema de coordenadas definido para calcular cada deformación, ver figura 61.

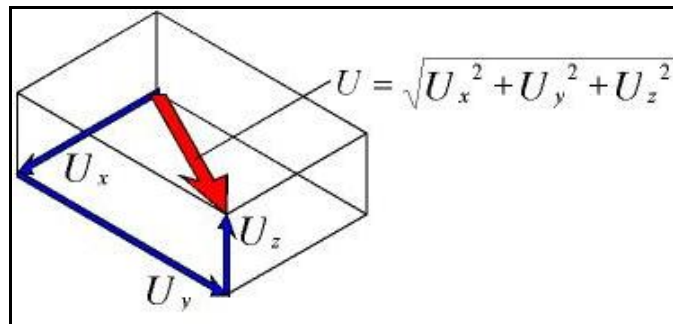


Figura 61. Vector Deformación Total y Deformaciones Relativas.

- Componentes de la deformación (U_x , U_y y U_z).
- Forma deformada (vector de deformación total) (U).

Las tres componentes de deformación se representan U_x , U_y , y U_z , y la deformación total se representa con (U).

Se calcularon las deformaciones individuales en función de sus coordenadas cartesianas sólo para la corona Mahle.

Realizar el cálculo de *deformación individual* para la corona fue posible. Se obtuvo el dato numérico de cada una de estas deformaciones en las direcciones globales X, Y y Z. Estos resultados se muestran a continuación en función de cada una de sus coordenadas (X, Y y Z).

La máxima deformación de la corona del pistón en la dirección "X" se localiza en la esquina, ver figura 62. El máximo valor obtenido de la deformación en la dirección X para lo corona del pistón con el Software de elementos finitos "ANSYS" es de 4,224 E-006 m, como se observa en la figura 64.

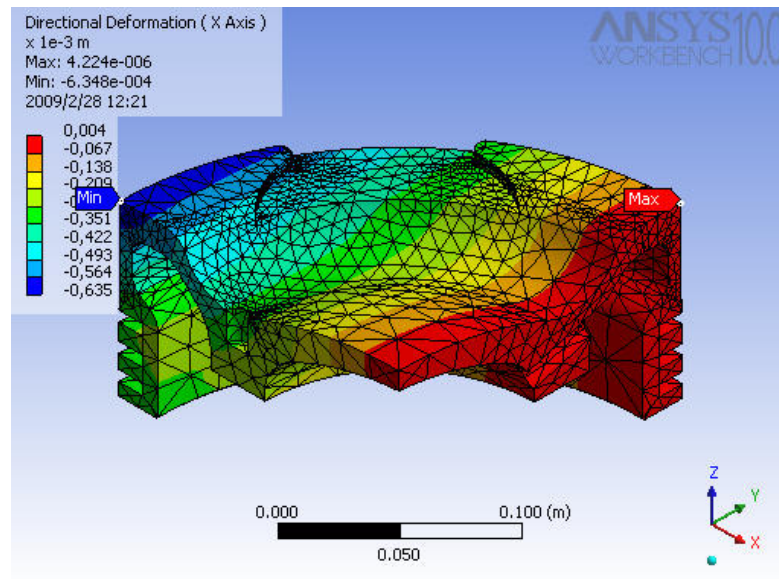


Figura 62. Deformación de la corona del pistón en la dirección X.

La máxima deformación de la corona del pistón en la dirección “Y” se localiza también en la esquina de esta, ver figura 63. El valor obtenido de la máxima deformación en la dirección “Y” para la corona del pistón con el software de elementos finitos “ANSYS” es de 6.38 E-004 m, como se observa en la figura 65.

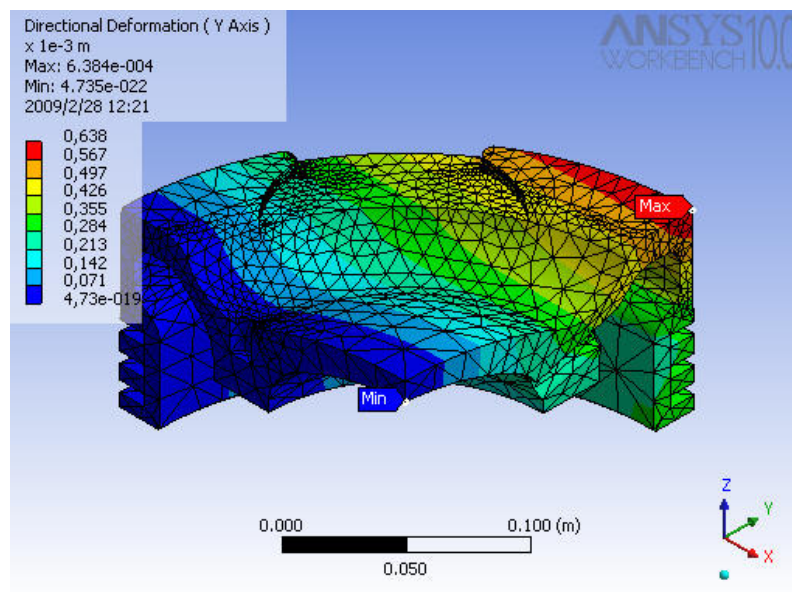


Figura 63. Deformación de la corona del pistón en la dirección Y.

La máxima deformación de la corona del pistón en la dirección “Z” se localiza en el centro de la corona, ver figura 64. El valor obtenido de la máxima deformación en la dirección “Z” para la corona del pistón Mahle con el software de elementos finitos “ANSYS” es de 6.320 E-004 m, como se observa en la figura 66.

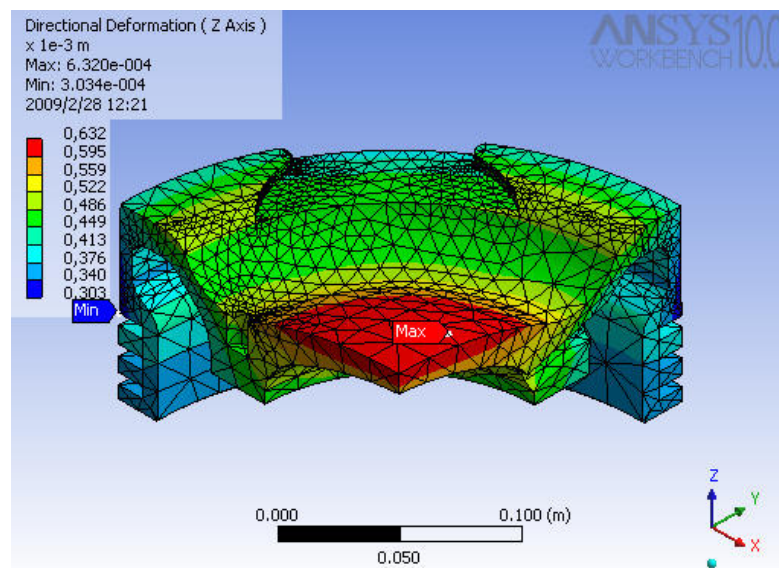


Figura 64. Deformación de la corona del pistón en la dirección Z.

De los valores obtenidos de cada una de las deformaciones individuales en la corona del pistón Mahle en función de sus coordenadas cartesianas (X, Y y Z); podemos calcular matemáticamente la deformación total, con la siguiente ecuación:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (7)$$

Donde:

U = Deformación Total.

U_x^2 = Deformación en la dirección “X”.

U_y^2 = Deformación en la dirección “Y”.

U_z^2 = Deformación en la dirección “Z”.

$$U_x^2 = 1,7842176E-11 \text{ m}^2.$$

$$U_y^2 = 407,044E-9 \text{ m}^2.$$

$$U_z^2 = 399.424E-9 \text{ m}^2.$$

Reemplazando los valores de: U_x^2, U_y^2 y U_z^2 en:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (8)$$

$$U = \sqrt{(1,7842176E - 11m^2) + (407,044E - 9m^2) + (399.424E - 9m^2)}$$

$$U = 898,045568 \text{ E-6 metros.}$$

El valor obtenido de la máxima deformación total (U) es igual a: 898,045568E-6 metros. Este valor se obtuvo realizando matemáticamente la suma de cada una de las deformaciones relativas máximas en la corona del pistón Mahle. Los valores de las deformaciones relativas son obtenidos de la simulación de la corona del pistón con el software ANSYS, y se reemplazaron en la ecuación 8 de deformación total.

El valor máximo obtenido de deformación total (U) en la corona del pistón directamente con el software ANSYS es igual a: $U = 773,4 \text{ E-6 metros}$, ver figura 60.

6.5.1.4 Temperatura:

El análisis térmico se aplicó sólo para la corona del pistón Mahle, puesto que es la pieza donde requeríamos conocer el comportamiento térmico debido al cambio realizado por la implementación del anillo APR (Anti - Polishing Ring).

El tipo de temperatura aplicado a cada una de las regiones de la corona del pistón Mahle corresponde a:

- Temperaturas de superficies conocidas (ver figura 65).

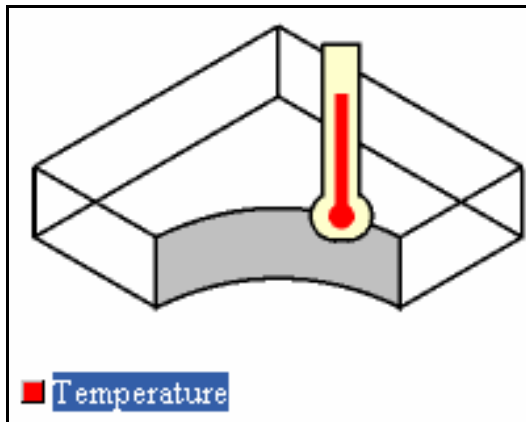


Figura 65. Temperatura de superficie conocida.

Las temperaturas conocidas en cada una de las superficies de la corona del pistón Mahle están dadas en convecciones de calor y temperatura constante para cada área donde se aplicó. Las temperaturas constantes con las respectivas convecciones se pueden ver desde la figura 17 hasta la 35.

6.5.1.5 Resultado térmico obtenido:

Durante el funcionamiento, el diámetro de los pistones aumenta a consecuencia del aumento de temperatura, y para tener en cuenta que la dilatación es mayor en la zona de mayor temperatura, ver figura 66. La mayor temperatura en la corona del pistón Mahle se encuentra en la parte superior (franja roja).

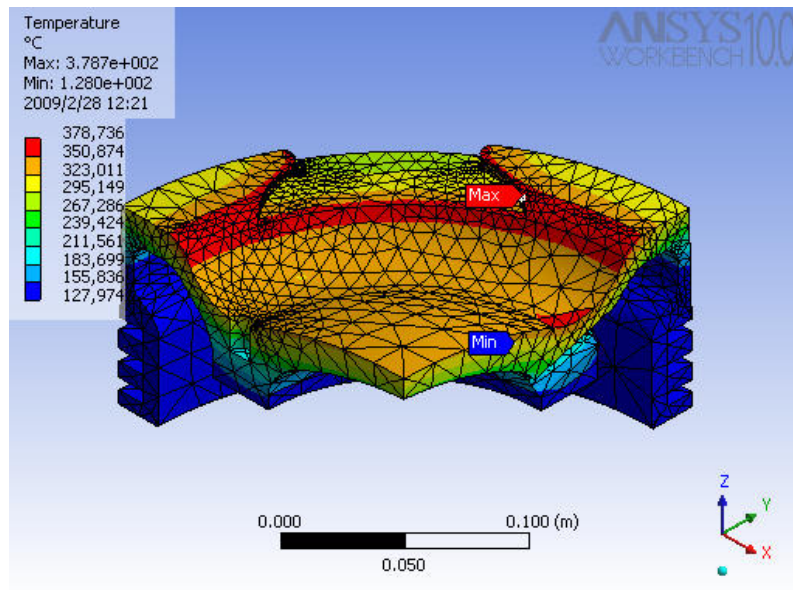


Figura 66. Máxima Temperatura en la corona del pistón Mahle.

La combustión del motor Allen es la reacción termoquímica muy rápida entre el oxígeno del aire y el combustible diesel, formando teóricamente CO₂ y H₂O, más el consecuente desprendimiento de calor (reacción exotérmica). Este desprendimiento de calor es lo que ocasiona la máxima temperatura en esta área de la corona del pistón (franja mostrada con color rojo en la figura 66). Otras de las razones por la cuales se obtiene máxima temperatura como la que se muestra en la corona se debe a la forma de inyección del combustible diesel en la cámara de combustión. La inyección del combustible se realiza en forma de neblina, una inyección de este tipo genera en la cámara de combustión una turbulencia y altas temperaturas por la misma forma geométrica del área superior del pistón.

6.5.1.6 Flujo total de calor:

El valor obtenido del flujo de calor en el análisis acoplado de la corona se encuentran representados por las siguientes franjas de colores con sus respectivos valores en esta, ver figura 67.

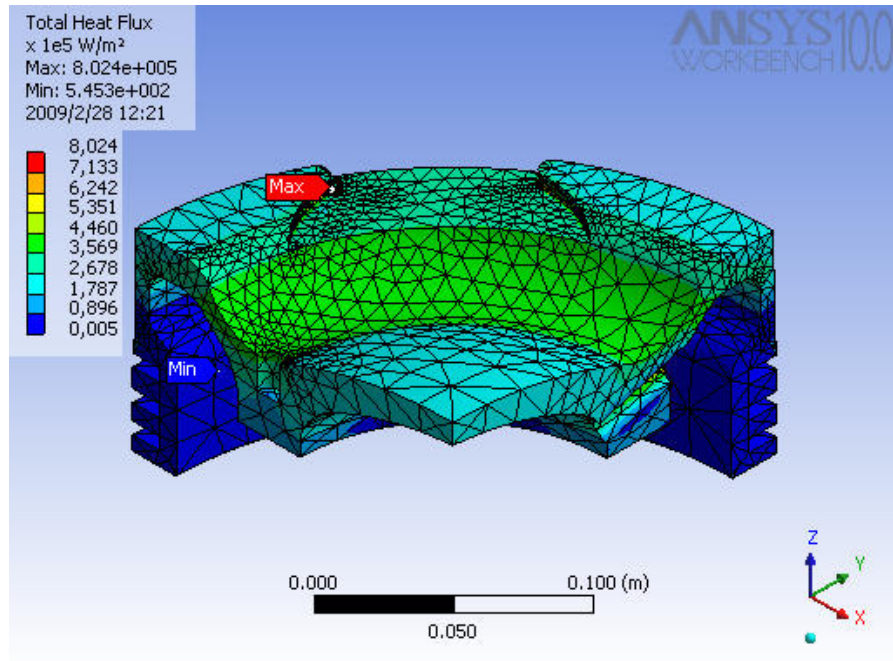


Figura 67. Contorno de Flujo de calor en la corona de pistón Mahle.

El flujo máximo de calor para el análisis acoplado en la corona se encuentra localizado en la siguiente región, y con un valor de 8.024E+5

$\frac{W}{m^2}$, ver Figura 68.

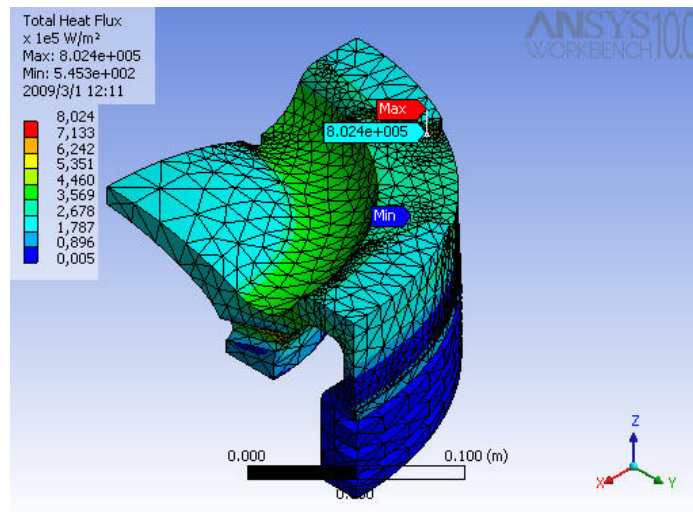


Figura 68. Localización del flujo máximo de calor en la corona.

El flujo de calor en la corona Mahle, se encuentra parcelado por vectores de flujo de calor, proporcionando estos la dirección del flujo de calor en cada punto de la corona del pistón.

El siguiente gráfico muestra la zona de alta temperatura en la parte superior, y la zona de baja temperatura en la parte inferior. La dirección del flujo de calor en la corona del pistón está indicado por los vectores que se muestran en la figura 69.

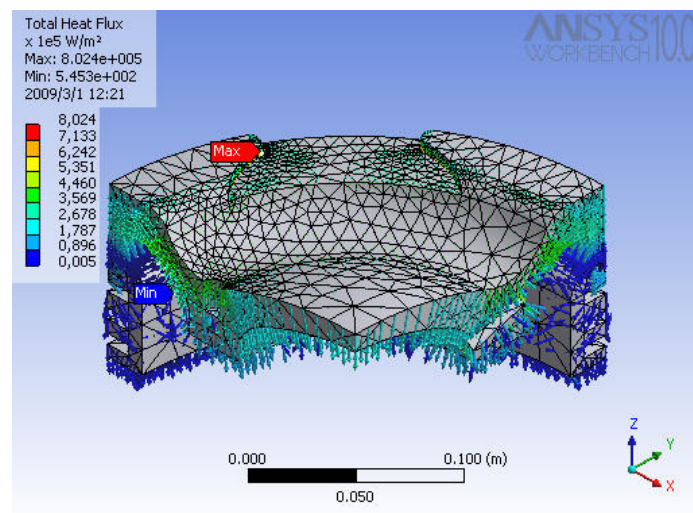


Figura 69. Dirección del flujo de calor en la corona del pistón.

El ambiente de temperaturas y las convecciones cargadas en el software ANSYS V.10.0 para cada una de las regiones de la corona causó la transferencia de calor dentro de la corona del pistón. En la simulación acoplada se calculó todas las temperaturas sobre las partes de la corona del pistón Mahle.

Adicionalmente la simulación calculó el flujo de calor (Q / A , de la energía por unidad de tiempo por unidad de área) en toda la corona del pistón, ver figura 69, para saberse la trayectoria que sigue el flujo de calor.

En los pistones refrigerados, el calor absorbido por éstos atraviesa sus paredes laterales, a continuación pasa a las paredes de los cilindros a través de los segmentos (anillos de sello) y por último a las camisas de aceite, ver figura 67. En los motores que han de soportar cargas muy elevadas son necesarios medios adicionales para evacuar el calor y ello se consigue utilizando un líquido, generalmente el aceite lubricante del motor Allen.

La parte de la corona del pistón Mahle suele ser más gruesa con el fin de que proporcione una buena transmisión del calor desde la superficie superior de la corona hasta los segmentos (anillos de compresión y de aceite), ver figura 70.

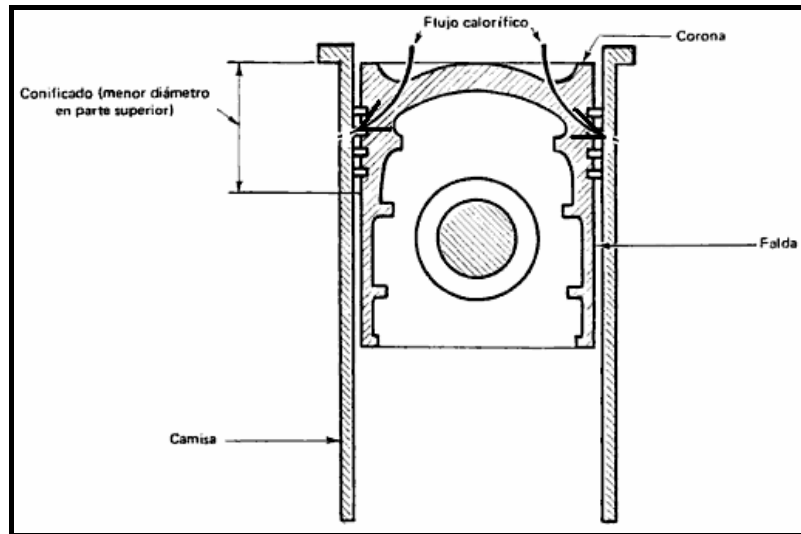


Figura 70. Camino que sigue el flujo calorífico desde la corona del pistón hacia el aceite de refrigeración entre la camisa y la falda.

6.5.1.7 Factor de seguridad para el análisis acoplado:

El mínimo factor de seguridad que se obtiene para el análisis acoplado (térmico - estructural) en la corona con un valor de 2.0061, se localiza internamente, ver figura 71.

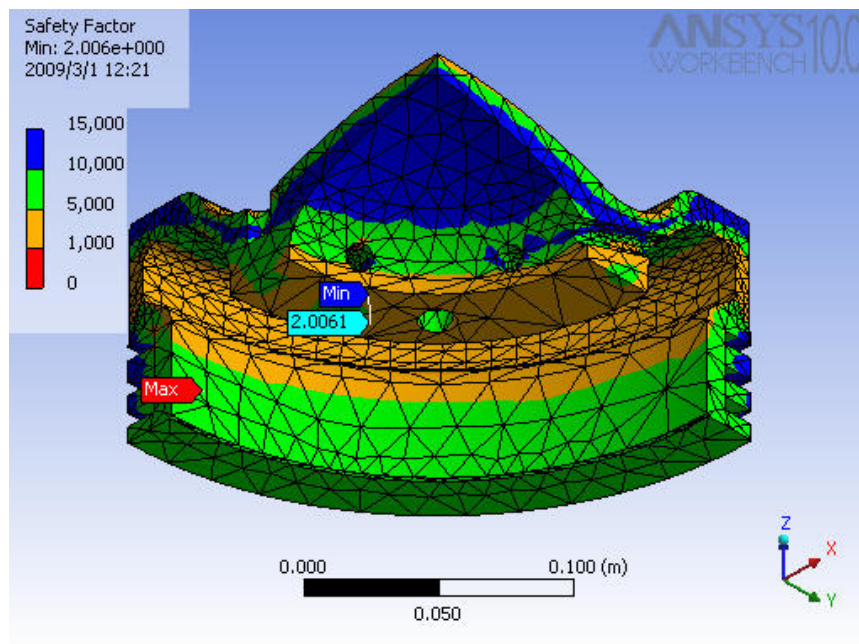


Figura 71. Localización del mínimo factor de seguridad para el análisis acoplado.

Con algunos materiales se pueden alcanzar un amplio rango de resistencias; en materiales como el de la corona del pistón (42CrMo4) se pudo alcanzar una resistencia de garantía razonable. Este mínimo margen de seguridad representa que la corona resiste los esfuerzos térmicos y estructurales; además representa que la corona resiste las cargas termico – estructural para el mecanizado implementado, anillo APR (Anti-Polishing Ring).

El factor de seguridad se expresa como:

$$n_s = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_d} \quad (9)$$

Donde:

σ_{perm} = Esfuerzo normal permisible, Pa.

σ_d = Esfuerzo normal de diseño, Pa.

Si $n_s > 1$, el diseño es adecuado. Entre mayor sea n , más seguro será el diseño. Si $n_s < 1$, el diseño puede ser inadecuado y necesita un rediseño. El valor obtenido de n_s en la corona del pistón Mahle para el análisis acoplado es de: $n_s = 2.0061$, este valor nos indica que el diseño de la corona mecanizada con el de anillo APR es de un diseño adecuado y seguro.

6.5.1.8 Deformación del primer anillo de la corona del pistón Mahle.

El valor de la deformación también se tuvo en cuenta para la primera ranura del anillo sello de la corona del piston Mahle en el análisis acoplado, ver figura 72 y 73.

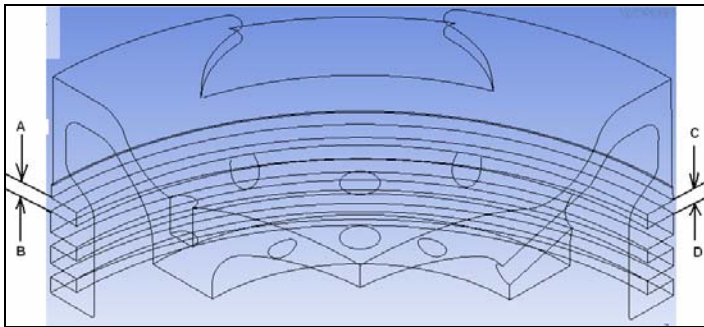


Figura 72. Dirección en que se deforma la primera ranura de la corona Mahle para los tres análisis.

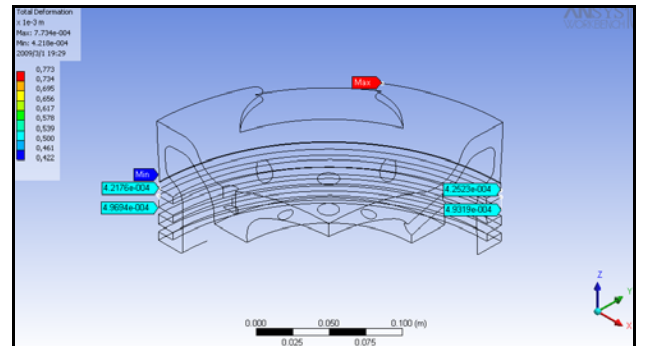


Figura 73. Deformación de la primera ranura de la corona para el análisis acoplado.

Los valores de las deformaciones en la ranura del primer anillo de la corona Mahle se obtuvieron para el análisis acoplado y se muestran en la tabla 40, teniendo en cuenta las deformaciones de los puntos A,B,C y D como se observa en la figura 73.

Desplazamiento Vertical de la primera ranura de la corona, (Micras)							
Plano XZ	Corona Modificada			Plano ZY	Corona Modificada		
Cargado	A	B	Cierre (micras)	Cargado	C	D	Cierre, (micras)
LC5	421,76	496,94	-75,18	LC5	425,23	493,19	-67,96
LC5 Ensemble + Carga Termica + Carga del Gas (Presion pico).							

Tabla 40. Desplazamiento vertical de la primera ranura de sello.

6.5.2 Comparación de los resultados obtenidos entre el modelo desarrollado en Occidental de Colombia con el software ANSYS y el modelo desarrollado por AVL Powertrain Engineering, Inc con el software Patran y Abaqus V 6.5.

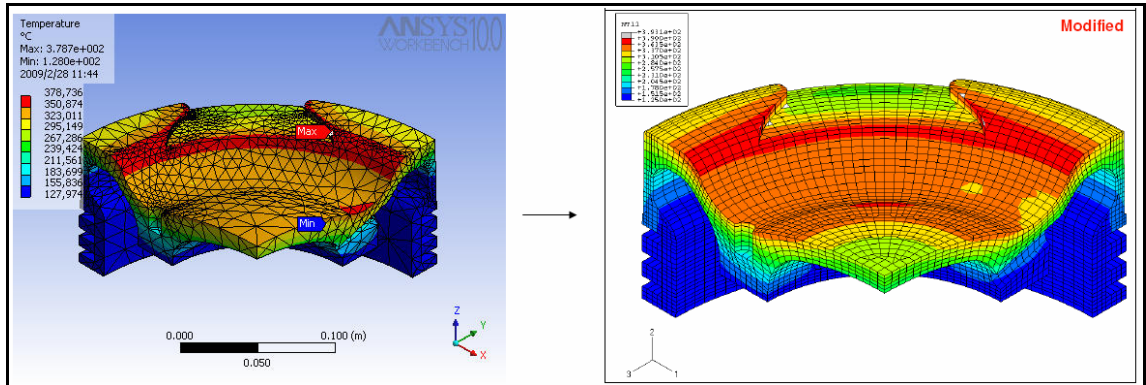


Figura 74. Comparación de Temperatura(⁰ C).

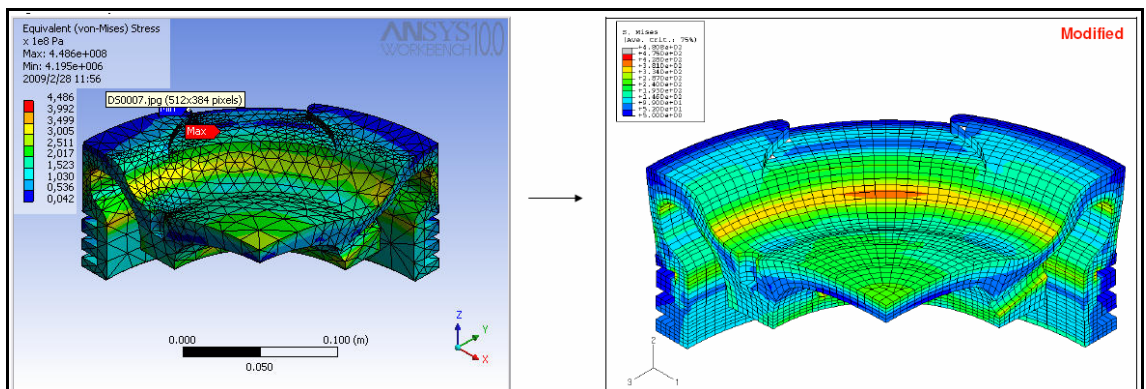


Figura 75. Comparación de Esfuerzos Equivalentes (MPa).

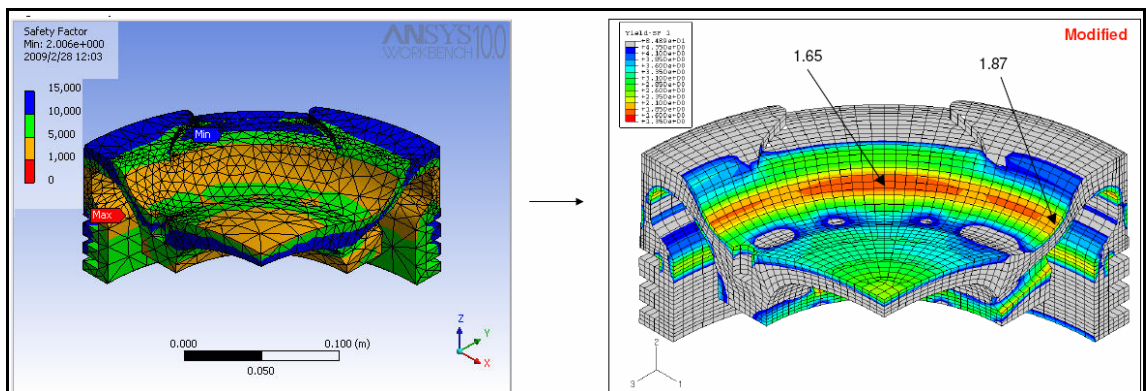


Figura 76. Comparación de Factor de Seguridad.

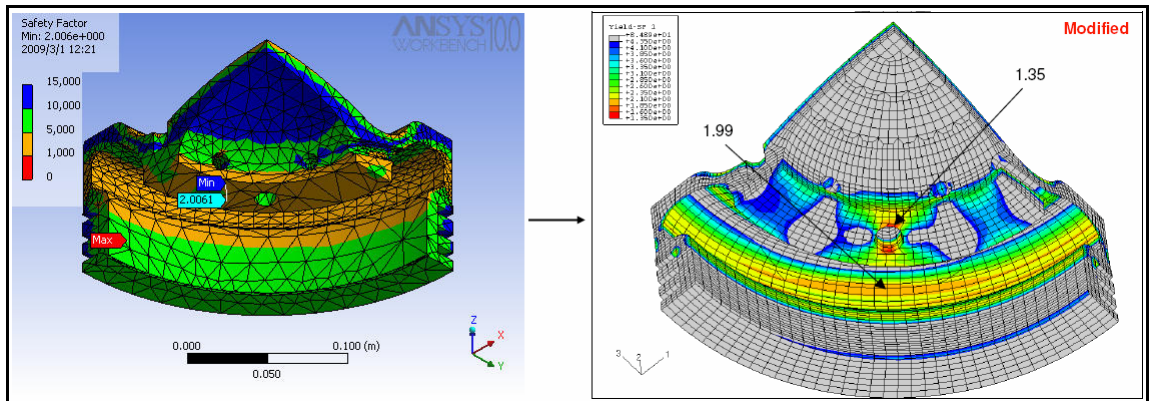


Figura 77. Comparación de Factor de Seguridad.

6.5.3 Resultados del máximo desgaste permisible en la corona Mahle.

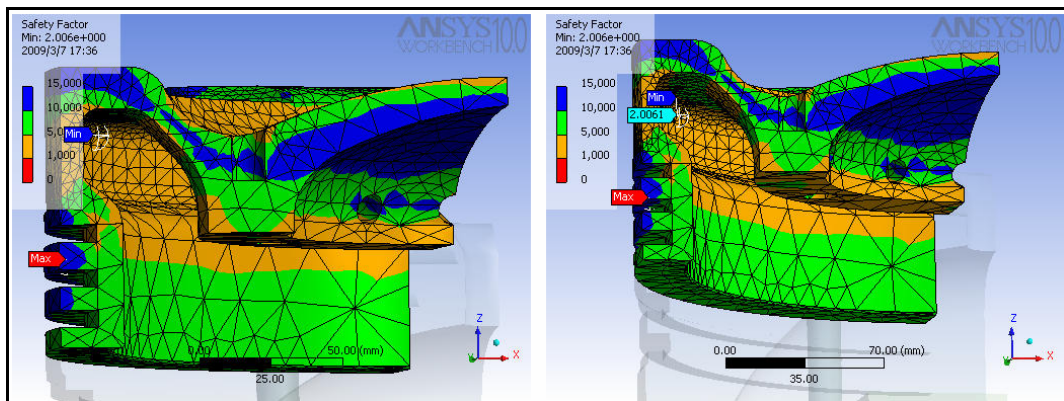


Figura 78. Mínimo factor de seguridad para un desgaste de 0,8 mm.

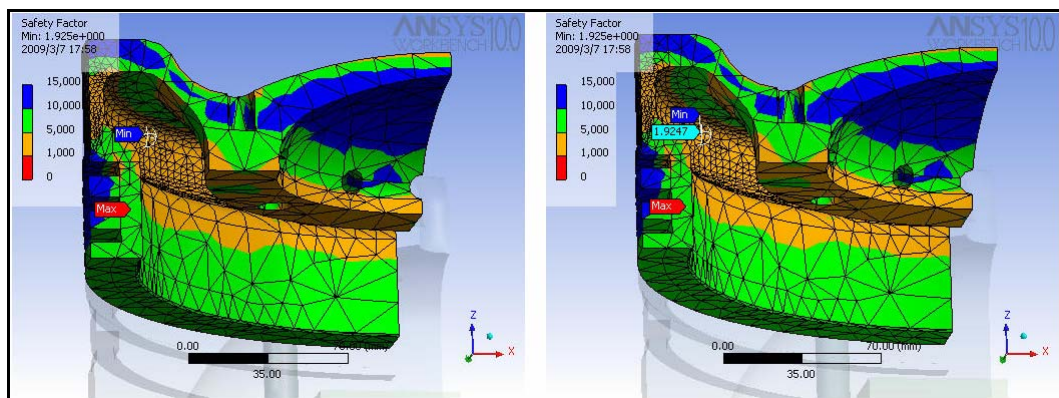


Figura 79. Mínimo factor de seguridad para un desgaste de 1.0 mm.

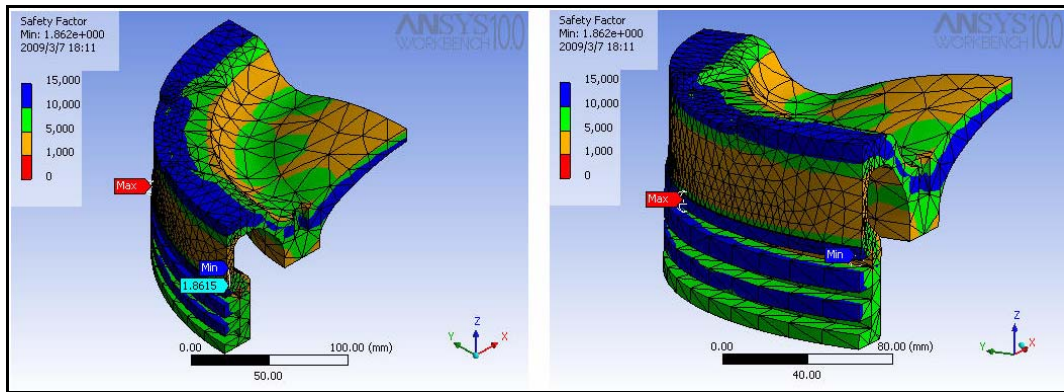


Figura 80. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 1.5 mm.

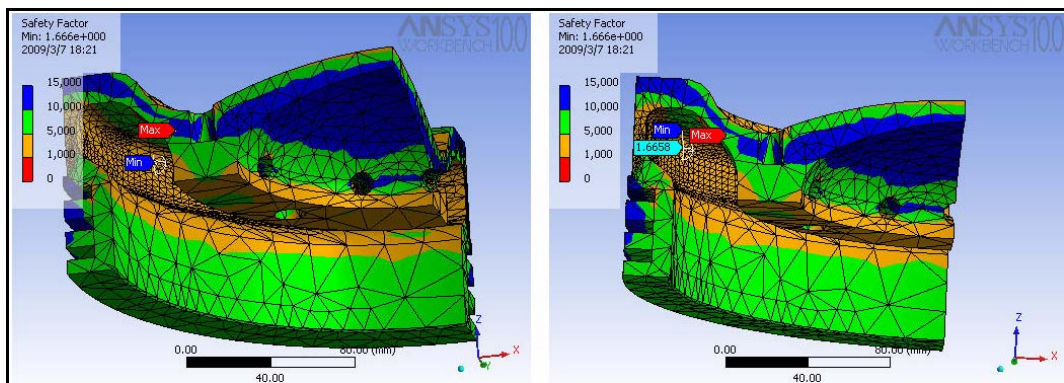


Figura 81. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 2 mm.

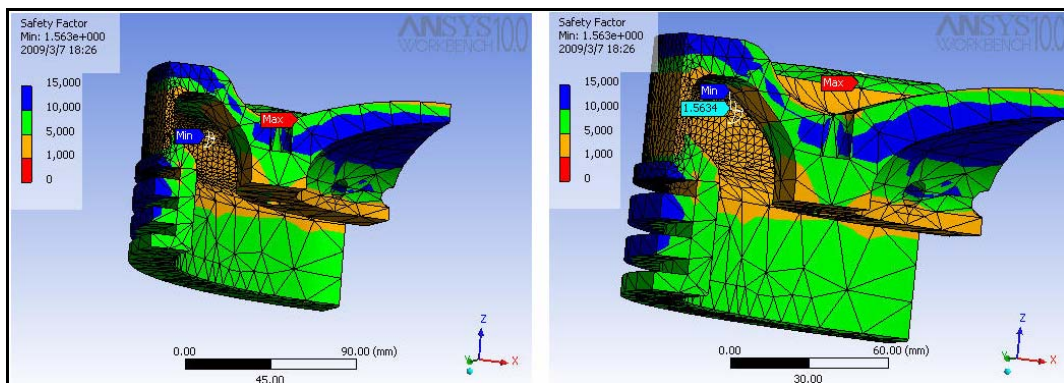


Figura 82. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 2.5 mm.

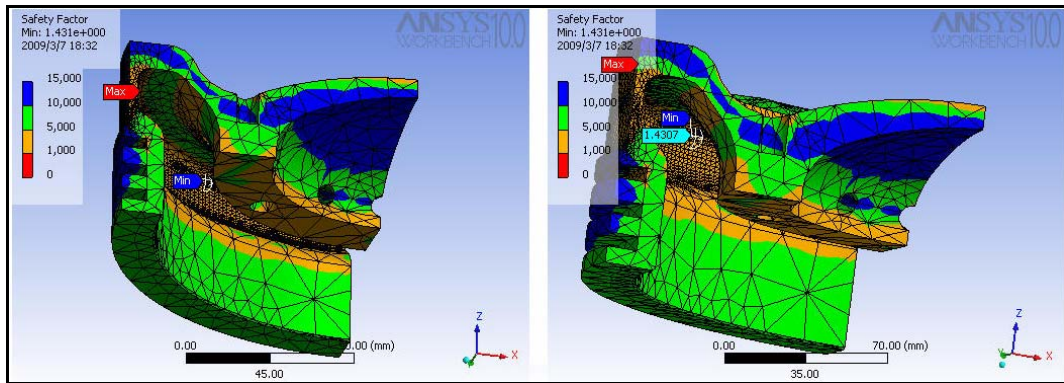


Figura 83. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 3 mm.

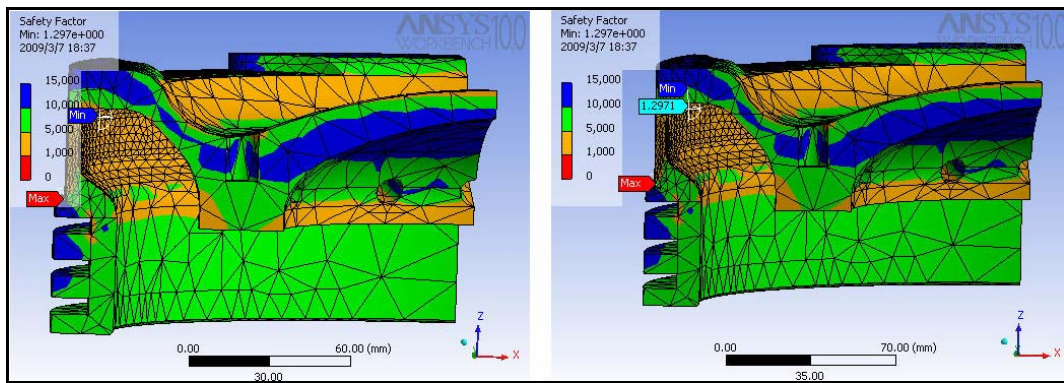


Figura 84. Mínimo factor de seguridad para un desbaste de 3.5 mm.

Diámetro de Desbaste (mm)	Factor de Seguridad
0,8	2,0061
1	1,9247
1,5	1,8615
2	1,6658
2,5	1,5634
3	1,4307
3,5	1,2971

Tabla 41. Valores de factor de seguridad para diversos desbastes.

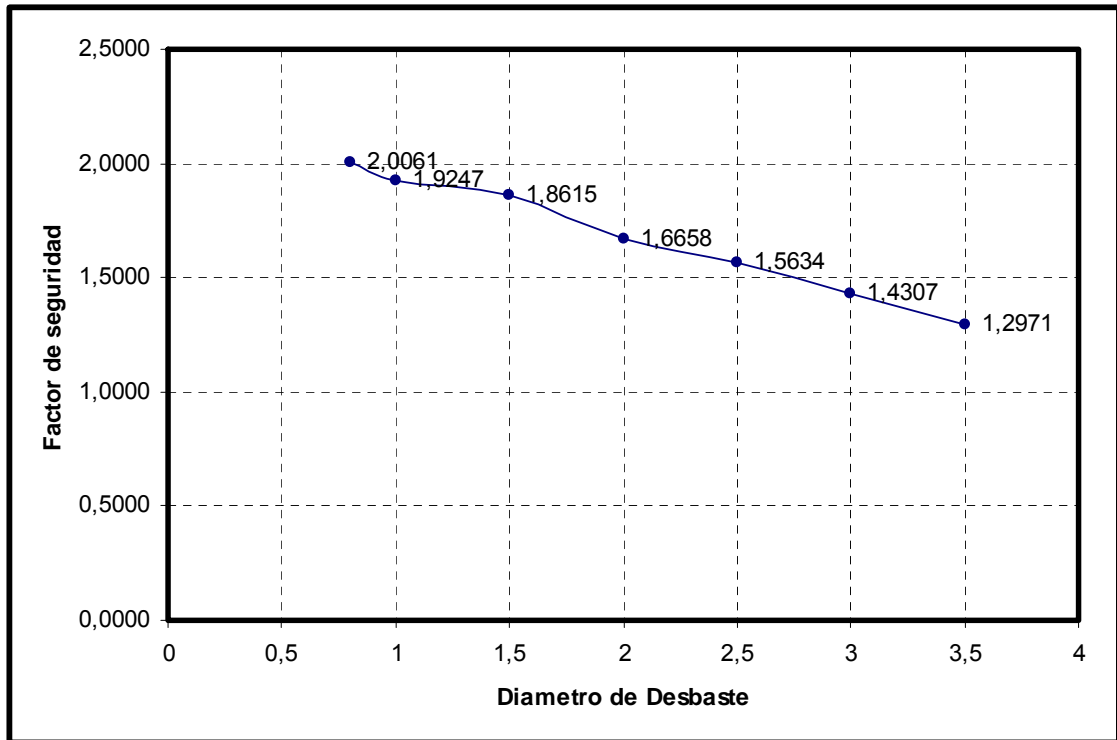


Figura 85. Gráfica de mínimo factor de seguridad vs desbaste en la corona (mm).

7 PERSONAS QUE PARTICIPARON EN EL PROYECTO

- Unidad de Negocio de Generacion de Energia, Occidental de Colombia Inc.
- Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga – UPB.
- Ingeniero Juan Carlos Lopez Ballen
- Ingeniero Cristian Rodriguez Burbano
- Ingeniero Wilson Felipe Jaimes.

CONCLUSIONES

Al realizar el modelo del conjunto motriz del motor Allen, con el software Solid Edge, se consiguió elaborar este de forma muy práctica y sencilla, y se pudo importar dicho modelo a ANSYS para el respectivo estudio.

El máximo esfuerzo equivalente localizados en la parte interna de la corona mecanizada de Mahle con llevan a que esta área soporte la carga estructural, ya que la corona cuenta con un redondeo interno donde ha sido localizado dicho esfuerzo. El valor obtenido del esfuerzo equivalente se encuentra dentro de los límites aceptables de la razón de esfuerzos equivalentes versus esfuerzos de fluencia del material de la corona, dicho valor de esfuerzo también indica que la corona lleva la carga estructural dentro del rango aceptable como lo expresa la teoría de falla para material dúctil o la teoría de los esfuerzos de von Mises – Hencky.

El máximo esfuerzo cortante se encuentra localizado en el mismo punto del esfuerzo equivalente ya que en esta área la corona recibe la carga del gas (presión pico) y una fuerza opuesta que se transmite desde el cigüeñal cuando el pistón del motor Allen se encuentra en el PMS (Punto Muerto Superior), las dos fuerzas en oposición con llevan a generar el esfuerzo cortante allí. El valor que se ha obtenido del esfuerzo cortante en el análisis acoplado (térmico – estructural) de la corona mecanizada del pistón Mahle se encuentra dentro de un rango de 0.6 de acuerdo con la

razón de esfuerzos $\left(\left[\frac{\tau \max}{fSy} \right] < 1 \right)$, lo cual indica la teoría de esfuerzos

cortantes de falla para materiales dúctiles que el valor obtenido representa un valor menor a 1 y por lo tanto no supera la resistencia del esfuerzo de fluencia del material de la corona.

La máxima deformación total ha sido localizada en la parte superior de la corona del pistón Mahle, ya que en esta área la corona de pistones diesel de motores de alta compresión se deforman debido a dos factores fundamentales cuando el pistón recibe la explosión en el PMS (Punto Muerto Superior), altas presiones y altas temperaturas. Este tipo de corona de motores de alta compresión recibe presiones pico muy grandes y altas temperaturas debido a su misma relación de compresión. Las altas temperaturas en la corona del pistón también ocurren por la mezcla de aire y combustible, lo cual conlleva a deformar la corona. Se ha obtenido un valor máximo de deformación total de $7.734E-4$ m ($773.4 \mu\text{m}$), el cual se encuentra dentro del rango aceptable del crecimiento térmico y estructural del material de la corona Mahle, dicho material de la corona está diseñado para deformarse muy poco.

Los resultados de temperaturas, esfuerzos equivalentes y factor de seguridad que se han obtenido en el modelo "mecanizado de la corona del conjunto motriz del motor Allen", realizado en la compañía Occidental de Colombia se encuentran muy cercanos con los resultados que obtuvo la firma AVL POWERTRAIN ENGINEERING, INC para el mismo modelo del conjunto motriz del motor Allen. Esto permite concluir que la metodología utilizada con el software ANSYS para dicho modelo del pistón es la correcta.

Se calculó el factor de seguridad para desbastes entre 0.8 y 3.5 mm, obteniendo que para valores superiores de desbaste de 1.5 mm se obtiene valores de seguridad inferiores a 1,8615, lo que nos permite concluir que 1.5 mm de desbaste sería el límite permisible máximo de desbaste para asegurar un funcionamiento adecuado del conjunto.

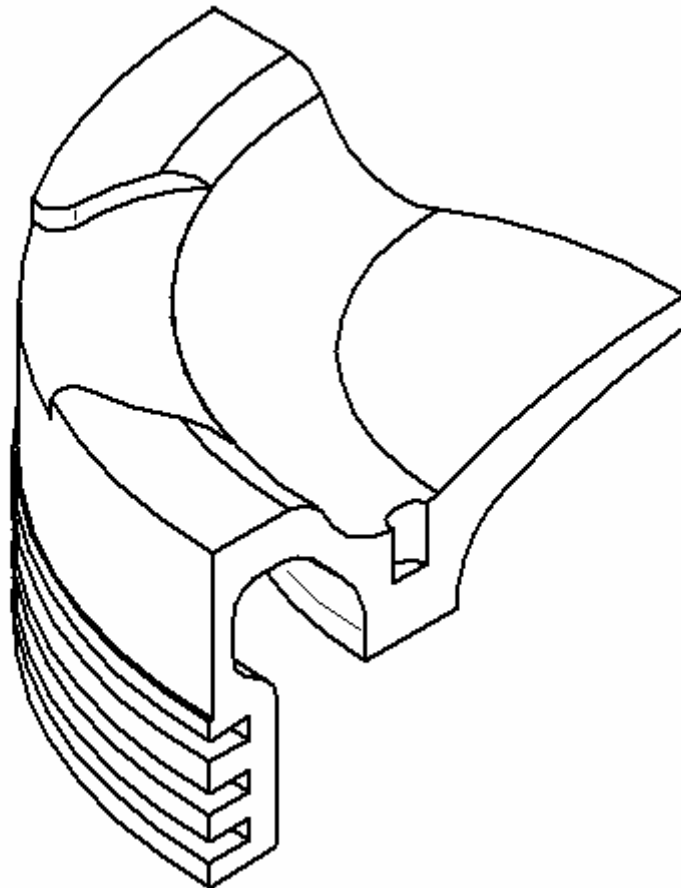
BIBLIOGRAFIA

- [1] Allen W. H. Manual de Instrucciones para los Motores Diesel Allen. Bedford Inglaterra. N E I ltd.
- [2] Byrnes Mike. Bumper to Bumper. Librería Norma.
- [3] Diaz Juan José y Dominguez Francisco José. Introduccion al Metodo de Elementos Finitos del Prgrama ANSYS. ETS Ingenieros Industriales. 2004
- [4] Fornors José Maria. Metodo de Elementos Finitos. Marcombo.
- [5] Heywood Jhon B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York McGraw Hill. 1988.
- [6] Lopez Ballén Juan Carlos. Reducción de Consumo de Aceite en Motores Diesel Allen 8S37G. OXYCOL.2005
- .
- [7]López Emiliano. Generación de Mallas de Elementos Finitos en Paralelo. Argentina Universidad de Mendoza. 2007.
- [8] Moaveni Saeed. Finite Element Anallys Theory and Aplication with ANSYS. Minesota Prentice Hall. 1999.
- [9] Oñate B. Suarez y J Miquel. El Método de Los Elementos Finitos. McGraw Hill. 1994
- [10] Toro Gómez José Rafael. Problemas Varacionales y Elementos Finitos en Ingenieria Mecánica. Bogota Ed Uniandes. 2007.

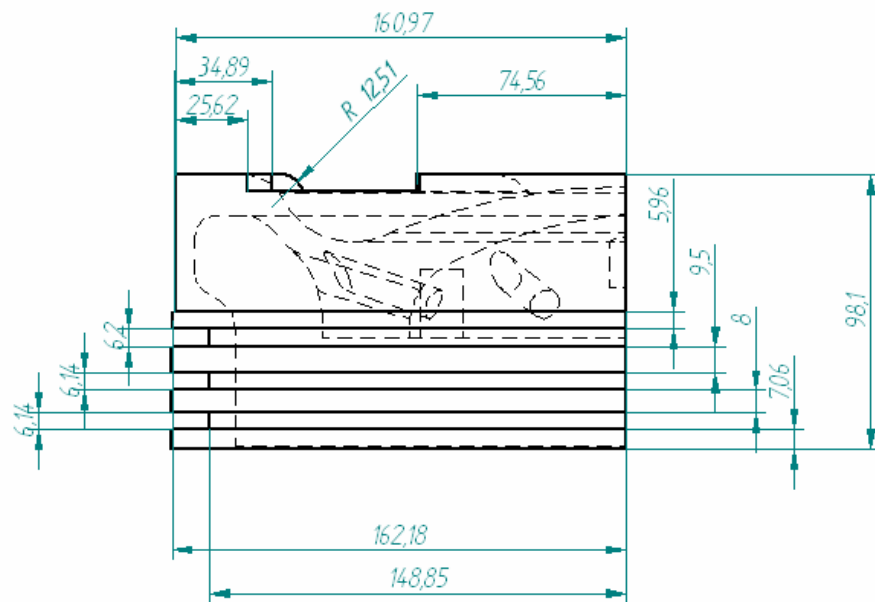
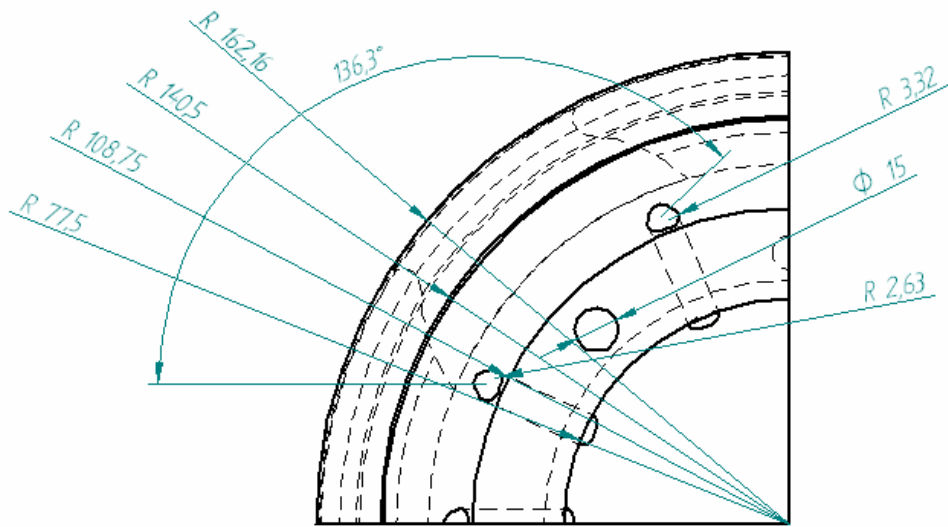
[11] Zienkiewicz Olgierd. Metodo de Elementos Finitos. Reverte.

ANEXOS

ANEXO A. PLANOS DEL CONJUNTO MOTRIZ DEL MOTOR ALLEN



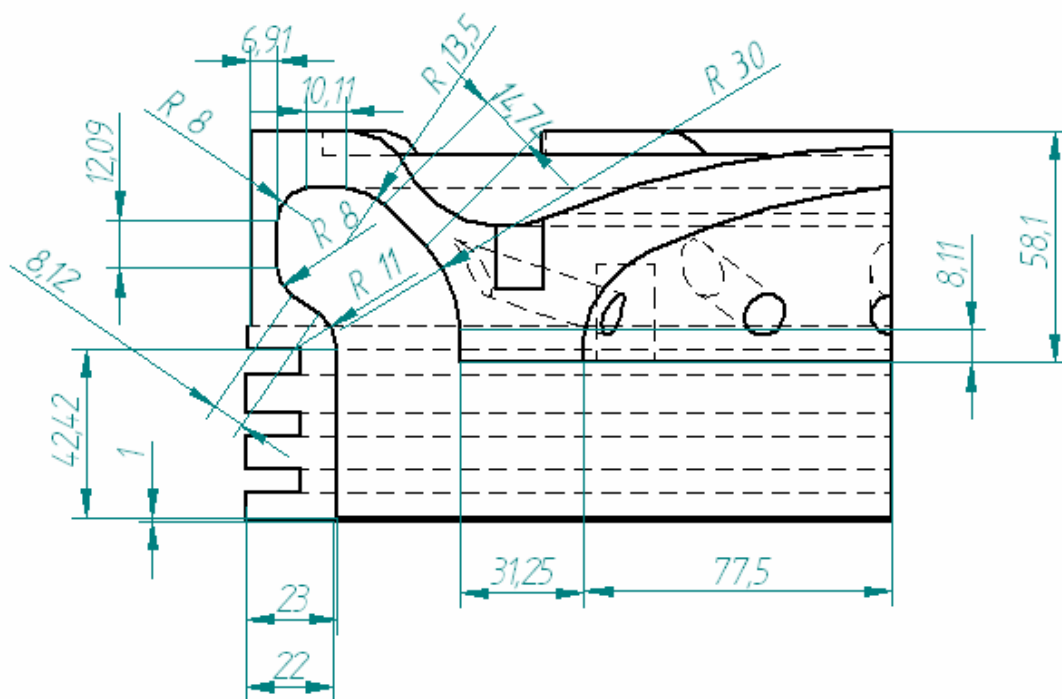
CORONA DEL PISTON MAHLE EN VISTA ISO.



MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

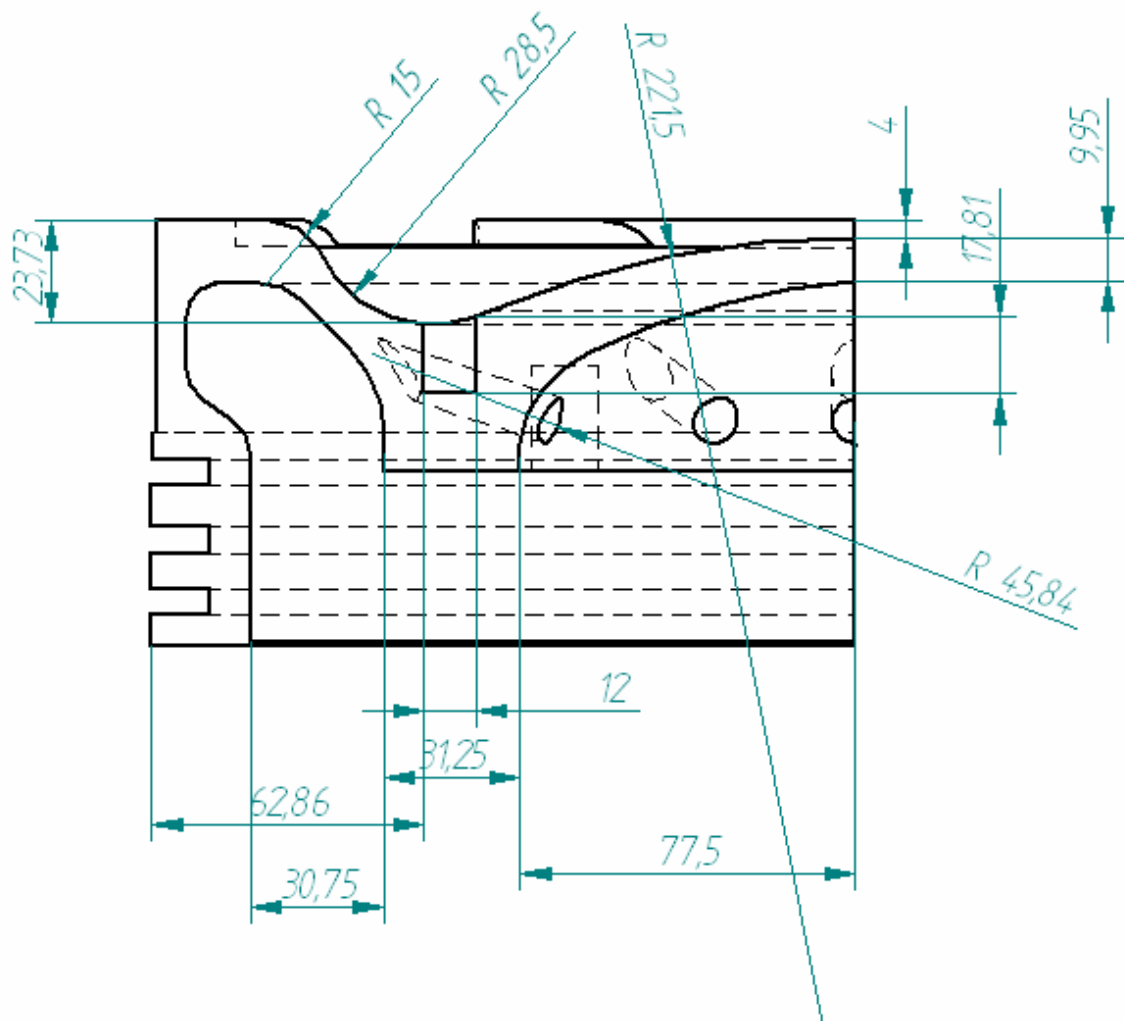
1:2



MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

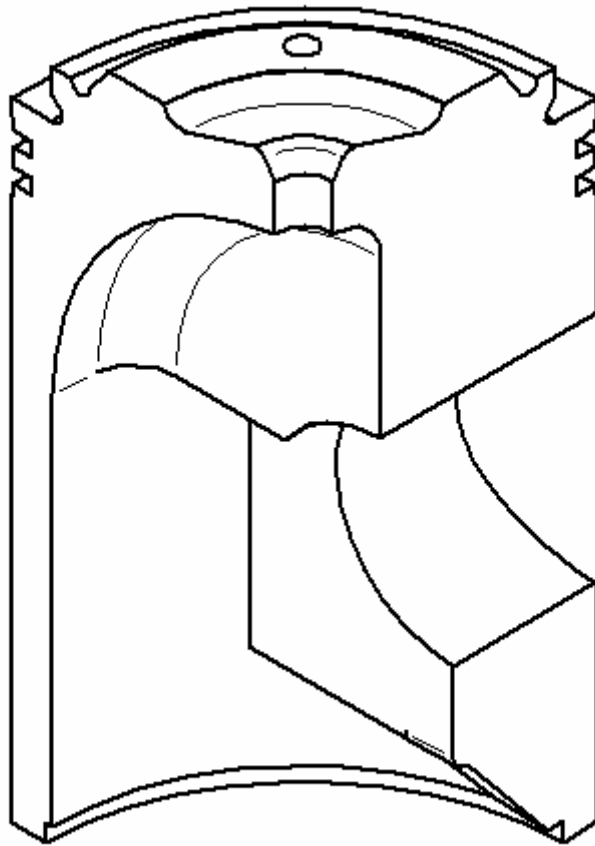
1:2



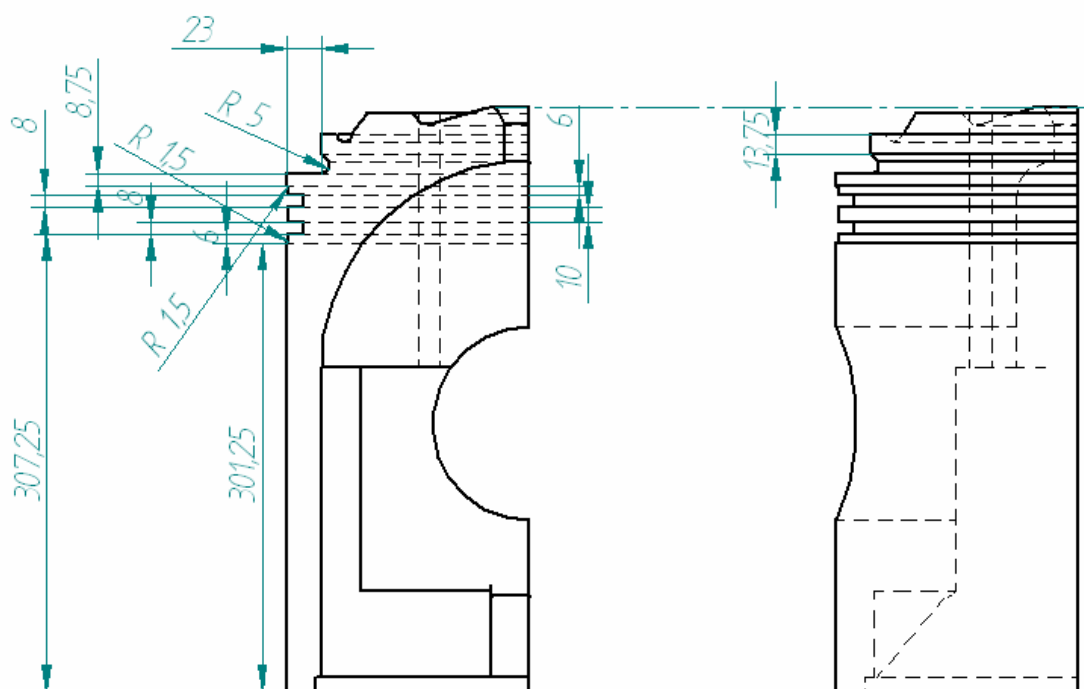
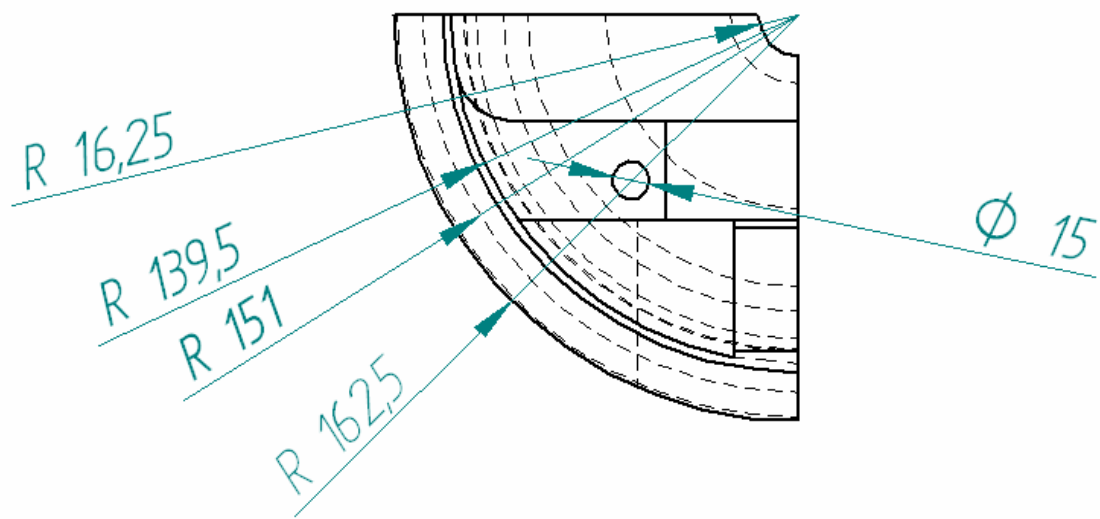
MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

1:2



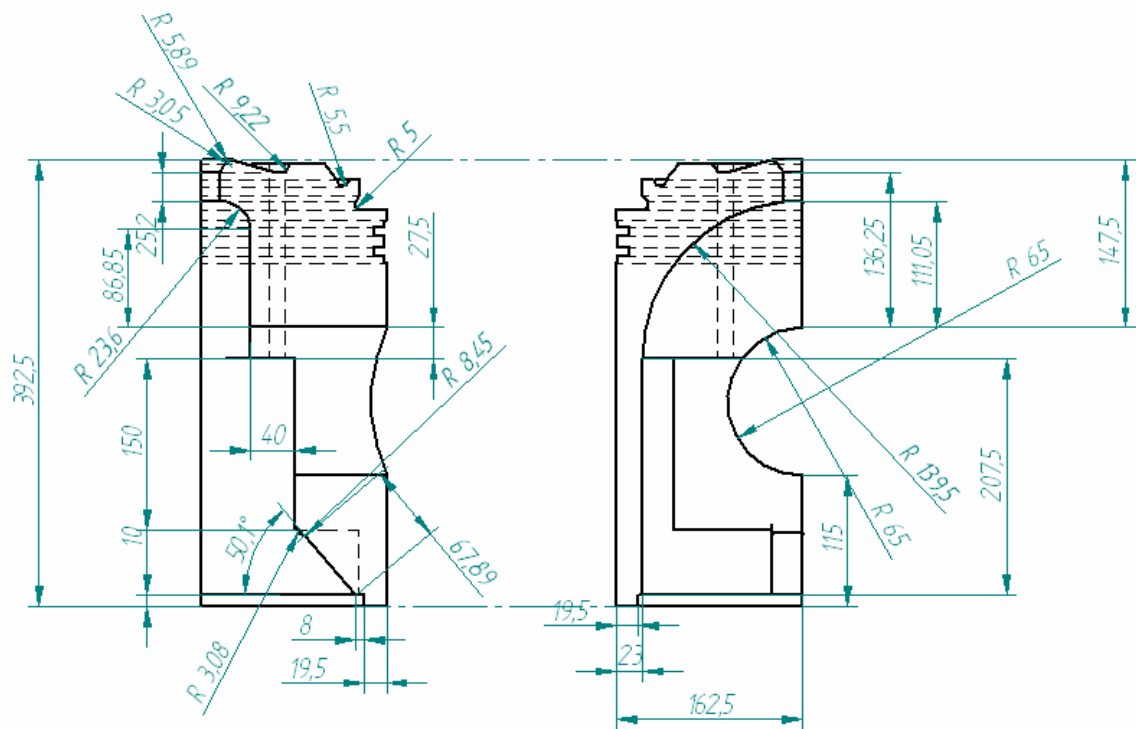
CUARTO DE FALDA DEL PISTON MAHLE EN VISTA ISO.



MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

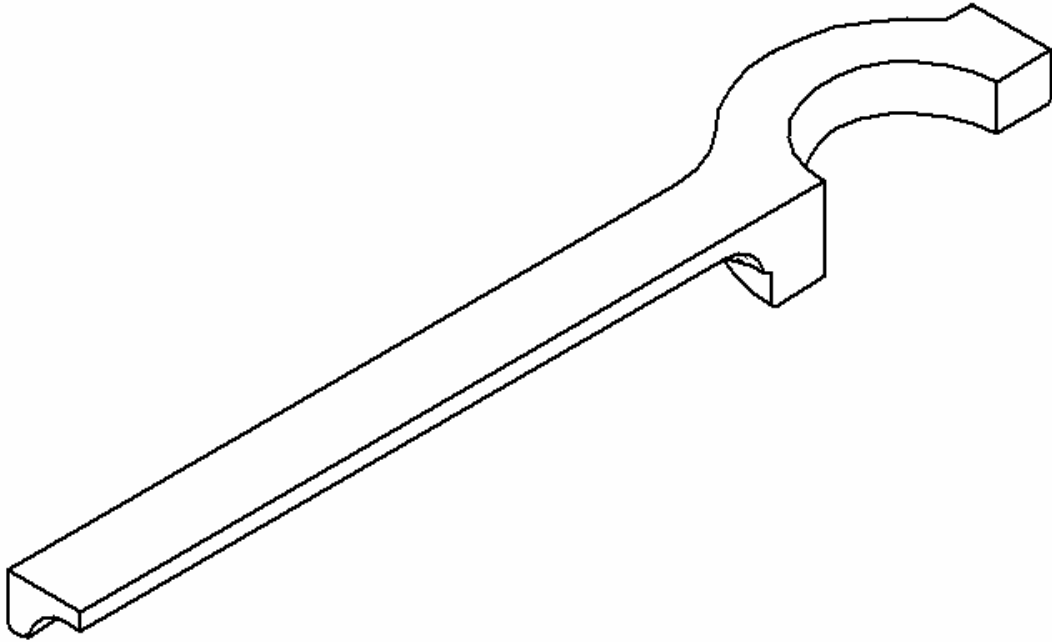
1:5



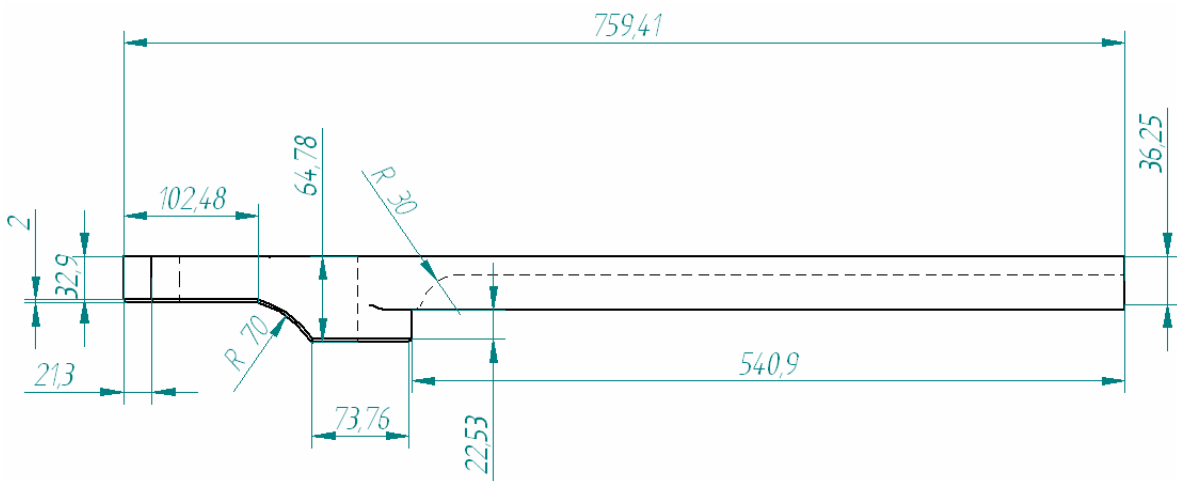
MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

1:5



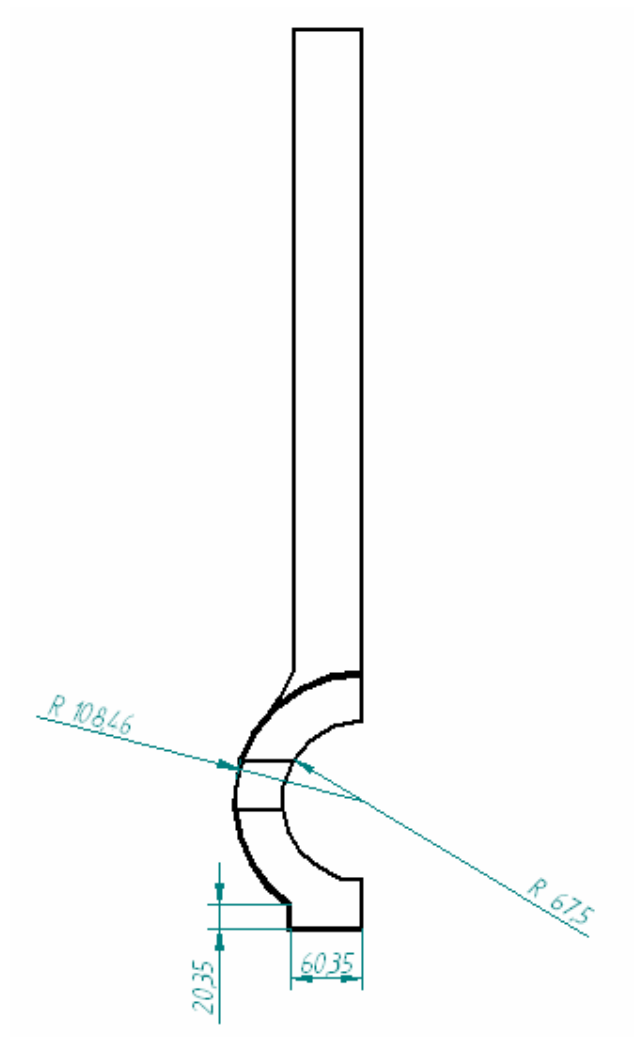
CUARTO DE BIELA DEL PISTON DEL MOTOR ALLEN EN VISTA ISO.



MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

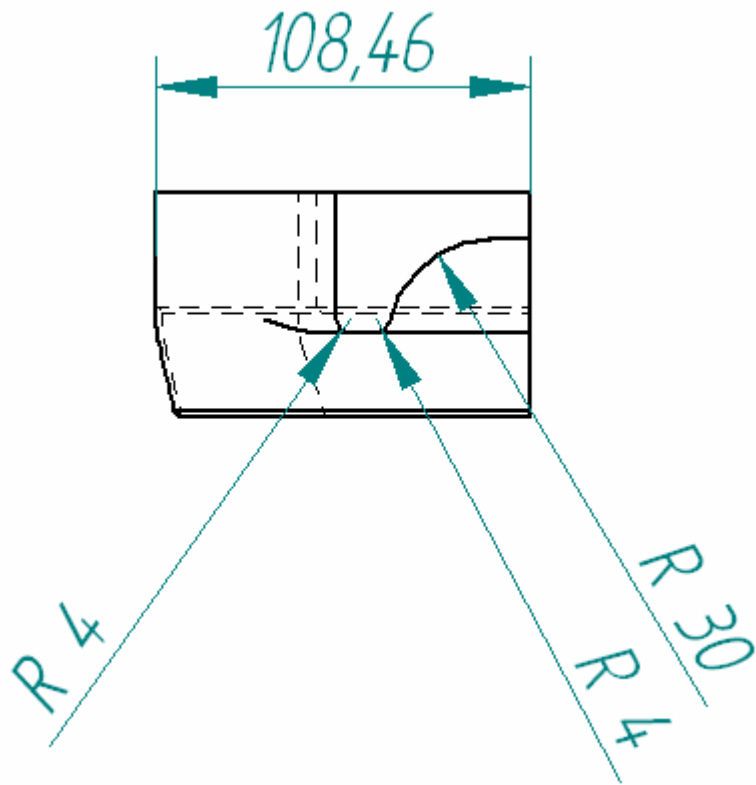
1:5



MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

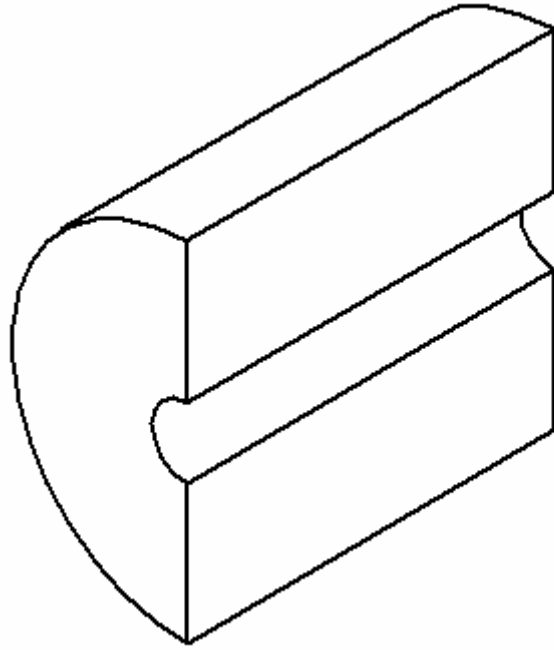
1:5



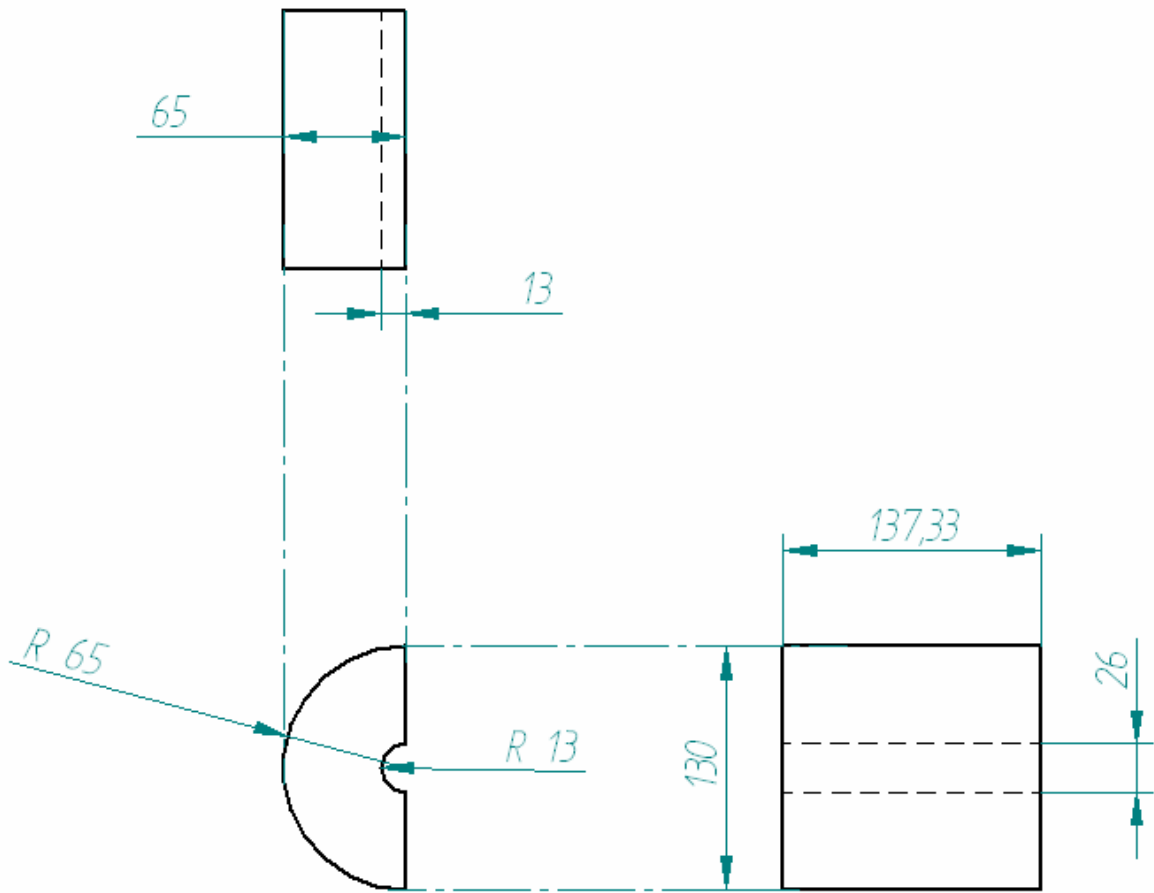
MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

1:5



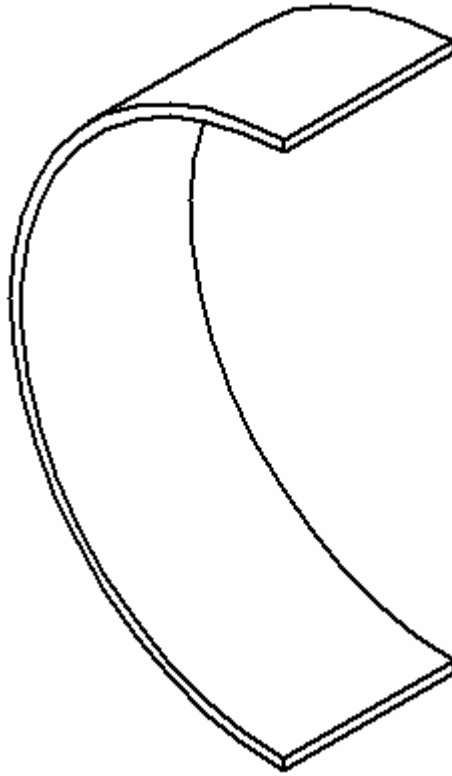
MITAD DE BULÓN EN VISTA ISO.



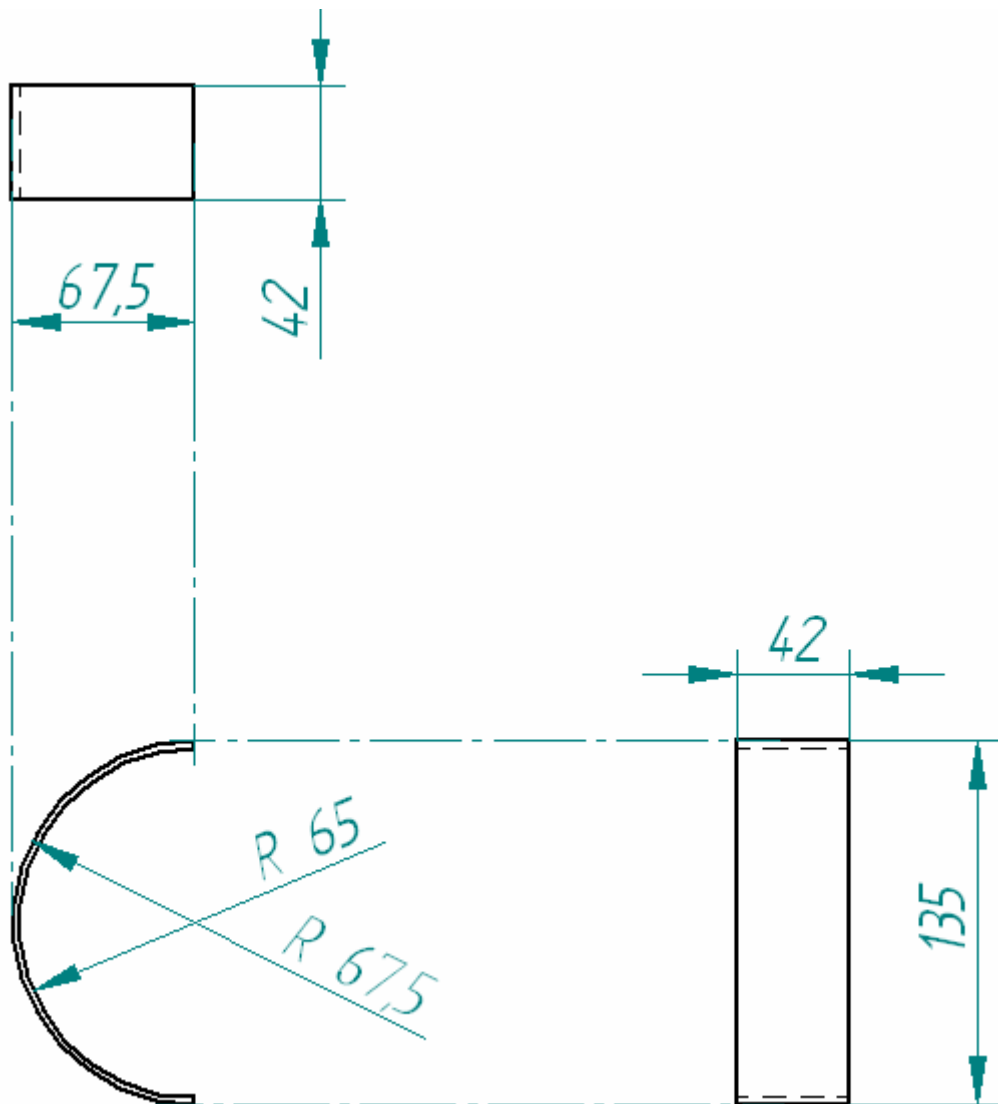
MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

1:5



MITAD DEL CASQUETE EN VISTA ISO.



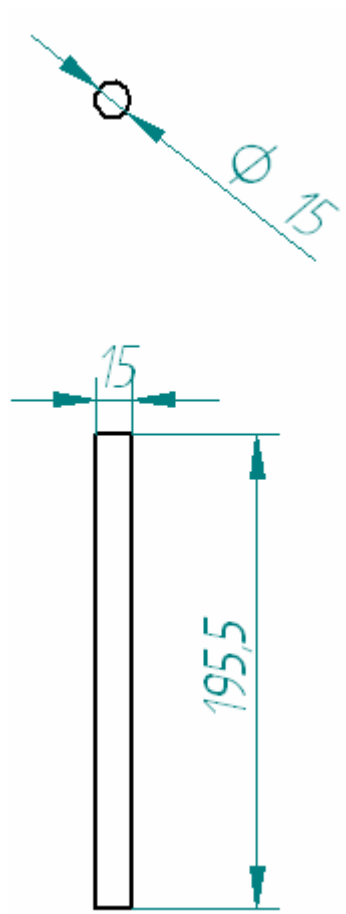
MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

1:5



PERNO SUJETADOR DE CORONA Y FALDA EN VISTA ISO



MEDIDAS EN MILIMETROS

ESCALA

1:5

ANEXO B. FOTOS DEL PISTON MAHLE



ANEXO C. FOTOS DE LA BIELA DEL MOTOR ALLEN



ANEXO D. FOTO DEL BULÓN DEL MOTOR ALLEN



ANEXO E. FOTO DEL CASQUETE DEL MOTOR ALLEN



ANEXO F. FOTO DEL MOTOR ALLEN



ANEXO G. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDADES	TIEMPO EN SEMANAS															
	SEGUNDO SEMESTRE 2007				PRIMER SEMESTRE 2008				SEGUNDO SEMESTRE 2008				PRIMER SEMESTRE DE 2009			
	NOV	DIC	ENE	FEB	ENE	FEB	NOV	DIC	NOV	DIC	ENE	FEB	ENE	FEB	MAR	
DOCUMENTACION BIBLIOGRAFICA	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
REGISTRO DE INFORMACION																
ELABORACION MODELO SOLID EDGE																
ENSAMBLE DEL CONJUNTO MOTRIZ																
SIMULACION (ANSYS)																
RECOPILACION DE DATOS																
INTERPRETACION DE RESULTADOS																
COMPARACION DEL MODELO REALIZADO																
ELABORACION Y PRESENTACION DEL DOCUMENTO FINAL																

SEMANAS DE TRABAJO EN EL PROYECTO
 SEMANAS DE VACACIONES

ANEXO H. CALCULO DE LA DENSIDAD EN FUNCION DEL CAMBIO DE TEMPERATURA PARA EL MATERIAL 42CrMo4.

Los datos de expansión térmica en función de la temperatura son los siguientes;

20C-100C 12,1

100C-200C 12,7

200C-300C 13.2

300C-400C 13,6

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{3a(T_1 - T_0) + 1}$$

Donde ρ_0 es la densidad inicial y ρ_1 es la densidad final, T las temperaturas y 'a' es el coeficiente de expansión térmica lineal. Reemplazando en la ecuación anterior para las siguientes temperaturas tenemos las siguientes densidades del material 42CrMo4:

$$100^0 \longrightarrow \rho = 7807,33 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$200^0 \longrightarrow \rho = 7777,69 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$300^0 \longrightarrow \rho = 7747,02 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$400^0 \longrightarrow \rho = 7715,54 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Nota: Estos valores se obtuvieron reemplazando los datos de temperatura y densidad en la ecuación anterior, teniendo en cuenta que $\rho_0 = 7830 \text{kg/m}^3$ y la temperatura $T_0 = 20$ grados celcius.