

Estudio térmico de un pistón: materiales que mejoran la resistencia térmica de un pistón MCI

Thermal analysis of a piston: materials that improve the thermal resistance of an MCI

José M. Ostría Armas ^a, José L. Rodríguez Muñoz ^b, Rodrigo Cruz Trejo ^c, Carlos E. Borja Soto ^d, Gabriel I. Vásquez Hernández ^e, Jorge Zuno Silva ^f

Abstract:

The efficiency of an internal combustion engine largely depends on the proper design and manufacturing of its pistons because they convert thermal energy into mechanical energy. Therefore, it is crucial to select a manufacturing material that can withstand high temperatures. This prevents mechanical failure, reduces wear, improves engine efficiency, and allows for better control of thermal expansion. This prevents the piston from seizing within the cylinder. This study aims to conduct a thermal, stress, and safety analysis of an internal combustion engine (ICE) piston using SolidWorks software. Five different aluminum alloys were evaluated and compared under identical operating conditions: Al 6063-O, Al 2219-O, Al 4032-T6, Al 2024, and Al 2618-T61. With a heat input of 1467.8 W in the combustion chamber and internal and external convective heat transfer coefficients of 750 and 2330 W/m²°C, respectively, and an operating temperature of 90°C, Al 6063-O exhibited the lowest piston surface temperature (192.04°C), while Al 4032-T6 exhibited the highest (223.09°C). However, the von Mises stresses for Al 6063-O were higher than those observed with the other alloys.

Keywords:

Internal combustion engine, piston, thermal analysis, and heat transfer

Resumen:

La importancia de la eficiencia de un motor de combustión interna se basa principalmente en un adecuado diseño y fabricación de sus pistones, ya que estos se encargan de convertir la energía térmica en energía mecánica. Por tal motivo, es recomendable establecer el tipo de material que se debe usar para su fabricación que permitan resistir altas temperaturas, lo que ayuda a prevenir fallas mecánicas, reduce el desgaste, mejora la eficiencia del motor y permite tener un mejor control de la dilatación térmica de este, evitando que este se atasque en el cilindro. Por esa razón, este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis térmico, de esfuerzos y de seguridad en un pistón de motor de combustión interna (MCI) a través del software SolidWorks. El estudio fue realizado para cinco diferentes aleaciones de aluminio: Al 6063-O, Al 2219-O, Al 4032-T6, Al 2024 y Al 2618-T61 y los resultados fueron comparados bajo las mismas condiciones de operación. Cuando se aplica una potencia calorífica en la cámara de combustión de 1467.8 W, un coeficiente

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0000-3134-5413>, Email: os361165@uaeh.edu.mx

^b Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-2907-7605>, Email: rodrigo_cruz@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-6332-6273>, Email: gabriel_vasquez@uaeh.edu.mx

^f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

convectivo interior y exterior de $750 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y $2330 \text{ W/m}^2\text{°C}$, así como una temperatura de operación de 90°C , la aleación de aluminio Al 6063-O presenta la menor temperatura en la superficie del pistón (192.04°C), mientras el Al 4032-T6 fue el material con la mayor temperatura superficial (223.09°C). Sin embargo, los esfuerzos de von Mises del aluminio Al-6063-0 son mayores a los obtenidos con las otras aleaciones.

Palabras Clave:

Motor de combustión interna, pistón, análisis térmico y transferencia de calor

Introducción

El primer motor de combustión interna (MCI) fue construido en 1876 por el Ingeniero Alemán Nicolaus Otto. Este ciclo logró que un motor de combustible pudiera energizar un automóvil gracias a los estudios llevados a cabo durante varios años y llegando así al hallazgo de que con 4 tiempos es posible que un automóvil pueda llegar a moverse (Calzetta, 2024). El pistón de motor de combustión interna es una parte mecánica fundamental en el motor debido a que transfiere la energía térmica al cigüeñal convirtiéndose así en energía mecánica, estos motores generalmente se utilizan en medios de transporte tales como automóviles, aviones y camiones, de igual manera estos motores son utilizados en industrias, bombas, compresores, etc. (Montes, 2023).

En otras palabras, un pistón de motor de gasolina es un cilindro previamente fabricado ya sea forjado o fundido, cuya función es transformar la energía térmica o calorífica en potencia, y a dicho proceso se le conoce como ciclo Otto (Camargo, 2010). Cabe mencionar que en un inicio se solían utilizar pistones con materiales que fueran resistentes al calor, sin embargo, los avances tecnológicos llevaron a requerir pistones de menor peso capaces de conducir el calor como fue el caso de las aleaciones de aluminio (Yenmak, 2024).

En la literatura se pueden encontrar una gran variedad de trabajos que se enfocan ya sea en la investigación o en la experimentación del pistón automotriz. Por ejemplo, José Soriano, 2016 realizó una investigación para determinar los componentes fundamentales en un motor de combustión interna, encontrando que, el pistón, la biela y el cigüeñal son elementos importantes en un motor debido a que transforman la mezcla en energía térmica en trabajo o potencia útil. El autor determinó que el pistón sufre un rozamiento y desgaste principalmente en la parte superior del pistón, por ende, dicho pistón debe estar fabricado con materiales resistentes a altas temperaturas, pero que este debe ser ligero, por lo que una aleación de aluminio, es el material más adecuado para la fabricación de pistones.

Basado en lo anterior, Cabrera-Erazo, 2019 encontró que existen dos tipos de pistones empleados en aplicaciones automotrices: tipo forjado y tipo fundido. Sus resultados revelaron que el pistón tipo forjado presenta mejores características que las obtenidas por el pistón fundido, sobre todo, en las impurezas y poros en su interior. Por otra parte, los pistones de un motor de combustión interna soportan cierta cantidad de energía, para lo cual es necesario determinar la temperatura que este soportaría, producto de la transferencia de calor ocasionado del proceso de combustión. Para analizar un estudio térmico en el pistón, se deben tomar en cuenta las condiciones de frontera también a las cuales va estar expuesto el sistema, así como los medios de transferencia de calor. Por lo tanto, el estudio térmico de un pistón MCI debe resistir altas temperaturas, a tal grado que existen procesos que tienen la capacidad de resistir altas temperaturas en la superficie y falda del pistón, los cuales son denominados como recubrimientos del pistón o barreras térmicas. En este sentido, Tenango-Pirin, 2020 realizó un análisis térmico que consiste en el recubrimiento de un pistón de un MCI con materiales cerámicos como el $\text{ZrO}_2\text{-}8\%\text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ y $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$, determinando que el $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ presentó mejores prestaciones térmicas que los otros materiales cerámicos.

Por su parte, Yugcha et al., 2025 realizaron una comparación de pistones originales y genéricos para evaluar sus propiedades mecánicas. Sus resultados revelaron que un pistón genérico tiene mayor dureza, pero menor resistencia, lo que puede provocar desgaste en anillos y cilindros. Sin embargo, los pistones originales suelen tener menor dureza, mejorando la vida útil del motor. Otra investigación como la desarrollada por Czerepak y Piątkowski, 2023 se enfocó en determinar el efecto de los recubrimientos cerámicos en la falda de un pistón automotriz. Sus resultados mostraron una reducción en los esfuerzos de fatiga que provoca la fricción entre el pistón y el cilindro. Además, el funcionamiento y la composición del material son parámetros importantes para el correcto funcionamiento del pistón y la eficiencia en un MCI.

Como se demostró en trabajos previos, los pistones sufren un desgaste en la parte superior debido a la combustión, pues este soporta diferentes temperaturas dependiendo del material con el que esté fabricado, en este estudio se toman en cuenta diferentes materiales para saber cuál es mejor dependiendo de las características y precio del material. Para este trabajo se tiene como objetivo realizar la comparativa de un pistón respecto de diferentes factores tanto de temperatura como de costos de los diferentes materiales utilizados realizando un análisis térmico en el software SolidWorks, dichos materiales son aleaciones de aluminio dentro de materiales utilizados son Al 2219-O, Al 4032-T6, Al 6063-O, Al 2618-T61 y Al 2024, se va a realizar la comparativa para saber que material es mejor respecto a la temperatura que sufren los pistones en el proceso de combustión.

Para la validación del modelo desarrollado en el presente trabajo, fue necesario considerar las medidas del pistón

[illegible]

Posteriormente, se le aplicaron las condiciones de frontera al pistón para empezar a realizar el estudio térmico y se puedan obtener los perfiles de temperatura, dichas condiciones son mostradas en la Tabla 1. Dichas condiciones de frontera también fueron obtenidas del trabajo realizado por Tenango-Pirin (2020).

Condición de frontera	Valores	
Características	Referencia	Propio
Convección Interior	90°C, 750 W/m ² °C	Convección Interior
Convección Exterior	90°C, 2330 W/m ² °C	Convección Exterior

54

la energía hacía el resto del pistón y dicha condición se muestra en la Figura 2 (c).

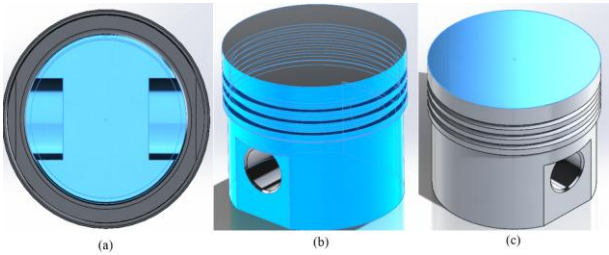


Figura 2. Representación de las condiciones de frontera aplicadas a cada parte del pistón: a) convección interior, b) convección exterior, c) potencia calorífica. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó la comparativa de resultados obtenidos en el presente trabajo en comparación a los valores reportados por Tenango-Pirin (2020). Haciendo la comparativa, se puede observar que los valores de temperatura entre ambos resultados son muy similares. Para el presente trabajo, se obtuvo una temperatura máxima en la superficie del pistón fue de 208.26°C, mientras que la simulación realizada por Tenango-Pirin (2020) fue de 209.04°C, lo que representa un error del 0.37%. Con lo que respecta a la falda del pistón, la mínima temperatura obtenida entre el modelo desarrollado respecto al valor reportado en la literatura fue de 92.36°C y 92.96°C, respectivamente, lo que representa un error del 0.64%.

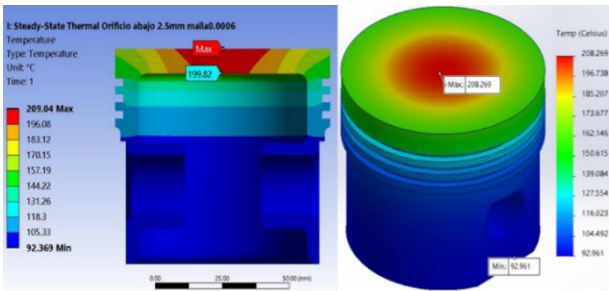


Figura 3. Comparación de temperatura entre pistón de elaboración propia y un pistón extraído de Tenango-Pirin (2020). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se muestran los valores de temperatura máximos y mínimos obtenidos en el pistón del trabajo reportado en la literatura respecto a los valores obtenidos en el presente trabajo. Los resultados muestran una buena concordancia entre ambos resultados, mostrando un error porcentual menor al 1%, por lo que el modelo

reproduce con una adecuada confiabilidad los valores de temperatura en el pistón.

Tabla 2. Comparación de temperaturas existentes en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Características	Referencia	Propio
Temperatura máx.	209.04°C	208.269°C
Temperatura min.	92.369°C	92.961°C

Para asegurar la exactitud del modelo desarrollado, los resultados fueron también comparados con los valores reportados por Sai et al., 2024. Para realizar la comparativa, se estableció que el pistón es fabricado por medio de una aleación de aluminio Al-6061 y los resultados fueron comparados a las siguientes condiciones de frontera: el flujo de calor varía entre los 1883.5 W/m² y 6.274x10⁶ W/m². Además, el coeficiente de convección interior fue establecido a un valor de 200 W/m²K y una temperatura de 25°C. Los resultados muestran una temperatura máxima de 209.164°C y una temperatura mínima de 123.514°C (Figura 4), por lo que se asemeja a la temperatura máxima que hay en el pistón reportada en la validación anterior, con esto se comprueba una vez más que el método utilizado para este artículo es funcional.

Finalmente, los resultados de la simulación también fueron comparados con los valores obtenidos por Cioatã at al., 2017 empleando el mismo material que las comparativas anteriores. Par este caso, se consideraron las siguientes condiciones de frontera: convección en la parte interna del pistón a una temperatura de 90°C y un coeficiente de 750 W/m²°C. Para la parte externa se utilizó una temperatura de 90°C, un coeficiente de transferencia de calor de 2330 W/m²°C y potencia calorífica de 1467.8 W/m² en la parte superficial del pistón, la validación se muestra en la Figura 5. Los resultados revelan comportamientos muy similares a los obtenidos al de las otras simulaciones, donde la máxima temperatura en la superficie del pistón fue de 209.81°C y la mínima de 92.78°C, corroborando que el modelo predice con exactitud los valores de temperatura.

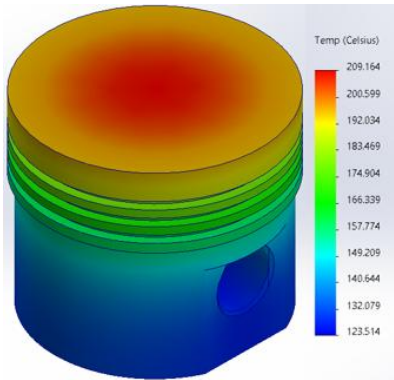


Figura 4. Segunda validación del estudio térmico. Fuente: Elaboración propia.

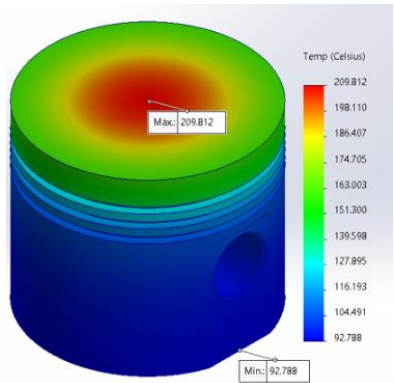


Figura 5. Tercera validación de estudio térmico. Fuente: Elaboración propia.

Propiedades de los materiales

Para realizar la simulación y análisis del pistón, es necesario conocer y aplicar las propiedades térmicas del material con el que se va a estar fabricar el pistón, como es la conductividad térmica, el calor especifico y la densidad de dichas propiedades se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades termofísicas del material. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Valores
Conductividad térmica	165 W/m°C
Calor específico	875 J/kg°C
Densidad	2770 kg/m³

Para este estudio se emplearán diferentes aleaciones de aluminio, con el objetivo de hacer una comparativa térmica y de esfuerzos que ayuden a identificar la propuesta más viable para su aplicación en pistones automotrices. Como ya me mencionó, en el estudio se deben tener en cuenta las diferentes propiedades para cada material, tanto térmicas como de resistencia mecánica. Para tal efecto, en la Tabla 4 se incluyen las

principales propiedades de los materiales y sus respectivos valores.

Tabla 4. Propiedades del material del pistón. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Material				
	Al 6063-O	Al 2219-O	Al 4032-T6	Al 2618	Al 2024
k (W/mK)	218	170	138	146	140
C_p (J/kg°K)	900	864	850	875	800
Límite elástico (N/mm²)	50	70	315	372	75.8
Módulo elástico (kN/mm²)	69	72	79	74.5	73
α (e ⁻⁵ /K)	2.34	2.23	1.94	2.2	2.3
Módulo de Poisson	0.33	0.33	0.34	0.33	0.33

k = Conductividad térmica, C_p = Calor específico, α = Coeficiente de expansión térmica

En la Tabla 6 se muestra la información referente a las propiedades mecánicas principales que cada material posee, así como el medio de temple que fue aplicado. Para el caso del material Al 6063-O, este presenta un tratamiento de recocido, al igual que la aleación Al 2219-O. Por otra parte, para las aleaciones Al 4032-T6 y el Al 2618-T61 presentan un proceso de temple, mientras la aleación Al 2024 se encuentra con un proceso de normalizado.

Tabla 6. Propiedades mecánicas, de esfuerzo y resistencia de los materiales. Recocido, Rec, temple, Tem y normalizado, Norm. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Material				
	Al 6063-O	Al 4032-T6	Al 2219-O	Al 2024	Al 2618-T61
	Rec	Tem	Rec	Norm	Tem
Dureza Brinell	25	120	46	120	120
Alargamiento o a la rotura	21%	6.7%	14%	16%	5.8%
Resistencia a la fatiga (MPa)	55	110	90	180	110
Resistencia al corte (MPa)	70	260	110	320	260

Resistencia a la tracción UTS (MPa)	110	390	180	540	420
---	-----	-----	-----	-----	-----

El proceso de temple en pistones tiene como objetivo incrementar su resistencia mecánica, la dureza y la estabilidad térmica. Por su parte, el proceso de normalizado se realiza para homogeneizar la microestructura interna del material y eliminar las tensiones residuales acumuladas durante las fases de fundición o forja.

Los materiales Al 4032-T6, Al 2024 presentan una dureza de 120 HB, el Al 6063-O una dureza de 25 HB, mientras el Al 2219-O presenta una dureza de 46 HB. También se muestra que el material que presenta la mayor resistencia a la fatiga, al corte y a la tracción es la aleación Al 2024. Una alta dureza implica que el material puede soportar altas cargas estructurales, ofrecer alta resistencia a la fatiga y puede evitar deformaciones permanentes.

Los pistones suelen ser ligeros para que puedan realizar su funcionamiento de manera óptima. Además, esto permite reducir las fuerzas de inercia, que el motor suba más rápido de revoluciones, disminuir el desgaste interno y mejorar la eficiencia de combustión. Para tal efecto, se realizó una comparativa de los pistones mencionados anteriormente. Como se observa en la Tabla 5, la masa resultó ser distinta para los diferentes tipos de pistones. Se tiene que el pistón original (Al 4032-T6) tiene una masa de 0.379 kg, mientras que el pistón Al 2219-O presenta una masa de 0.402 kg, lo que representa que el pistón original presenta 6.06% menor masa que el pistón alternativo Al 2219-O. Por otra parte, el pistón Al 6063-O tiene una masa de 0.382 kg, por consiguiente, el pistón original es un poco más ligero teniendo una diferencia de 0.003 kg, aunque este es 5.23% más ligero que el pistón Al 2219-O. Con lo que respecta a los pistones Al 2618-T61 y Al 2024, estos presentan una masa menor al pistón Al 2219-O, pero mayor que el pistón original (Al 4032-T6) con una masa de 0.390 kg y 0.396 kg, respectivamente. Se sabe que entre más ligero es un pistón, mejor será su rendimiento energético, destacándose el Al 4032-T6 por su bajo peso.

Tabla 5. Propiedades volumétricas del pistón para distintos materiales.

Material	Propiedad		
	Densidad kg/m ³	Masa kg	Peso N
Al 6063-O	2,699.86	0.382	3.741
Al 2219-O	2,839.85	0.402	3.935
Al 4032-T6	2,679.86	0.379	3.714

Al 2618-T61	2759.85	0.390	3.824
Al 2024	7,799.85	0.396	3.880

Resultados

En esta sección se realiza una comparativa de pistones según los distintos tipos de materiales para determinar la distribución de temperatura y los esfuerzos que se presentan tanto en la parte superior como en la falda del pistón, las aleaciones de aluminio que se estarán analizando son: Al 6063-O, Al 2219-O, Al 4032-T6, Al 2618-T61 y Al 2024. Como se observa en la Figura 6, el cual hace referencia al pistón original Al 4032-T6 presenta una temperatura máxima de 223.097°C, mientras la temperatura mínima es de 92.632 (Figura 6a). Por otra parte, en la Figura 6b se observan los esfuerzos presentes en el pistón sujetos a las condiciones de frontera incluidos en la Tabla 3. Comparado con los resultados obtenidos por la aleación de aluminio Al-6061 de la Figura 3, se puede establecer que la aleación Al 4032-T6 presenta un ligero aumento en la temperatura de la superficie del pistón debido a que este material presenta una menor conductividad térmica, esto puede resultar en una menor eficiencia para disipar el calor hacia el medio ambiente, provocando un incremento en su temperatura interna. Los resultados también muestran un máximo esfuerzo de 566.92 MPa en el orificio donde va alojado el bulón (Figura 6b), por lo que es necesario que se tomen acciones correctivas de diseño y selección de materiales para evitar deformaciones o en su caso, agrietamientos por fatiga.

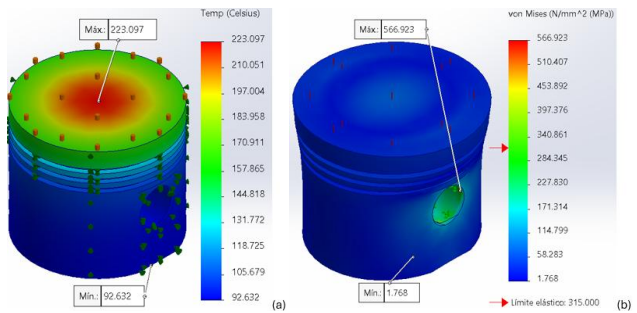


Figura 6. Estudios con el material Al 4032-T6 sobre el pistón a estudiar: a) Estudio térmico y b) Estudio estático. Fuente: Elaboración propia.

Con lo que respecta a la aleación de aluminio Al 2219-O, este presenta una temperatura máxima de 207.86°C y una temperatura mínima de 93.60°C, como se aprecia en la Figura 7a. Haciendo la comparativa entre el pistón original Al 4032-T6 respecto a Al 2219-O, su temperatura es menor en 15.22°C. Esto permite tener un menor riesgo de dilatación térmica y puede evitar la detonación

descontrolada en el cilindro, mejorando la vida útil del motor y la potencia de operación. Los resultados también revelan que el esfuerzo de von Mises para la aleación Al 2219-O es mayor que el obtenido con la aleación Al 4032-T6, lo que representa que, bajo las mismas condiciones de carga, este pistón puede presentar una demanda estructural significativamente mayor y dichos resultados se muestran en la Figura 7b.

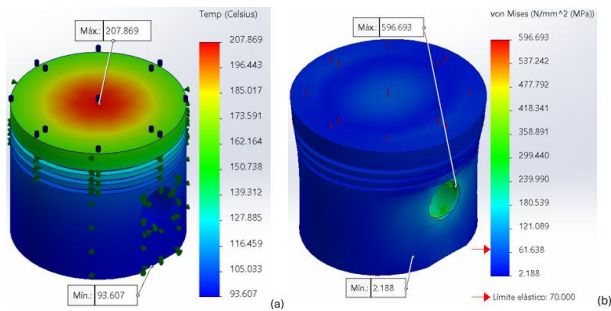


Figura 7. Estudios con el material Al 2219-O sobre el pistón a estudiar: a) Estudio térmico y b) Estudio estático. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8 se muestran los resultados térmicos y de esfuerzos relacionados a la aleación Al 6063-O. Los resultados muestran que esta aleación presenta una temperatura máxima en la superficie del pistón de 192.04°C y una temperatura mínima de 95.00°C en la falda del pistón (Figura 8a). Dicho material presenta una reducción en la temperatura superficial del pistón del 13.91% y 7.61% en comparación a los valores obtenidos con las aleaciones Al 4032-T6 y Al 2219-O, aunque la temperatura de la falda del pistón resultó ser mayor en 2.55% y 2.15%, respectivamente. Con lo que respecta a los esfuerzos de von Mises, el máximo valor fue de 610.33 MPa, mientras el mínimo valor corresponde a 2.37 MPa (Figura 8b). Esto indica que este material presenta mejores características estructurales que las aleaciones Al 4032-T6 y Al 2219-O bajo las mismas condiciones de operación.

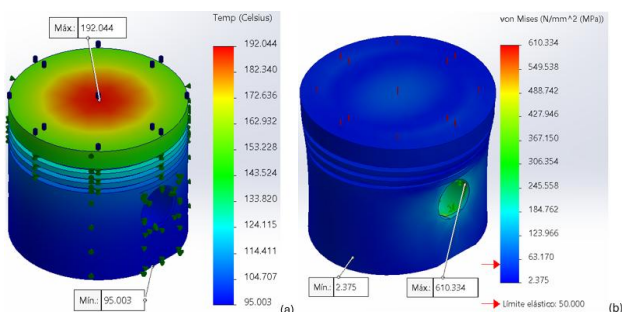


Figura 8. Estudios con el material Al 6063-O sobre el pistón a estudiar: a) Estudio térmico y b) Estudio estático. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 9 se muestran los perfiles térmicos y los esfuerzos relacionados a la aleación de aluminio Al 2618-T61. Dicha aleación presenta en la superficie del pistón una temperatura máxima de 218.79°C y una temperatura mínima en la falda de 92.87°C (Figura 9a), la cual es superior al mostrado por el de las aleaciones de aluminio Al 6063-O y Al 2219-O. Sin embargo, la temperatura superficial de la aleación Al 2618-T61 fue hasta 5°C menor en comparación con la temperatura superficial de la aleación Al 4032-T6. De igual manera, los esfuerzos que soporta el material fueron superiores a los obtenidos por las aleaciones Al 4032-T6 y Al 2219-O, aunque resultaron ser menores a los alcanzados con la aleación Al 6063-O. Por otra parte, los esfuerzos máximos que se obtienen con la aleación Al 2618-T61 (Figura 9b) son de 601.27 MPa, siendo estos superiores a los de las aleaciones Al 4032-T6 y Al 2219-O, pero menores a los obtenidos con la aleación Al 6063-O. Esto indica que bajo las mismas condiciones de carga, la aleación Al 2618-T61 puede soportar una mayor concentración de esfuerzos que las aleaciones Al 4032-T6 y Al 2219-O antes de fallar mecánicamente.

Con lo que respecta al material Al 2024, este presenta una máxima temperatura de 199.49°C en la superficie del pistón y una mínima temperatura de operación de 94.28°C en su falda (Figura 10a). Comparativamente, este pistón presenta una menor temperatura de operación respecto a los demás materiales. Comparado con la aleación Al 4032-T6, la temperatura en la superficie es menor en 23.6°C, mientras con las aleaciones Al 2219-O y Al 2618-T61, las reducciones fueron de 8.37°C y 19.3°C. También se observa que dicha temperatura fue 7.45°C mayor a la obtenida con la aleación Al 6063-O, reduciendo el riesgo de fallas por fatiga térmica. Con lo que respecta a los esfuerzos de von Mises, los valores fueron mayores en comparación con el de las demás aleaciones, por lo que se puede establecer que este material puede soportar las mayores cargas de operación, siendo este mejor desde el punto de vista de diseño, dichos resultados son mostrados en la Figura 10b.

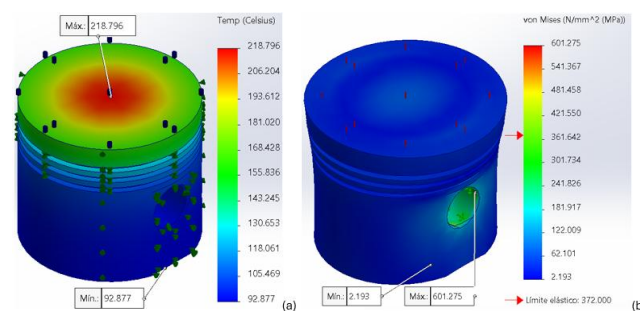


Figura 9. Estudios con el material Al 2618-T61: a) Estudio térmico y b) Estudio estático. Fuente: Elaboración propia.

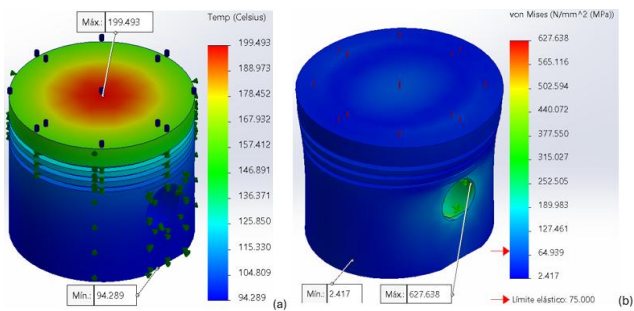


Figura 10. Estudios con el material Al 2024: a) Estudio térmico y b) Estudio estático. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se muestra una comparativa entre las temperaturas de operación para los distintos tipos de aleaciones de aluminio. Se logra apreciar que hay una gran diferencia de temperatura respecto de los 2 primeros pistones, entre el pistón de Al 6063-O y el pistón Al 4032-T6, la cual es de 31.05°C, mientras que entre el pistón de Al 6063-O y el pistón de Al 2219-O hay una diferencia de temperatura de 15.82°C. El pistón que mejor desempeño tiene para soportar el calor es el pistón fabricado con aleación de aluminio Al 6063-O, teniendo una temperatura menor respecto a los demás materiales.

Tabla 8: Resultados de temperatura en los diferentes tipos de aleaciones. Fuente: Elaboración propia.

Material	Temperatura máxima °C	Temperatura mínima °C
Al 6063-O	192.044	95.003
Al 2219-O	207.869	93.607
Al 4032-T6	223.097	92.632
Al 2618-T61	218.796	92.877
Al 2024	199.493	94.289

Como ya se mencionó anteriormente, se realizaron estudios de tensión (Von Mises) de cada pistón con su respectivo material, con la finalidad de conocer la máxima carga o presiones que pueden soportar. En la Tabla 7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos por los diferentes tipos de pistones. Como se observa, el material que presenta los mayores esfuerzos corresponde a la aleación Al 2024 con un valor de 627.63 MPA, seguido de la aleación Al 6063-O con un valor de 610.33 MPA, mientras los más bajos valores se obtienen con la aleación Al 4032-T6, cuyo valor es de 566.92 MPa. Con lo que respecta a las mínimas tensiones, estas se obtienen en la falda del pistón y también corresponden a la aleación de aluminio Al 4032-T6. Lo anterior se debe a que esta aleación presenta un alto índice elástico y a un menor coeficiente de expansión térmico, lo que permite resistir grandes cargas sin acumular deformaciones

plásticas que disparen los esfuerzos locales. Además, la aleación de aluminio Al 4032-T6 presenta una estructura cristalina que ayuda a retener la rigidez a altas temperaturas, manteniendo su módulo de elasticidad.

Tabla 7: Propiedades mecánicas, de esfuerzo y resistencia de los materiales. Fuente: Elaboración propia.

Material	Tensión máx. (MPa)	Tensión mín. (MPa)
Al 6063-O	610.334	2.375
Al 4032-T6	566.923	1.768
Al 2219-O	596.693	2.188
Al 2618-T61	601.275	2.193
Al 2024	627.638	2.417

Para ampliar el panorama del comportamiento térmico, diferentes condiciones de frontera fueron aplicados y determinar las mejores prestaciones térmicas que presenta el material base Al 4032-T6. Para tal efecto, se consideró un coeficiente de convección interior variando de 600 W/m² °C hasta 1000 W/m² °C con incrementos de 200 W/m² °C. Además, se analiza el efecto de la convección exterior y la potencia calorífica para cada uno de los casos.

Para el primer caso, se estableció que el coeficiente de convección interior y exterior es de 600 W/m² °C y 2330 W/m² °C, respectivamente, mientras la potencia calorífica fue considerada con un valor constante de 1467.8 W, dichos valores de muestran en la Tabla 9.

Tabla 9: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 600 W/m ² °C
Convección exterior	90°C, 2330 W/m ² °C
Potencia calorífica	1467.8 W

Los resultados muestran que la reducción en el coeficiente convectivo interior provoca un aumento en la distribución de temperatura en el pistón (Figura 11). Para este caso, la temperatura se incrementó en casi 5°C en comparación con el pistón operando a las condiciones base mostradas en la Tabla 1.

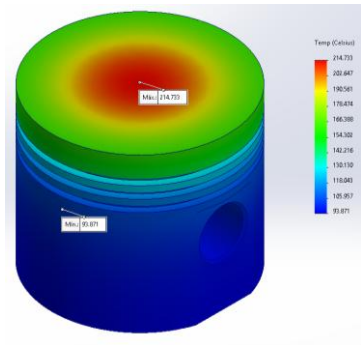


Figura 11. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo interno de 600 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Al incrementar el coeficiente de transferencia de calor interior a 800 W/m²°C, la temperatura se reduce en casi 1°C en comparación con las condiciones base, mientras que la diferencia es de aproximadamente 6°C con el sistema operando con un coeficiente convectivo interior de 600 W/m²°C, lo que muestra un efecto sustancial en la temperatura de operación del pistón con el aumento en el coeficiente convectivo interno. En la Figura 12 se muestra dicho comportamiento.

Tabla 10: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 800 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2330 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

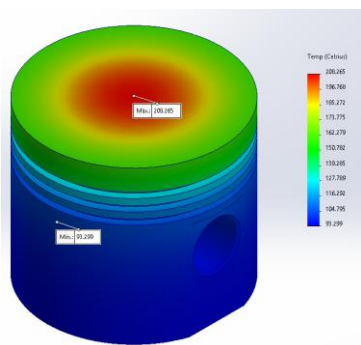


Figura 12. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo interno de 800 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Al reducir el coeficiente convectivo interno, la temperatura en la superficie del pistón tuvo una reducción de casi tres grados, comprobando que el aumento del coeficiente presenta una influencia significativa en dicha

temperatura. Una distribución del perfil térmico del pistón se muestra en la Figura 13.

Tabla 11: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 1000 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2330 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

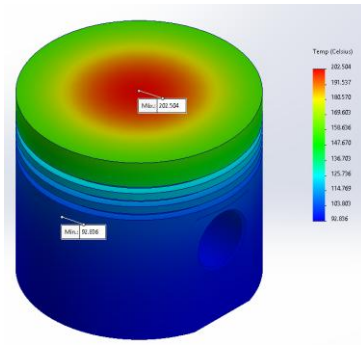


Figura 13. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo interno de 1000 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se realizan cambios en la convección exterior, es decir, cambiar el coeficiente de convección en la parte exterior del pistón que van desde los 1500 a 2500 W/m²°C. el incremento de este parámetro contribuye en un aumento en la temperatura de operación del pistón. Sin embargo, se puede apreciar que la convección interior del pistón disminuye su temperatura en comparación con el coeficiente exterior, por ende, es más adecuado aumentar el coeficiente de convección interior para lograr mejores condiciones de diseño en un MCI. Esto se debe al aumento de la velocidad de transferencia de calor hacia el medio ambiente, lo que desciende su temperatura interna y superficial del pistón.

En la Tabla 12 se presentan las principales condiciones de frontera que se aplicaron al pistón durante la simulación térmica. Donde se establece una convección interior de 750 W/m²°C con una temperatura de 90°C, el valor del coeficiente exterior se estableció de 1500 W/m²°C y una potencia calorífica de 1467.8 W.

Tabla 12: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 1500 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

Para la Figura 14, se visualiza la distribución de temperatura obtenida mediante el análisis térmico del pistón. Así mismo, se observa una concentración mayor de temperatura en la parte superior del modelo, evidenciando así la transferencia de calor a través del material hacia la superficie con mayor enfriamiento. La temperatura es de 222.36°C, la cual es casi 8°C mayor en comparación con las condiciones base.

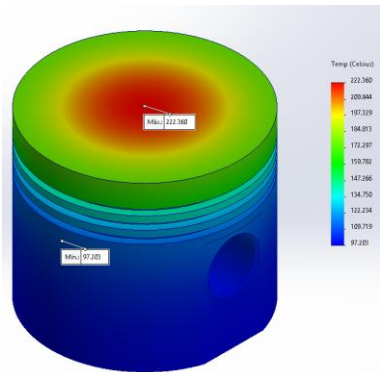


Figura 14. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo externo de 1500 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la Tabla 13 se indica un incremento del coeficiente de convección exterior hasta los 1700 W/m² °C, el cual mantiene constantes al coeficiente convectivo interior y a la potencia calorífica aplicada, donde se analiza el efecto del aumento de transferencia de calor entre la superficie externa del pistón y el medio de enfriamiento.

Tabla 13: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 1700 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

En la Figura 15, se alcanza a observar la distribución térmica, la cual es similar al de la Figura anterior, sin embargo, el aumento de la convección exterior permite

una óptima evacuación del calor que se encuentra acumulado en el pistón. La zona de máxima temperatura se sigue obteniendo en la cabeza del pistón, sin embargo, existe una reducción gradual en la temperatura general debido a una mayor capacidad de disipación térmica hacia el exterior.

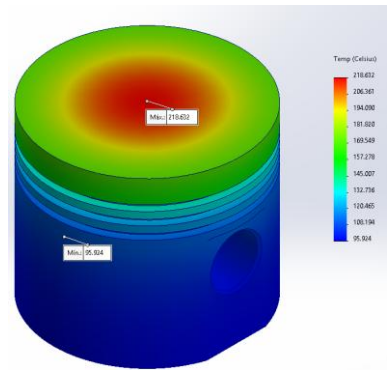


Figura 15. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo externo de 1700 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 14, se presenta la variación del coeficiente de convección exterior a una cifra de 1900 W/m²°C bajo las mismas condiciones de convección interna y una potencia calorífica de 1467.8 W. La modificación realizada permite identificar el comportamiento térmico del pistón en el momento que incrementa la transferencia de calor superficial.

Tabla 14: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 1900 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

En la Figura 16, se muestra el comportamiento de la temperatura bajo estas condiciones. Se aprecia como las temperaturas más altas continúan concentrándose principalmente en la corona del pistón, mientras que en las paredes laterales presentan menores valores térmicos. Para este caso, la temperatura se redujo en casi 3°C en comparación con el sistema a un coeficiente convectivo exterior de 1700 W/m²°C y en aproximadamente 7°C, en comparación con un coeficiente convectivo de 1500 W/m²°C.

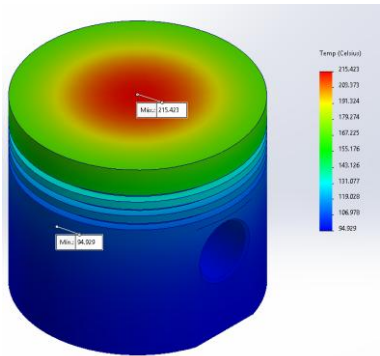


Figura 16. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo externo de 1900 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Para los valores de la Tabla 15, se considera el aumento del coeficiente de convección exterior hasta 2100 W/m²°C y los demás parámetros se mantienen como constantes.

Tabla 15: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2100 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

Para el análisis térmico del modelo del pistón de la Figura 17, se muestra que en el momento de incrementar la transferencia de calor por convección exterior provoca una reducción en la temperatura promedio del pistón. En la simulación se observa que en la zona superior del pistón continúa siendo la más afectada térmicamente debido a la exposición directa al flujo de calor, mientras tanto que en las zonas inferiores permanecen con temperaturas menores, favoreciendo una estabilidad térmica del pistón durante su funcionamiento.

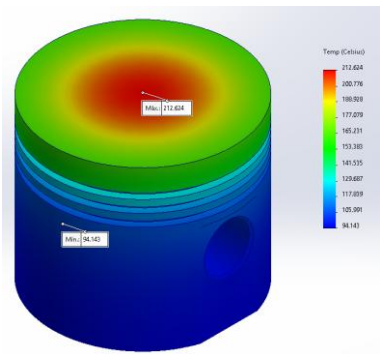


Figura 17. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo externo de 2100 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Los valores de la Tabla 16, establece un coeficiente de convección exterior de 2300 W/m²°C en el cual evalúa una condición de mayor disipación térmica sin que se logre modificar la potencia calorífica suministrada.

Tabla 16: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2300 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

Para los resultados del análisis térmico, en la Figura 18 se observa una reducción más notable de la temperatura en comparativa con las simulaciones estudiadas anteriormente, esto nos demuestra que el aumento del coeficiente de convección exterior favorece la extracción del calor almacenado en el pistón, el cual permite disminuir los esfuerzos térmicos que llegarían a afectar la vida útil del pistón.

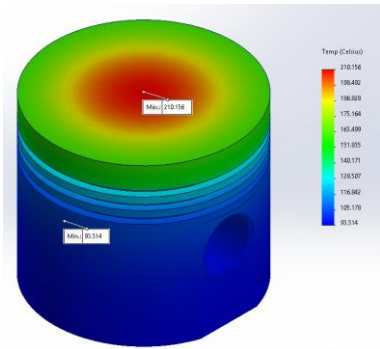


Figura 18. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo externo de 2300 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla 17 se presenta la última variación del coeficiente de convección exterior, donde se analiza un valor de 2500 W/m²°C. Esta condición representa la condición de mayor capacidad de transferencia térmica hacia el exterior del pistón.

Tabla 17: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón. Fuente: Elaboración propia.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2500 W/m²°C
Potencia calorífica	1467.8 W

En la simulación térmica realizada, se puede visualizar en la Figura 19, el incremento del coeficiente de convección mejora el proceso de enfriamiento del componente, en el

cual se reduce la concentración térmica en determinadas zonas. Se puede visualizar que en la cabeza del pistón mantiene la temperatura más alta debido a la combustión que se genera, el gradiente térmico obtenido muestra una disipación más eficiente del calor hacia el resto de la geometría.

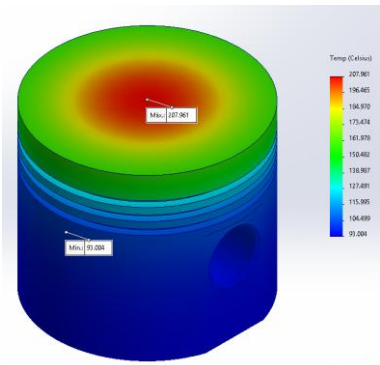


Figura 19. Comportamiento térmico a un coeficiente convectivo externo de 2500 W/m²°C. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la potencia calorífica es otro parámetro que afecta las condiciones de operación del pistón en un MCI. Para tal efecto, el coeficiente de potencia calorífica varió durante el análisis a valores entre 1200 W a 1600 W. Para dicha simulación se consideraron los valores mostrados en la Tabla 18.

Tabla 18. Condiciones de frontera aplicadas en el pistón.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2330 W/m²°C
Potencia calorífica	1200 W

En la Figura 20 se observa una menor concentración de temperatura en comparación con las condiciones de mayor potencia, esto es debido a que existe una menor energía térmica aplicada donde se reduce la acumulación de calor dentro del material, y así favorece un comportamiento térmico más estable.

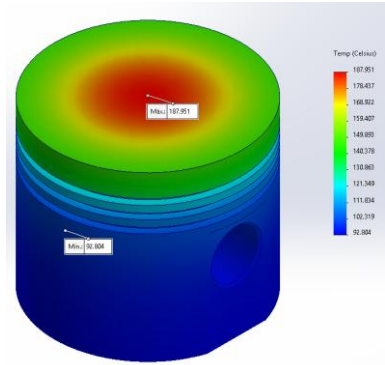


Figura 20. Comportamiento térmico a una potencia calorífica de 1200W. Fuente: Elaboración propia.

Para los valores de la Tabla 19 se analiza el incremento de la potencia calorífica aplicada hasta un valor de 1400 W, conservando así los mismos valores de los coeficientes de convección interior y exterior. Esta variación permite evaluar cómo afecta el aumento de energía térmica generada durante el proceso de combustión.

Tabla 19: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m²°C
Convección exterior	90°C, 2330 W/m²°C
Potencia calorífica	1400 W

En la simulación térmica de la Figura 21 se evidencia un aumento en la temperatura máxima del pistón, principalmente en la superficie superior. Este incremento de potencia provoca una mayor concentración de energía térmica, aumentando el gradiente de temperatura entre la cabeza y las paredes inferiores del pistón, cuyos valores fueron de 204.27°C y 93.27°C, respectivamente. El aumento de temperatura con el incremento de la potencia calorífica puede generar una aceleración en la dilatación del metal, reduciendo la resistencia mecánica y elevar el riesgo de daños graves si el sistema no disipa el calor de forma efectiva. Comparado con la potencia calorífica de 1200 W, la temperatura fue menor en 16.32°C en comparación con el sistema operando a una potencia calorífica de 1400 W. Lo anterior se debe a que al subir la potencia calórica ingresa más energía térmica a la cámara de combustión, la cual se transfiere directamente a los materiales del motor debido a una mayor transferencia de calor por convección.

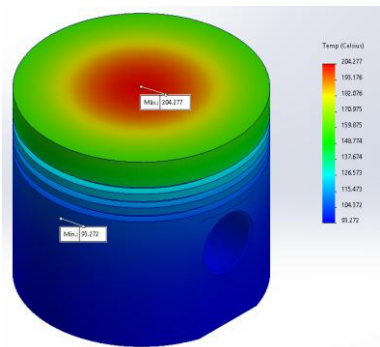


Figura 21. Comportamiento térmico a una potencia calorífica de 1400W. Fuente: Elaboración propia.

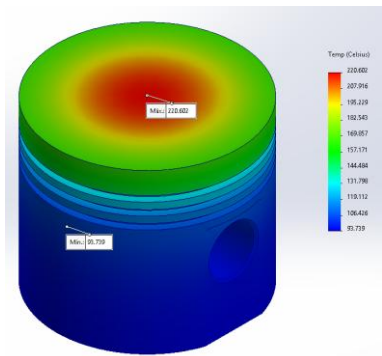


Figura 22. Comportamiento térmico a una potencia calorífica de 1600W. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 20 se muestran las condiciones de frontera empleadas para la simulación del pistón considerando una potencia calorífica máxima de 1600 W. Este escenario representa la condición de mayor exigencia térmica para el pistón.

Tabla 20: Condiciones de frontera aplicadas en el pistón.

Condición de frontera	Valores
Convección interior	90°C, 750 W/m ² °C
Convección exterior	90°C, 2330 W/m ² °C
Potencia calorífica	1600 W

La simulación realizada de la Figura 22 se muestra un incremento considerable en la temperatura en la parte superior del pistón. Esto se debe al aumento de energía aplicada, estos resultados indican que al momento de elevar la potencia calorífica llega a generar mayores concentraciones térmicas, lo que podría generar mayores esfuerzos térmicos y afectaciones al material. Para este caso, la máxima temperatura que alcanza el pistón fue de 220°C, lo que representa un aumento de 16.33°C en comparación con el sistema operando a una potencia calorífica de 1400W. Sin embargo, al comparar los resultados con los de las potencias térmicas de 1200W, la temperatura fue mayor hasta 32.78°C, lo que comprueba el efecto de la potencia calorífica en el sistema.

Conclusiones

Se realizó un estudio térmico de un pistón en el software de SolidWorks que consiste en estudiar los diferentes comportamientos térmicos y de tensión con la finalidad de comprender que material es más eficiente de usar en un MCI, así como conocer las diferentes propiedades tanto físicas como mecánicas, los materiales estudiados son Al 6063-O, Al 2219-O, Al 4032-T6, Al 2024 y Al 2618-T61 llegando a la conclusión de que el material Al 6063-O es el material más adecuado para su utilización en un pistón de motor de combustión interna debido a una menor temperatura de operación y un adecuado valor en los esfuerzos de von Mises. Cuando se aplica una potencia calorífica en la cámara de combustión de 1467.8 W, un coeficiente convectivo interior y exterior de 750 W/m²°C y 2330 W/m²°C, así como una temperatura de operación de 90°C, la aleación de aluminio Al 6063-O presenta la menor temperatura en la superficie del pistón (192.04°C), mientras el Al 4032-T6 fue el material con la mayor temperatura superficial (223.09°C). Sin embargo, los esfuerzos de von Mises del aluminio Al-6063-0 son mayores a los obtenidos con las otras aleaciones, lo que garantiza en una buena resistencia mecánica.

El incremento en el coeficiente convectivo interior provoca una reducción en la temperatura superficial del pistón, mientras lo contrario ocurre con el incremento del coeficiente convectivo externo. Finalmente, la potencia calorífica es un parámetro que contribuye en el incremento de la temperatura de operación de pistón, lo que puede originar un mayor estrés térmico en el material, lo que puede originar grietas durante un tiempo de operación, reduciendo drásticamente la potencia y la vida útil del motor.

Como trabajos futuros, se tiene considerado evaluar el efecto de barrera térmica sobre el comportamiento térmico del pistón, así como el análisis de materiales compuestos que ayuden a reducir la temperatura en la

superficie y faldas del motor, lo cual ayude a reducir la transferencia de calor en la cámara de combustión hacia el cuerpo de la pieza y mejorando con esto la eficiencia general del motor.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo de investigación.

Referencias

- Cabrera-Erazo, M. F. (2019). Utilidad de un pistón estándar y un forjado en un Chevrolet Aveo 1.4 cc. 2008. <https://www.academia.edu/download/105864407/Dialnet-UtilidadDeUnPistonEstandarYUnForjadoEnUnChevroletA-7183623.pdf>
- CAMARGO, E. S. (2010). Calculo y diseño de un pistón de aluminio (Doctoral dissertation, INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL). https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/8531/2741_tesis_Febrero_2011_1469520370.pdf?sequence=1
- Calzetta E. (2024) Temas avanzados de termodinámica, (43-44), EUDEBA. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=BmIdEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=Temas+avanzados+de+termodin%C3%A1mica,+&ots=XOW-LWmN-8&sig=blI9-DDMixV4bgnhP8W2FJo3Qqk>
- Czerepak, M. y Piątkowski, J. (2023). Fundición de pistones de motores de combustión antes y ahora en el ejemplo de FM Gorzyce. Archivos de Ingeniería de Fundición, 23(2). <https://bibliotekanauki.pl/articles/27314155.pdf>
- Misra, S., & Agrawal, A. (2018, May). Design and analysis of piston by Al-GHS 1300, Al-GHY 1250, Al-Si-C, A6061 and A4032 composite material: A review. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1953, No. 1, p. 130004). AIP Publishing LLC.
- Montes, H. C. G. (2023) OPTIMIZACIÓN TOPOLOGICA, SIMULACIÓN Y PROTOTIPADO 3D DE UN PISTÓN AUTOMOVILÍSTICO. ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GUJÓN. https://www.catedracogersa.com/wp-content/uploads/2023/12/2023-Memoria-TFG-Hugo_Granda.pdf
- Sai, M. L., Deepak, A., Gnaneswar, V., Sunil, T., & Tharun, N. (2024). DESIGN AND ANALYSIS OF A PISTON USING VARIOUS ALLOY MATERIALS. https://indusedu.org/pdfs/IJREISS/IJREISS_4303_91002.pdf
- Soriano, A., & Antonio, J. (2016). Pistón, biela, cigüeñal y distribución en los motores. <https://core.ac.uk/download/pdf/235858378.pdf>
- Tenango-Pirin, O. (2020). Análisis termoestructural de un pistón de motor de combustión interna con recubrimiento térmico. Instituto de Ingeniería y Tecnología. <https://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/15153>
- Yugcha, L. J. T., & Lema, E. J. Q. (2025). Comparación de pistón original y genérico en fabricación. Caso de estudio: Cummins N14 430 HP. Conectividad, 6(1). <https://revista.ister.edu.ec/ojs/index.php/ISTER/article/view/224>
- Yenmak engine parts (abril de 2024). Pistones de Aluminio pistones de aluminio | Yenmak Engine Parts - Motor Parçaları