



Artículo de Investigación

# Diferencias en la fabricación de pistones para vehículos motorizados de alta y baja gama

Differences in the manufacture of pistons  
for high and low gamma motorized vehicles

## RESUMEN

La industria automotriz en la constante búsqueda de mejorar los componentes de los motores tiene la necesidad de producir pistones que mediante el diseño y uso de tecnología optimicen el desempeño del vehículo. El presente trabajo analiza el material de fabricación de pistones de vehículos de alta y baja gama buscando diferenciar la manufactura y el tipo de aleación utilizada en pistones según las prestaciones de cada vehículo. Se evaluó la composición química de ambos pistones mediante espectrometría de emisión óptica obteniendo que ambos fueron desarrollados en base a aleaciones Al-Si, diferenciándose en la cantidad de elementos aleantes y con un análisis metalográfico se obtuvo una diferencia más notoria en la microestructura de cada pieza.

**Palabras clave:** Pistón; Industria automotriz; Microestructura; Aluminio-silicio.

## ABSTRACT

The automotive industry, in the constant search to improve engine components, has the need to produce pistons that, through the design and use of technology, optimize vehicle performance. This paper analyzes the piston manufacturing material for high-end and low-end vehicles seeking to differentiate the manufacturing and type of alloy used in pistons according to the performance of each vehicle. The chemical composition of both pistons was evaluated by optical emission spectrometry, obtaining that both were developed based on Al-Si alloys, differing in the amount of alloying elements and with a metallographic analysis, a more notorious difference was obtained in the microstructure of each piece.

**Keywords:** Piston; Automotive industry; Microstructure; Aluminum-silicon.

## Autor de Correspondencia

**Emilia Delgado González**

emilia.delgado@usach.cl

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 20 de octubre, 2023

Artículo Aceptado: 22 de noviembre, 2023

Artículo Publicado: 17 de mayo, 2024



## Introducción

El pistón es la pieza encargada de comprimir la mezcla de combustible y aire dentro del cilindro, esto produce junto a la chispa de la bujía la reacción de combustión. Lo que provoca gases que impulsan el pistón de forma vertical dentro del cilindro, este movimiento repetitivo es recibido por la biela para ser transmitido al cigüeñal del motor, dando así inicio al funcionamiento del vehículo.

Esta pieza se divide en tres secciones: la cabeza, canales para el anillo de compresión y aceite y finalmente, el faldón. Cada sección soporta distintas temperaturas y esfuerzos según su función, es por esto por lo que el material del que se fabrica el componente toma relevancia al momento de planear la manufactura. Iniciando con consideraciones para el funcionamiento, los requisitos varían según el fabricante pero se tiene que por su funcionalidad y tipo de trabajo deben todos por lo menos cumplir con, por ejemplo, no cambiar sus dimensiones dentro del espacio de funcionamiento, es decir, no debe dilatarse ni contraerse, debe soportar las distintas temperaturas a las que está expuesto por lo que el material debe ser un conductor térmico que sea apto para las variaciones de temperatura, el material debe tener un punto de fusión mayor a la temperatura, entre otros.

Si bien durante la historia se han fabricado pistones de distintos materiales los más comunes son de acero, aluminio-cobre, aluminio-cobre-níquel-hierro y aluminio-silicio, especialmente se considera la última aleación nombrada por las propiedades mecánicas intrínsecas del material, como la buena relación resistencia-peso, el comportamiento a altas temperaturas, resistencia a la fatiga, buena resistencia al desgaste y finalmente, el bajo coeficiente de expansión térmica. Lo que provoca que la aleación aluminio-silicio sea ampliamente utilizada en la industria automotriz (Hernández *et al.*, 2015; Xia *et al.*, 2020).

Para el análisis de cada pistón se inició, con la hipótesis de que serían distintos debido a las diferencias físicas de los motores y vehículos a los que pertenecen, es por ellos que se realizan los cortes y estudios

en las mismas zonas físicas dentro de las dimensiones de cada pistón. Lo que nos permitió diferenciar la manufactura y la aleación, esto mediante ensayos químicos realizados con espectrometría de emisión óptica, microscopía electrónica de barrido, ensayos de dureza Vickers y análisis metalográfico.

### Procedimiento experimental

Los pistones estudiados corresponden a dos vehículos motorizados de distintas marcas y cilindrajes, nombrando como de alta gama, modelo 1, al pistón del vehículo con mayor cilindraje 2000 cc y de baja gama, correspondiente al modelo 2 de 150 cc.



Figura N° 1. Pistón vehículo motorizado alta gama, modelo 1.



Figura N° 2. Pistón vehículo motorizado baja gama, modelo 2.

Ambos pistones son cortados para ser analizados metalográficamente en la sección de la cabeza incluyendo los canales de los anillos, además, se efectúa un corte extra de la cabeza para ser analizado mediante espectrometría de emisión óptica.

La preparación de cada muestra se inicia desde la selección del área a cortar, donde se busca obtener una superficie representativa tanto para el análisis metalográfico como para realizar mediciones de dureza, en este caso Vickers (HV). Además, esta misma muestra es utilizada para efectuar el análisis mediante microscopía electrónica de barrido.

De esta forma los cortes se realizan ubicando de forma vertical el pistón con el fin de que el disco de la maquina cortadora atraviese la pieza paralela al eje y, que corresponde a la altura de cada pistón, esto para la obtención del área mencionada que abarca tanto cabeza como canales.

El montaje de los fragmentos se realiza utilizando baquelita negra no protectora de bordes en la máquina de montaje en caliente. Las muestras cortadas, Figura N° 3 y Figura N° 4, son colocadas de forma que una mayor superficie quede visible esto con el fin de tener mayor amplitud en cuanto al análisis metalográfico y, además, obtener mediciones de dureza tanto horizontalmente desde los canales hacia el centro como verticalmente desde la superficie hacia interior para realizar un promedio representativo de la dureza del material en cada pistón.



Figura N° 5. Muestra montada del pistón perteneciente al modelo 1.



Figura N° 3. Sección cortada del pistón perteneciente al modelo 1.

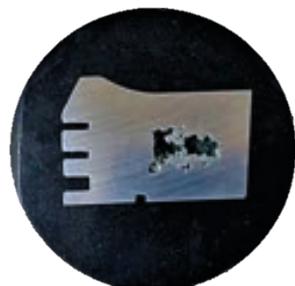


Figura N° 6. Muestra montada del pistón perteneciente al modelo 2.



Figura N° 4. Sección cortada del pistón perteneciente al modelo 2.

El análisis de composición química se realiza mediante espectrometría de emisión óptica realizado por el laboratorio SIMET-USACH, con la muestra cortada de la superficie de cada pistón. Para el área del pistón del modelo 1, se realiza un análisis en el inserto hallado por el método de microscopía electrónica de barrido para reconocer el material y obtener imágenes que permitan su clasificación, esto utilizando la muestra montada, Figura N° 5.

## Resultado y discusión

La composición química en cada caso corresponde a aleaciones en base a aluminio, el elemento aleante principal es silicio, dando, así como aleación principal

para la fabricación de ambos Al-Si con contenido de cobre, lo que diferencia a cada pistón es el porcentaje de elemento aleante añadido en la colada de cada aleación.

<b>% Si</b>	<b>% Fe</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Mn</b>
8,64	0,47	3,83	0,093
<b>% Mg</b>	<b>% Cr</b>	<b>% Ni</b>	<b>% Zn</b>
0,9	0,015	0,465	0,125
<b>% Ti</b>	<b>% Ag</b>	<b>% Ga</b>	<b>% Pb</b>
0,089	< 0,0001	0,014	0,011
<b>% Sn</b>	<b>% Na</b>	<b>% V</b>	<b>% Al</b>
0,004	< 0,0001	0,083	85,3

Tabla N° 1. Composición química obtenida por espectrometría de emisión óptica para el pistón del modelo 1.

<b>% Si</b>	<b>% Fe</b>	<b>% Cu</b>	<b>% Mn</b>
8,62	0,328	1,11	0,373
<b>% Mg</b>	<b>% Cr</b>	<b>% Ni</b>	<b>% Zn</b>
0,72	0,0093	0,01	0,118
<b>% Ti</b>	<b>% Ag</b>	<b>% Ga</b>	<b>% Pb</b>
0,023	< 0,0001	0,016	0,0017
<b>% Sn</b>	<b>% Na</b>	<b>% V</b>	<b>% Al</b>
0,0034	0,008	0,013	88,7

Tabla N° 2. Composición química obtenida por espectrometría de emisión óptica para el pistón del modelo 2.

En ambos casos, Tabla N° 1 y Tabla N° 2, el principal aleante es el silicio, que aporta con un mejoramiento en las propiedades de colada como lo es la fluidez del metal líquido y la resistencia al agrietamiento en caliente. Además, este elemento aporta con una disminución en el coeficiente de expansión térmica. El segundo elemento aleante que predomina es el cobre diferenciándose notablemente en la cantidad dentro de la aleación, para el modelo 1 la cantidad es de 3.83% mientras que la aleación del modelo 2 sólo tiene un 1.11%, este elemento aporta a las aleaciones un aumento en la resistencia a la tracción y micro-dureza de las aleaciones Al-Si-Cu, es más, la adición de Mg a esta aleación aumenta aún más la resistencia a la tracción, debido a la precipitación de segundas fases relacionadas con Magnesio (Mg). El Mg

tiene valores similares en ambos casos, siendo para el vehículo de alta gama de 0.9% y el de menor, 0.72%, la principal función de este elemento aleante dentro de las aleaciones aluminio-silicio es contribuir con un aumento en la dureza y resistencia especialmente en las aleadas con elementos como níquel y cobre, la fase que proporciona la dureza corresponde a  $Mg_2Si$  y tiene una alta solubilidad con valores de hasta 0.7%Mg. Siguiendo con el análisis de los elementos, existe una diferencia en el valor del manganeso, Mn, entre ellos la discrepancia podría existir en los precipitados intermetálicos que se formen o ser considerado como una impureza en la colada en la colada (Totten y Mackenzie, 2003; Echavarriá y Orrego, 2012; Zhao et al., 2023). El análisis metalográfico, permite observar que las muestras estudiadas corres-

ponden a una aleación aluminio-silicio de base con una estructura típica dendrítica. En la Figura N° 7, donde se presenta la microestructura obtenida desde la muestra del pistón perteneciente al modelo 1 se observa a 200X, una base de  $\alpha$ -Al, poliedros irregulares de silicio primario (en rojo) y estructura interdendrítica de silicio precipitado durante la solidificación, si bien no presenta una estructura dendrítica típica se puede ver la pre existencia de ésta, formando algunas placas irregulares de silicio (en blanco), se puede suponer entonces la existencia de un tratamiento térmicos que provocara la poca presencia de dendritas visualmente claras, teniendo además presencia de intermetálicos en colores más claros que el silicio eutéctico y primario formado. Luego, en la Figura N° 8 se aprecia a 500X de mejor manera los poliedros de silicio primario, y se logra diferenciar

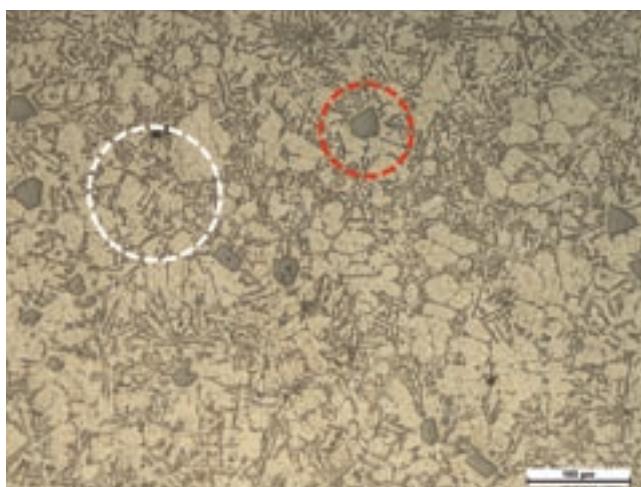


Figura N° 7. metalografía a 200X del pistón perteneciente al modelo 1.

estructuras en forma de placas de tonalidad más clara, presumiblemente el microconstituyente  $\text{Al}_2\text{Cu}$  por su forma acicular irregulares o semi redondeada que posterior al ataque quedan delineadas y con una tonalidad más oscura que la base (en verde). De igual forma no se descarta la presencia otros microconstituyentes o intermetálicos como  $\text{Al}_3\text{CuNi}$ , debido a la gran cantidad de elementos aleantes de la aleación. Además, se debe considerar que los intermetálicos como  $\text{Al}_3\text{CuNi}$  o  $\text{Al}_7\text{Cu}_4\text{Ni}$  son algunas de las fases responsables del refuerzo de las aleaciones aluminio-silicio frente a las altas temperaturas, especialmente en el desempeño de, por ejemplo, pistones. pistones (Marin, 2019; Xia et al., 2020).

Las metalografías correspondientes al modelo 2 tienen una estructura dendrítica más clara y formada, diferenciándose de la posible estructura de la Figura N° 7.

En la Figura N° 9 a 200X se puede apreciar de mejor manera la mezcla de fase eutéctica y de menor manera poliedros de silicio primario. Así, el silicio que precipita interdendríticamente da forma a la estructura dendrítica mientras que de igual forma al modelo 1, la base continúa siendo  $\alpha$ -Al con algunos poliedros irregulares de silicio primario formado en la solidificación (en blanco).

La Figura N° 10, a 500X, muestra de forma clara la red formada por el silicio eutéctico precipitado en la solidificación (en rojo), también hay presencia de estructura de placas con tonalidades más claras posiblemente microconstituyentes o intermetálicos formados en la solidificación de igual forma que para el modelo 1 (Marin, 2019).

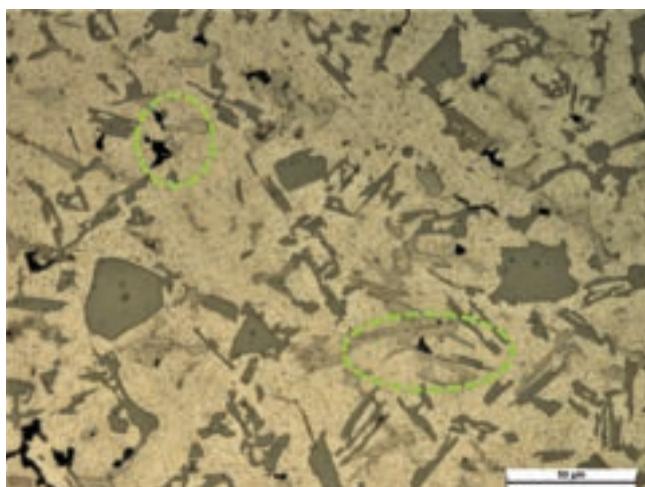


Figura N° 8. metalografía a 500X del pistón perteneciente al modelo 1.

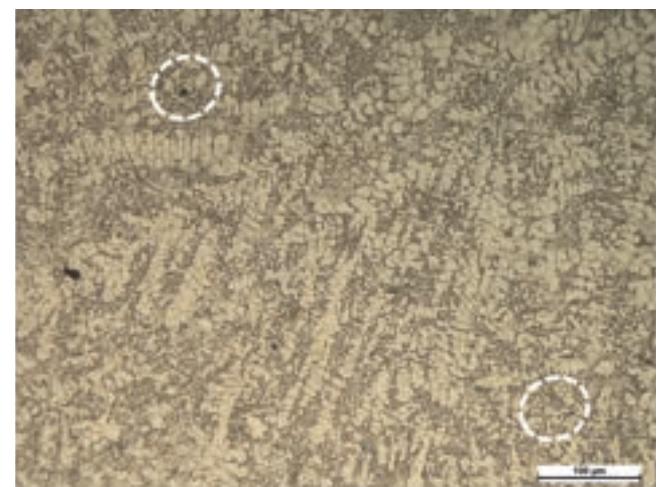


Figura N° 9. metalografía a 200X del pistón perteneciente al modelo 2.

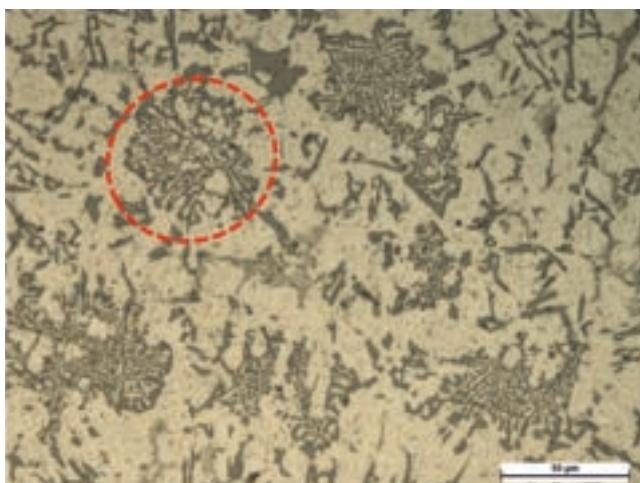


Figura N° 10. metalografía a 500X del pistón perteneciente al modelo 2.

Al realizar la medición de dureza Vickers con carga de 0.3 kg. Se obtiene en ambos casos, tanto para el modelo 1 y modelo 2 que las durezas están dentro del rango de 150 HV 0.3 a 170 HV 0.3, aproximadamente. Y en un promedio general para el modelo 1 se obtiene un valor de 154 HV 0.3, mientras que para el modelo 2 de 161 HV 0.3, estos valores aunque esperables por el tipo de material se diferencian en el tipo de manufactura realizada, ya que, es suponible que el pistón correspondiente al modelo 2 a tiene un enfriamiento lento debido a la mayor cantidad de

estructura dendrítica su dureza es levemente mayor, en comparación a la estructura de placas de silicio eutéctico que presenta la muestra del modelo 1.

Al realizar un estudio mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (SEM) para identificar microconstituyentes y analizar el inserto encontrado en la inspección visual inicial del modelo 1 se obtiene que, Figura N° 12, se presentan distintos puntos analizados a 500X de donde los que cobran mayor importancia indican que los microconstituyentes presentes en el material están formados por Al-Fe-Ni (Figura N° 14) y Al-Cu (Figura N° 15). Correspondiente con lo dicho con anterioridad, estos intermetálicos entonces son los que aportan con dureza a los pistones y colaboran reforzando la resistencia a altas temperaturas en el desempeño de su funcionamiento dentro del motor. Por otro lado, el análisis a la unión entre inserto y material del pistón (Figura N° 13) es certero en indicar que corresponde a Al-Fe, descartando así una posible soldadura por lo que la fundición laminar, presuntamente fue agregada al molde previo a la colada, uniéndose de esta forma al componente del modelo 1.

De igual forma la dureza del inserto correspondiente a fundición laminar presente en el modelo 1, tienen durezas similares dando cuenta que no se agrega para entregar una mayor dureza, sino que implica la calidad del grafito para auto lubricarse, ya que está ubicado en el canal que corresponde al anillo de compresión superior La fundición laminar existente

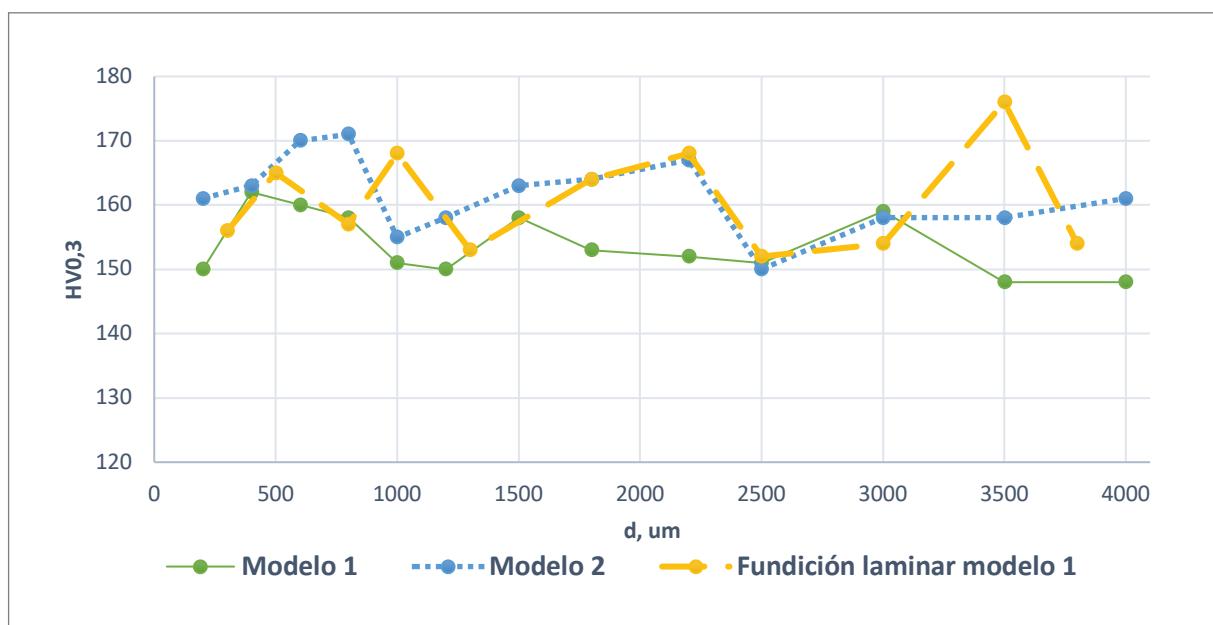


Figura N° 11. Gráfica comparativa de dureza Vickers con carga de 0.3 kg para ambos modelos.

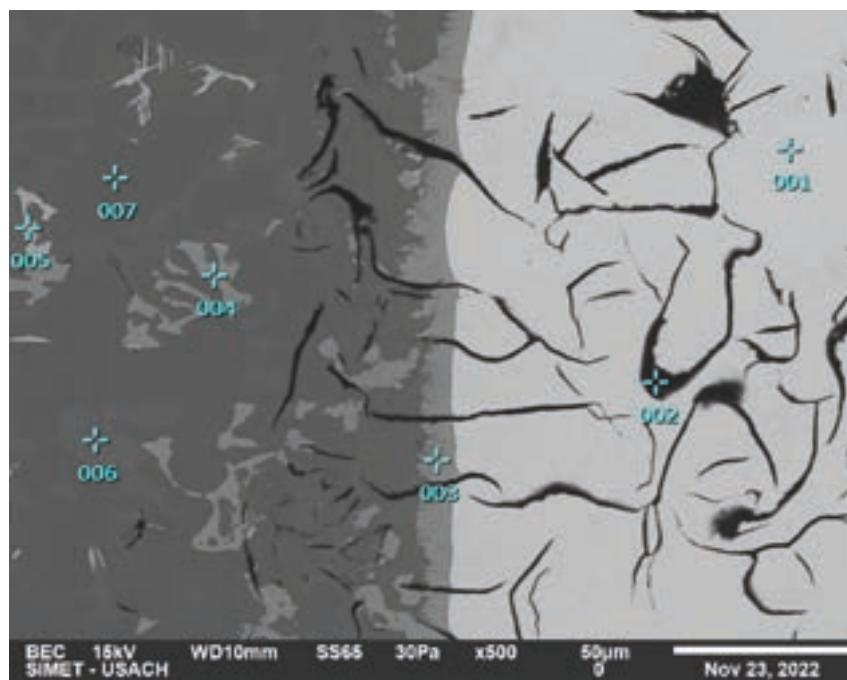


Figura N° 12. Imagen obtenida por microscopía electrónica de barrio a la muestra perteneciente al modelo 1.

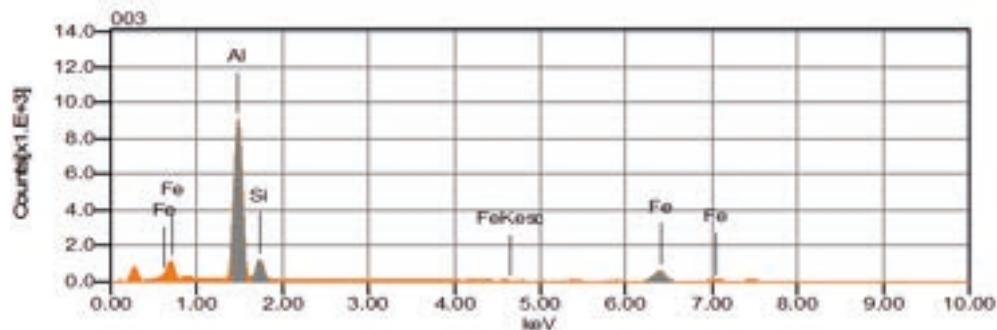


Figura N° 13. Resultados SEM punto 003 muestra perteneciente al modelo 1.

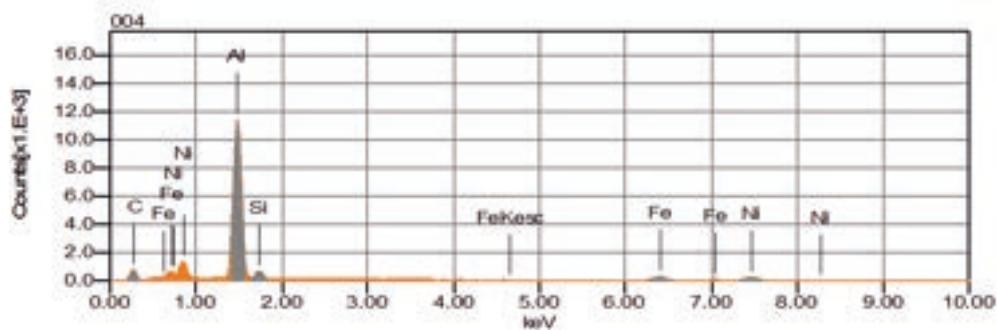


Figura N° 14. Resultados SEM punto 004 muestra perteneciente al modelo 1.

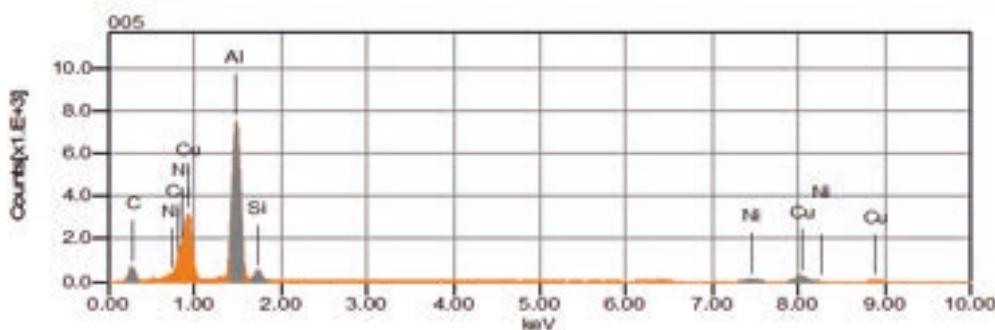


Figura N° 15. Resultados SEM punto 005 muestra perteneciente al modelo 1.

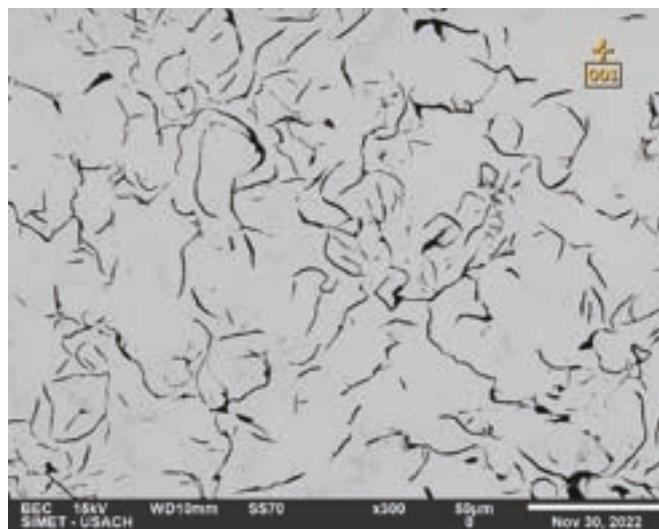


Figura N° 16. Resultados SEM para la función laminar de la muestra perteneciente al modelo 1.

en el pistón, Figura N° 16, se categorizó visualmente según la norma ASTM A247-19, obteniéndose que corresponde a grafito tipo VII, con distribución del tipo Ay clase de tamaño 5 (ASTM International, 2024).

Al realizar mediciones de dureza Vickers, Figura N° 11, en el inserto con el fin de comparar la dureza del material base del pistón, se obtiene que la dureza de la fundición en promedio es de 161 HV0.3, esto en contraste a la dureza obtenida de la aleación Al-Si que tiene un valor de 154 HV0.3. Al relacionarlo con la posición que ocupa en los canales, al ser el anillo de compresión ubicado en la parte superior se puede suponer que es utilizado debido a la característica auto lubricante del grafito, por lo que mejora la resistencia al desgaste del primer anillo de la cabeza del pistón, además que este tipo de material no suele presentar deformaciones previas a la fractura, sino

que tiene una fractura del tipo frágil lo que indica que no es un material tenaz y que al tener una gran resistencia, tiende a absorber energía en el rango elástico previo a su fractura catastrófica.catastrófica (Fernández-Carrasquilla y Ríos, 1999).

### Conclusiones

Si bien el material base de la aleación es en ambos casos aluminio-silicio, se pueden reconocer diferencias en los elementos aleantes microestructura y de menor manera en la dureza Vickers.

El pistón desarrollado para el modelo 1 tiene mayor cantidad de ciertos elementos aleantes como el cobre que busca mejorar su resistencia, y la precipitación de intermetálicos que aportan en diversas propiedades, además en las metalografías se aprecian di-

ferencia en la estructura de solidificación y microconstituyentes que cooperan en su gran parte de forma favorable al pistón, la manufactura se diferencia por ejemplo, en el inserto que posee, al agregarlo en esa posición y al además ser de fundición laminar se busca dar un apoyo extra al anillo de compresión, lo que ayuda a suportar los esfuerzos de mejor manera aportando tiempo de uso.

Esto en comparación al modelo 2, que luego de la inspección visual inicial se percibe un gran rechape en su interior y ningún material extra que busque apoyar y mejorar el funcionamiento, y una microestructura de colada esperable para una aleación aluminio-silicio.

## Referencias

Echavarria A, Orrego G. 2012. Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas. Revista Colombiana de Metalurgia 2.  
<https://doi.org/10.17533/udea.rcm.11281>

ASTM International. 2024. ASTM A247-19 Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings. <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CA0247-19%7Cen-US>

Fernández-Carrasquilla J, Ríos R. 1999. Estudio de una fundición de grafito laminar mediante mecánica de la fractura. Rev Metal Madrid 35.

Hernández V, Cruz R, Otero E, Harris I, Osiel C, Aguilar C, Vázquez N, Aguilar O, Alfaro M, Zuno-Silva J, López-Moreno S. 2015. Consideraciones en el diseño de pistones para motores a cuatro tiempos. Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún 2(3).  
<https://doi.org/10.29057/ess.v2i3.1369>

Marin J. 2019. Identificación de microconstituyentes en aleaciones de aluminio mediante metalografía óptica en color. Tesis, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Totten G, Mackenzie D. 2003. Castings (Ed.), Handbook of Aluminum Vol. 1, Marcek Dekker INC., USA.

Xia F, Gao X, Liang M, Guo Y, Li J, Yang Z, Wang J, Zhang L. 2020. Effect of thermal exposure on microstructure and high-temperature fatigue life of Al-Si piston alloys. Journal of Materials Research and Technology 9: 12926-12935.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.018>

Zhao X, Meng J, Zhang C, Wei W, Wu F, Guangan Z. 2023. A novel method for improving the microstructure and the properties of Al-Si-Cu alloys prepared using rapid solidification/powder metallurgy, Materials Today Communications 35: 105802.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105802>