



Artículo de Investigación

Análisis comparativo de piñones de cadena de distribución económicos y de alta performance

Comparative analysis of economic and high performance timing chain gears

RESUMEN

A lo largo de los años se han mejorado progresivamente las aleaciones que componen las piezas de la industria automotriz, y se han adoptado ciertos métodos de manufactura para la producción a escala masiva, en particular para las piezas más pequeñas. La pulvimetallurgia se ha instalado como principal método de manufactura en piezas pequeñas debido a ciertas ventajas para la producción a escala que se maneja en el rubro, entre ellas: bajo coste, bajo consumo energético, buena calidad superficial, buena capacidad para producir piezas complejas y buenas propiedades mecánicas utilizando composiciones y técnicas adecuadas. En este estudio, para evaluar el estado actual de la producción de piezas críticas de vehículos se analizaron dos piezas claves en el funcionamiento de un motor de combustión interna: piñón de cadena de distribución, uno de ellos de un vehículo deportivo y el otro de una camioneta estándar de doble cabina. Se encontró que ambas piezas corresponden aceros pulvimetálgicos con similar contenido de carbono y cobre, y la principal diferencia radicó en los tratamientos térmicos, tratamientos superficiales y complejidad de las piezas, repercutiendo notablemente en el coste de cada uno.

Palabras clave: Aceros pulvimetálgicos; Piñón de cadena de distribución; Industria automotriz; Alto rendimiento.

ABSTRACT

Recently through the years in the automotive industry has been developing better alloys and manufacture methods for car parts, and it is notable that some manufacturing techniques are dominating the production of small parts in a massive scale. The powder metallurgy has been installed as the primordial manufacturing technique for small parts of the automotive industry, because of its main advantages for the mass scale production, between them: low cost, low energy consumption, good superficial quality, good capacity to produce complex parts, and good mechanical properties using the correct compositions and techniques. In this paper, to evaluate the actual state of the critical parts production of vehicles it has been analyzed two key parts of the functionality of an internal combustion engine: timing chain gear, one of them from a sport vehicle, and another one from a standard crew cab pickup. It was found that both gears belong to steels powder-metallurgy-made, with similar content of carbon and copper, and the main different settled in the thermal treatments, superficial treatments, parts complexity, impacting noticeably in the cost price of each one.

Keywords: Powder metallurgy steels; Timing chain gears; Automotive industry; High performance.

Autor de Correspondencia

Juan Pablo Vergara-Meruane
juan.vergara.m@usach.cl
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Universidad de Santiago de Chile

Artículo Recibido: 30 de marzo, 2023
Artículo Aceptado: 10 de julio, 2023
Artículo Publicado: 17 de mayo, 2024



Introducción

A lo largo de los años se han desarrollado nuevos materiales y métodos de manufactura que ha beneficiado la fabricación vehículos con mayor autonomía, durabilidad, menor coste y con el mejor performance para la industria automotriz. Reducir el peso de los automóviles ha sido una de las formas más comunes para mejorar el consumo de combustible, y por tanto, mejorar la autonomía, los motores de combustión interna son un claro ejemplo de mejorar las aleaciones con estos propósitos, con las aleaciones aluminio – silicio o también las de magnesio que reducen el peso del motor (versus los convencionales de hierro fundido o Al-Si) entre un 22 - 70% (Kulekci, 2007), por otro lado, se ha innovado también en aleaciones que mejoran propiedades mecánicas como las fundiciones grises de grafito compactado (CGI) mejoran notablemente las propiedades mecánicas versus fundiciones grises con grafito laminar (Dawson *et al.*, 2001). Sin embargo, un aspecto importante en la reducción de costes en la manufactura se ha adoptado en piezas más pequeñas, tales como, cojinetes y engranajes, las que han adoptado aleaciones de pulvimetallurgia para su manufactura. La pulvimetallurgia (PM) se ha definido como el arte y ciencia de producir polvos metálicos, y fabricar piezas casi o completamente terminadas mediante polvos metálicos individuales, mezclados o aleados, con o sin adición de constituyentes no metálicos (Angelo y Subramanian, 2008). Hoy, los aceros pulvimetálgicos pueden ser considerados como materiales de alto rendimiento (Torralba *et al.*, 2011), y su uso en la industria de piezas estructurales (piezas que no pueden ser producidas incluso con otros procesos tecnológicos (Akhtar *et al.*, 2018)) ha ido al alza (ASM Handbook, 1998). Dentro de los beneficios más importantes, se destaca que es un proceso de manufactura económico, en donde existe prácticamente nula pérdida de material y, además, es amigable con el medioambiente gracias a su alta tasa de utilización con un bajo consumo energético (Tan *et al.*, 2020). Sin embargo, la alta porosidad que se obtiene de este proceso de manufactura suele ser entre 5% - 15% (Wong-Angel *et al.*, 2014) lo que puede afectar negativamente en las propiedades mecánicas, principalmente al contribuir a una concentración de esfuerzos en los poros y una posterior propagación de grietas (Xu *et al.*, 2011), así pues, se han ideado nuevas técnicas para reducir la porosidad y mejorar las propiedades mecánicas, una de ellas es la utilización de métodos de compactación avanzados, tal

como, compactación a alta velocidad (high velocity compaction) o en caliente (warm compaction) que ayudan a mejorar la densidad sin disminuir la productividad (Akhtar *et al.*, 2018), , o mediante técnicas de tratamiento superficial que reducen la porosidad y mejoran las propiedades mecánicas (Peng *et al.*, 2016), la utilización de elementos ligantes como el cobre también ayudan a la reducción de la porosidad en las piezas (Wong-Angel *et al.*, 2014). De esta forma, la industria automotriz ha adoptado la pulvimetallurgia con cerca del 70% de su producción mundial para la manufactura automotriz (Ramakrishnan, 2013). En la presente investigación se analizaron dos piezas, con el fin de analizar y determinar el estado actual de las aleaciones y el proceso de manufactura involucrado en piezas económicas y de alto performance de la industria automotriz.

Procedimiento Experimental

Piezas

Los objetos analizados en el presente estudio fueron dos piezas, de las cuales ambas corresponden a piñones de cadena de distribución. En la Figura N°1 se ilustra la Aleación 1, la que corresponde a un piñón de cadena de distribución (80 mm de diámetro aprox.) de un vehículo deportivo de 250 HP. Este piñón, además de tener un alto precio (USD \$174,53 en Ebay, USD \$250 en el mercado en Chile), fue catalogado, en la presente investigación, como de “alto performance”. Por el otro lado, la Aleación 2 corresponde a un piñón de cadena de distribución (70 mm de diámetro aprox.) de una camioneta estándar de doble cabina. Por su parte, debido a la baja complejidad de la pieza y de su bajo coste (USD \$8), fue catalogada como económica.



Figura N°1 Aleación 1, piñón de alto performance.



Figura N° 2. Aleación 2, piñón económico.

Preparación de muestras

Todos los equipos utilizados para la investigación pertenecen al Laboratorio de Metalografías y al Laboratorio de Ensayos e Investigación en Materiales (SIMET) del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, de la Universidad de Santiago de Chile.

De la Aleación 1 y Aleación 2, se extrajeron 3 muestras (véase Figura N° 3), los cortes fueron realizados con el equipo Mecatome T260 del Laboratorio de Metalografías. Las muestras A y B son con el objetivo de realizar metalografías en las caras exteriores e interiores de los dientes del piñón. Por su parte, la muestra C tiene el propósito de ser enviada a análisis químico de espectrometría de emisión óptica (por chispa), y de ser necesario, fluorescencia de rayos X (XRF), ambos equipos pertenecientes al SIMET de la Universidad de Santiago de Chile.

Las muestras A y B de la Aleación 1 y Aleación 2, se montaron en baquelita en el equipo Mecapress 3, ilustradas en la Figura N° 4 y N° 5 para ser llevadas a microscopio óptico. En caso de requerir mayor precisión con la composición química de los elementos presentes, se dispuso de estas muestras para un análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), del SIMET de la Universidad de Santiago de Chile.



Figura N° 3. Cortes de la pieza.



Figura N° 4. Muestras A y B, Aleación 1.
Ataque con Nital 2%.



Figura N° 5 Muestras A y B, Aleación 2.
Ataque con Nital 2%.

Como evidentemente se observa en la Figura N° 4 y N° 5, existe una clara diferencia entre el centro de la pieza y la zona de los dientes del piñón (al ser atacadas las piezas en Nital 2%), por lo que, más adelante para comparar y discutir estas zonas, se diferenciarán entre sí siendo denominadas como 'zona del centro' y 'zona del diente'. Además, con el objetivo de complementar las metalografías, se utilizó un microdru-rómetro Vickers ZwickRoell Indentec del Laboratorio de Metalografías para obtener conforme a la norma ASTM E-18.

Resultados y Discusión

La composición química obtenida mediante espectrometría de emisión óptica por chispa de la Aleación 1 y 2 está expuesta en la Tabla N° 1. Para ambas piezas se realizaron 2 respectivos Test (con y sin limpieza), en ambos casos el equipo marcó <5.16%C el cuál es el máximo que puede detectar, y un impreciso 29,38%Fe y 17.93%Fe para la Aleación 1 y Aleación 2, respectivamente, además de que el resto de los elementos no suman 100%. Esto suele suceder con hierros fundidos y/o piezas obtenidas por pulvimetallurgia cuando se intentan analizar en espectrometría de emisión óptica por chispa. Dependiendo del hierro fundido, el grafito se puede encontrar en distintas formas, ya sea laminar, nodular, vermicular o esferoidal, y la presencia de alto contenido de carbono (presente en el grafito) produce que se descalibre la medición. Por el otro lado, en pulvimetallurgia se puede descalibrar el equipo de la misma forma ya que usualmente suele utilizarse grafito como lubricante (Angelo y Subramanian, 2008). Las piezas fueron sometidas a un tratamiento de limpieza por

ultrasonido durante 30 minutos (Test 2, c/limpieza) para verificar y confirmar los datos obtenidos, y los resultados fueron similares al primero. Dicho esto, el análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica terminó aportando sólo que probablemente las aleaciones que componen las piezas pueden ser hierros fundidos o piezas de pulvimetallurgia. Además, llama la atención que uno de los elementos con mayor proporción que se obtuvo fue el cobre, para ambas piezas.

La fluorescencia de rayos X (XRF) entregó los datos expuestos en la Tabla N° 2, en donde se coincide con

el análisis anterior con presencia de cobre, el carbono por su parte no está dentro del rango de medición del equipo, y el resto de los elementos presentes principalmente fueron Fe y Al, éste último se tratará más adelante. El objetivo de realizar la fluorescencia y espectrometría fue dilucidar la composición química de las piezas, sin embargo, los resultados expuestos no son concluyentes, y hasta ahora sólo fueron de utilidad para aclarar hacia donde iba el estudio. Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se obtuvieron los datos de la Figura N° 6 y N° 7, en donde se puede observar que se coincide con presencia de Cu y Al en la pieza, esta vez con un

Aleación	Fe	C	Cu	Al	Mn	S
1	29,38	<5,16	1,1	0,009	0,031	0,056
2	17,93	<5,16	0,54	0,009	0,192	0,145
1, c/limpieza	34,47	<5,16	0,84	0,0067	0,021	0,053
2, c/limpieza	17,93	<5,16	0,54	0,0028	0,192	0,145

Tabla N° 1. Resultados de la espectrometría de emisión óptica (por chispa) para la Aleación 1 y 2.

Aleación	Fe	C	Cu	Al	Mn	Si
1	51,47	null	1,07	1,49	0,09	0,09
2	87,29	null	2,21	3,64	0,65	0,43

Tabla N° 2. Resultados de XRF para la Aleación 1 y 2.

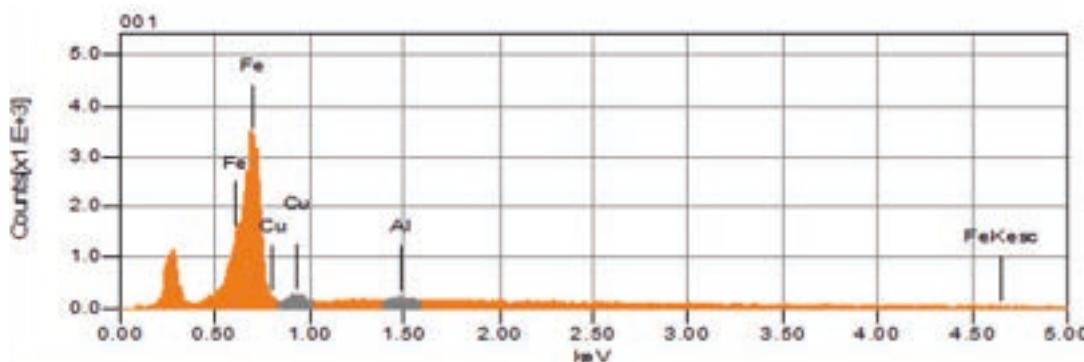


Figura N° 6. SEM Aleación 1, centro de la pieza. Muestra A.

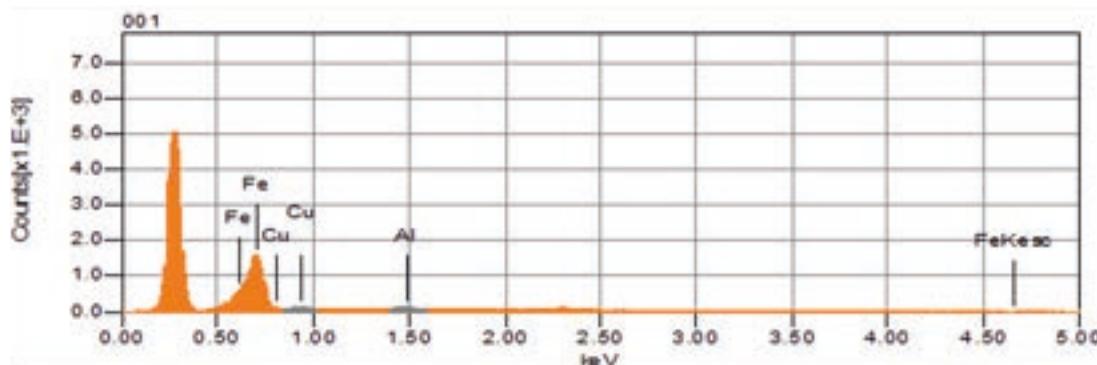


Figura N° 7. SEM Aleación 2, centro de la pieza. Muestra A.

contenido de fierro aceptable, aunque no exacto, ya que en el rango de medición de este equipo tampoco se analiza el carbono, por lo que los resultados no están correctamente balanceados. La presencia de aluminio en XRF y SEM se discutirá más adelante.

Aleación	Fe	C	Cu*	Al*
1	98,46	null	1,29	0,25
2	98,8	null	0,99	0,2

Tabla N° 3. Resultados SEM en el centro de las piezas. Nota: Se forzó el equipo a buscar los elementos con “*”.

Las muestras A y B (externa e interna) de la Aleación 1 y 2 se llevaron a microscopía óptica, obteniendo en primera instancia las metalografías sin ataque ilustradas en la Figura N° 8 y N° 9, en donde se puede observar una clara porosidad en las piezas, esto nos indica que fueron obtenidas mediante pulvimetallurgia, además, esto explicaría la presencia de aluminio en el SEM y XRF, ya que, al haberse realizado el pulido con alúmina en presencia de porosidad se producirá una evidente contaminación en la pieza, afectando en la composición química obtenida, las muestras enviadas a espectrometría óptica no fueron pulidas (y por esto existen 9 ppm de Al y no 2000-2500 ppm), esto fortalece la lógica presentada. Además, la literatura nos indica que la adición de aluminio como elemento aleante en aceros pulvimetárgicos incrementa la porosidad, afectando negativa y significativamente en el módulo de elasticidad, elongación, esfuerzo de fluencia y dureza (Sazegaran et al., 2022), por lo que su presencia como elemento aleante en estas piezas no tiene justificación alguna y se descarta por completo.

Se cuantificó la porosidad mediante el software ImageJ (véase Figura N° 12) dando como resultado 5% y 21% en el diente del piñón, y en el centro de la pieza respectivamente en la Aleación 1, por su parte, el piñón de la Aleación 2 tuvo una porosidad de 27%, constante a lo largo de la pieza. Esta diferencia en la Aleación 1 entre la superficie y el centro presente se debe a un tratamiento superficial realizado con el objetivo de reducir la porosidad y aumentar la densidad en la zona de mayor exigencia mecánica: los dientes en la superficie del piñón. Esto puede dar lugar a una pieza que presenta una capa superficial con mayor densidad, dureza y con una menor rugosidad, lo que beneficia a la resistencia al desgaste (Peng et al., 2016). Si comparamos la Aleación 1 con la Aleación 2, la primera tiene menor densidad en el centro de la pieza, lo que se debe probablemente a una compactación en caliente. Estas últimas dos técnicas mencionadas recientemente contribuyen a una mayor densidad, que se traduce en mayor resistencia a fatiga (Forden et al., 2005).

Mediante microscopía óptica se obtuvieron las metalografías de los piñones, ilustradas en las (Figura N° 10 y N° 11) donde en la zona del diente en ambos casos (Aleación 1 y Aleación 2) se observan agujas de martensita, esta microestructura se acompaña de una microdureza de 798 HV0.5 y 784 HV0.5 en el caso de la pieza económica, muestra A y B respectivamente. Por el otro lado, la microdureza en la microestructura martensítica de la pieza de alto performance es de 468 HV0.5 y 577 HV0.5, muestra A y B respectivamente. Por el otro lado, el centro de la pieza corresponde a una microestructura perlítica, en donde se puede observar la presencia de ferrita (α , fase clara), se evidencia la presencia de perlita, acompañadas de 212 HV0.5 y 184 HV0.5 de microdureza para la muestra A y B respectivamente. Mediante el software ImageJ se cuantificó la ferrita (véase Figura N° 12)

presente en el centro de las muestras, en donde se pudo estimar mediante regla de la palanca una aproximación al contenido de carbono del acero, obteniendo alrededor de 0,5% C tanto para el piñón de alto rendimiento como para el piñón económico, por lo que curiosamente ambos piñones (económico y alto performance) corresponden a aceros pulvimetálgicos perlíticos. Al atacar las muestras A y B de la Aleación 1, se pudo observar una clara diferencia entre la zona del diente y del centro (véase Figura

N° 13), una interfase clásica propia de calentamiento por inducción, lo que confirma la existencia de un tratamiento térmico superficial en la pieza de alto performance, en la Aleación 2, al ser atacado con Nital 2% muestra una leve diferencia de coloración entre la zona de los dientes y el centro de la pieza, por lo que se podría estimar que se realizó un tratamiento superficial más económico (debido a su bajo precio, alrededor de USD \$ 8), pudiendo corresponder a un flameado.

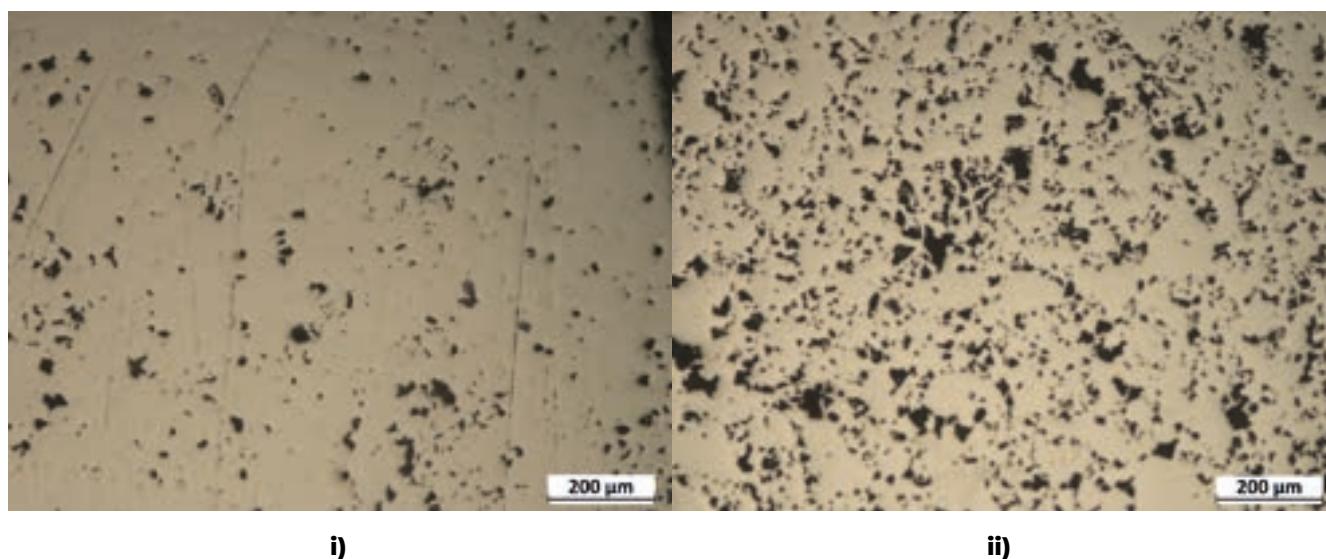


Figura N° 8. Metalografía sin ataque, Aleación 1 (muestra B), X100. i) zona del diente, ii) centro de la pieza.

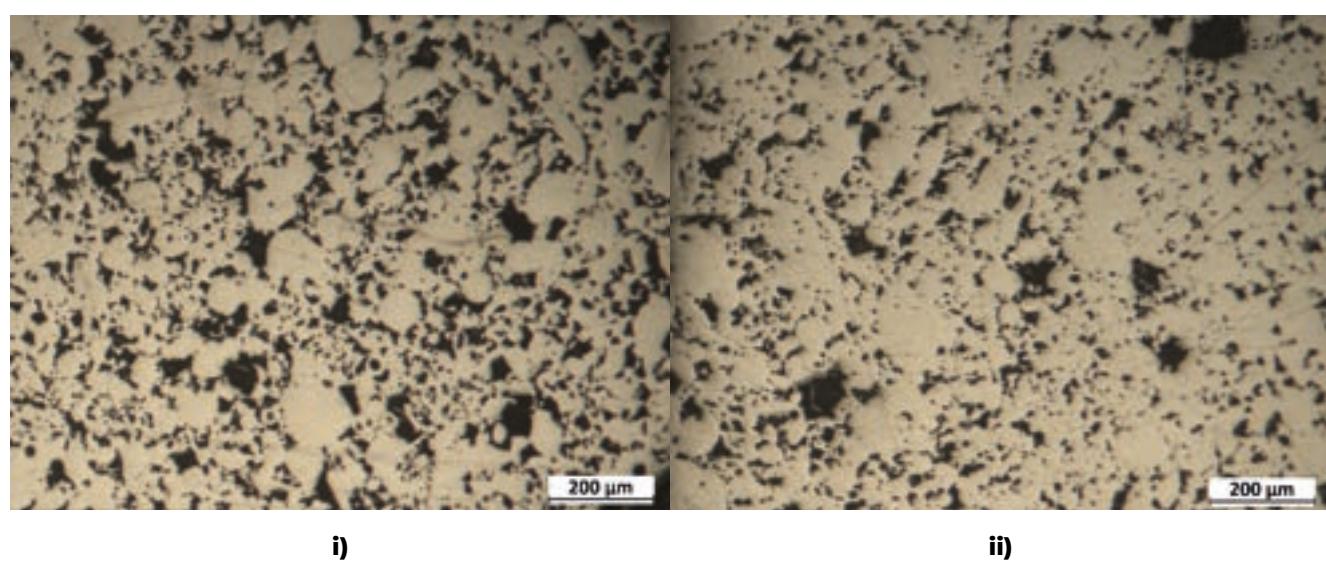


Figura N° 9. Metalografía sin ataque, Aleación 2 (muestra B), X100. i) zona del diente, ii) centro de la pieza.

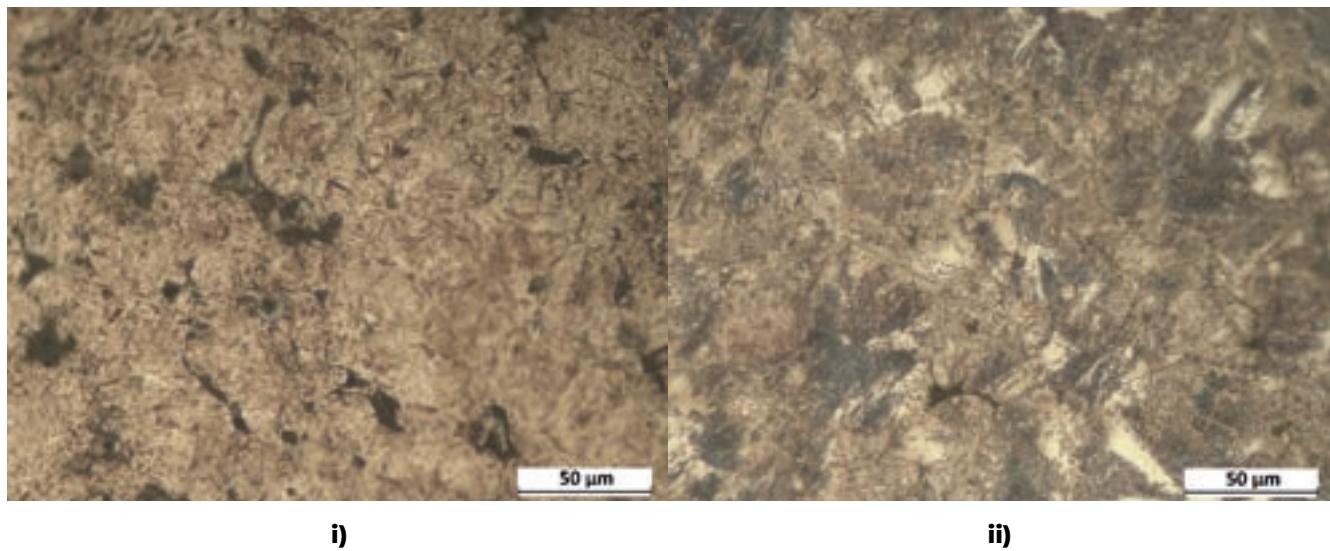


Figura N° 10. Microestructura Aleación 1, x500 (muestra B). Atacada con Nital 2%.
i) zona del diente, ii) centro de la pieza.

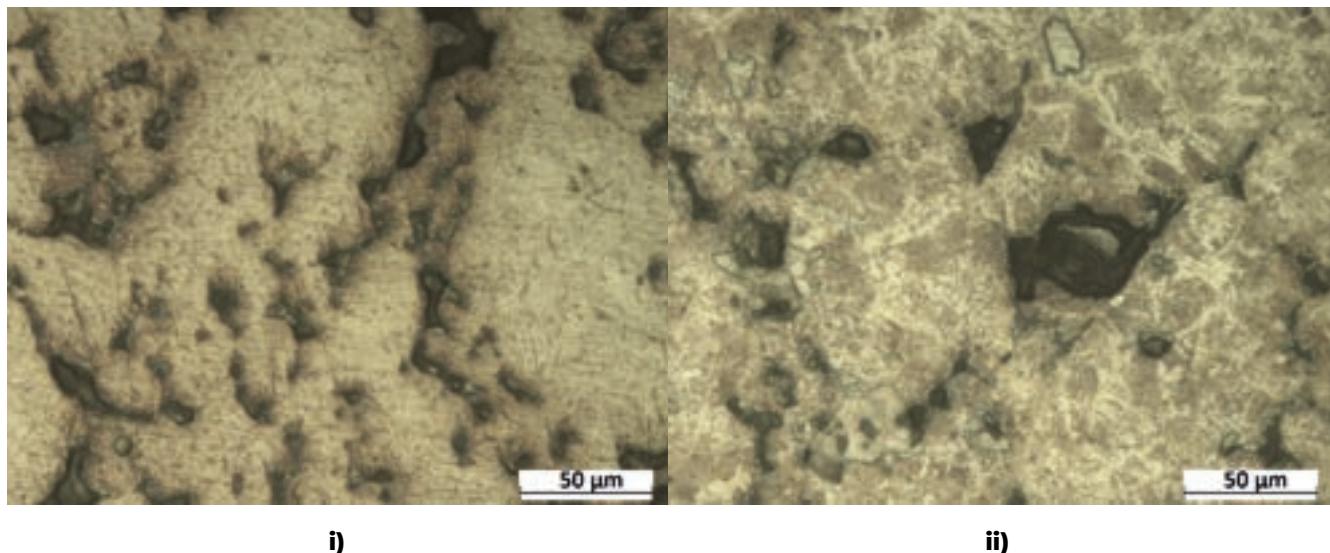


Figura N° 11. Microestructura Aleación 2, x500 (muestra B). Atacada con Nital 2%.
i) zona del diente, ii) centro de la pieza.

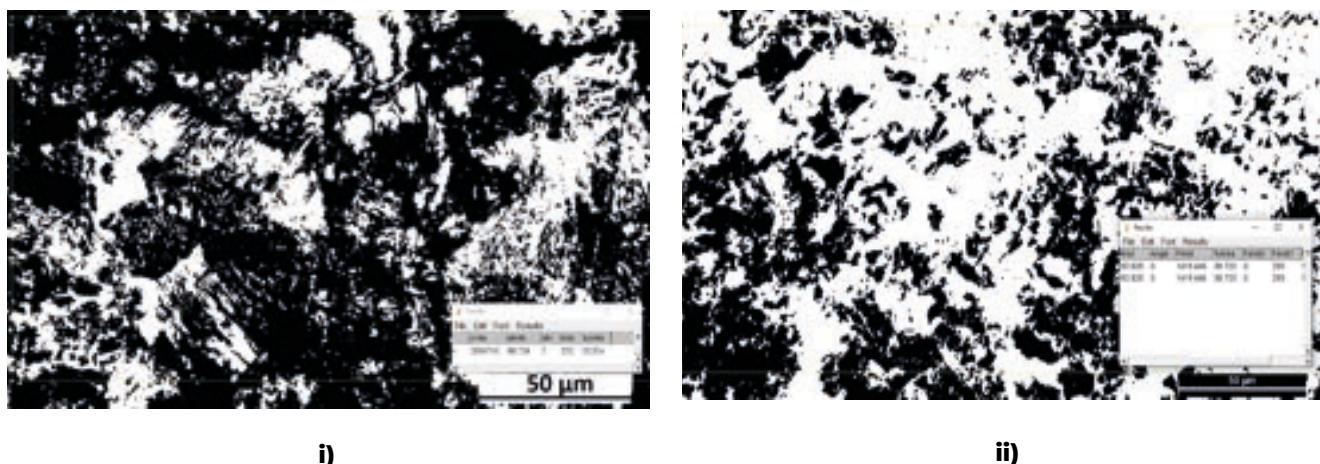


Figura N°12. Cuantificación de ferrita en el centro de la pieza. i) Aleación 1, 35,30%. ii) Aleación 2, 38,72%. Software: Image J.



Figura N°13. Aleación 1, muestras A (izquierda) y B (derecha). Atacadas en Nital 2%.

Conclusiones

La manufactura aditiva no ha sido catalogada como viable para la producción a escala masiva durante muchos años, sin embargo, el estado actual y en concreto para pulvimetallurgia, forma parte de las técnicas de manufactura en la producción en masa de la industria automotriz. A pesar de las diferencias de precio y exigencias mecánicas que posee un vehículo deportivo y una camioneta estándar de doble cabina, los piñones de cadena de distribución de sus

motores pueden coincidir en el proceso de manufactura, con similar composición y microestructura. La aleación proveniente de un deportivo tiene una composición muy cercana a la aleación de una camioneta, ambos corresponden a aceros perlíticos fabricados por pulvimetallurgia, con una presencia de cobre similar, pero distan entre sí del mismo tratamiento térmico, superficial, y complejidad de las piezas mismas, lo que las aleja en coste de producción, y por tanto, de venta.

Agradecimientos

Los autores agradecen al laboratorio metalúrgico SIMET, así también con el Laboratorio de Metalografías de la Universidad de Santiago de Chile, junto a los docentes que con buena disposición guiaron y apoyaron la investigación, en el contexto académico de la asignatura de pregrado Diseño y Selección de Materiales dictado por Dr. Alfredo Artigas, Dr. Alberto Monsalve, Dr. Oscar Bustos y Dr. Rodrigo Allende.

Referencias

- Akhtar S, Saad M, Rasikh Misbah M, Sati MC. 2018. Recent advancements in powder metallurgy: A review. Materials Today Proceedings 5: 18649–18655.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.210>
- Angelo PC, Subramanian R. 2008. Powder metallurgy: Science, technology and applications. PHI Learning Private Limited, New Delhi, India.

- ASM Handbook. 1998. Powder metal technologies and applications. ASM International 7: 534.
- Danninger H, De Oro Calderón H, Cierl-Mayer C. 2017. Powder metallurgy and sintered materials. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.
https://doi.org/10.1002/14356007.a22_105.pub2
- Dawson S, Hollinger I, Robbins M, Daeth J, Reuter U, Schulz H. 2001. The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. SAE Technical Paper Series.
<https://doi.org/10.4271/2001-01-0409>
- Fordén L, Bengtsson S, Bergström M. 2005. Comparison of high performance PM gears manufactured by conventional and warm compaction and surface densification. Powder Metallurgy 48: 10-12.
<https://doi.org/10.1179/pom.2005.48.1.10>
- Kulekci MK. 2008. Magnesium and its alloys applications in automotive industry. Int J Adv Manuf Technol 39: 851-865.
<https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>
- Peng J, Zhao Y, Chen D, Li K, Lu W, Yan B. 2016. Effect of surface densification on the microstructure and mechanical properties of powder metallurgical gears by using a surface rolling process. Materials 9: 846.
<https://doi.org/10.3390/ma9100846>
- Ramakrishnan P. 2013. Automotive applications of powder metallurgy. Advances in powder metallurgy 2013: 493-519.
<https://doi.org/10.1533/9780857098900.4.493>
- Sazegaran H, Bahari H, Naserian-Nik AM, Khorramshahi F. 2022. The Influence of aluminum content on the porosity, microstructure, and mechanical properties of powder metallurgy steels. Arch Metall Mater 67: 105-111. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.137478>
- Tan ZQ, Zhang Q, Guo XY, Zhao WJ, Zhou CS, Liu Y. 2020. New development of powder metallurgy in automotive industry. J Central South Univ 27:1611-1623.
<https://doi.org/10.1007/s11771-020-4394-y>
- Torralba J, Calderon R, Campos M. 2011. From sintered iron to high performance PM steels. Materials Science Forum 672: 3-11.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.672.3>
- Wong-Ángel W, Téllez-Jurado L, Chávez-Alcalá JF, Chavira-Martínez E, Verdúzco-Cedeño VF. 2014. Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy. Materials & Design 58: 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.002>
- Xu Z, Wen W, Zhai T. 2011. Effects of pore position in depth on stress/strain concentration and fatigue crack initiation. The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International.
<https://doi.org/10.1007/s11661-011-0947-x>