

ESTUDIO DEL ALUMINIO EN AW-4032 UTILIZADO EN PISTONES PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Joselyn Rafaela Mina Alban
katherinevelena@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7733-1568>
Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano - Ecuador

Christian Patricio Cabascango Camuendo
ccabascango@istte.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4927-0832>
Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano - Ecuador

Recibido: 10/10/22
Aceptado: 15/11/22
Publicado: 01/01/23

RESUMEN

La investigación caracterizó los elementos presentes en las aleaciones de aluminio que conforman un pistón. Además, describió las propiedades que aportan cada elemento al producto. Para ello, se realizó una prueba de espectrometría por chispa en dos pistones en dos motores distintos. Luego de la prueba, se pudo caracterizar que ambos pistones tienen la nomenclatura de EN AW-4032, sin embargo, los pistones se encuentran funcionando en dos sistemas de inyección diferentes, razón por la cual, también se investigó como el rango de funcionamiento de cada motor afecta a la estructura de cada pistón. La distribución de los materiales es muy similar y proporciona una estructura estable, no obstante, el pistón del motor GDI se mira más alivianado en los laterales y en el centro concentra mayor masa, mientras que el pistón del motor MPFI presenta una distribución homogénea en todo el cuerpo. El estudio presenta las características de los componentes y la temperatura de trabajo en un motor. Al parecer, los pistones son muy similares en cuanto a la distribución de los metales, sin embargo, el proceso de fabricación influye en las características de resistencia.

PALABRAS CLAVE: EN AW-4032, pistón, GDI, MPFI, aleación aluminio.

STUDY OF ALUMINUM IN AW-4032 USED IN PISTONS FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES

ABSTRACT

The research characterized the elements present in the aluminum alloys that make up a piston. In addition, he described the properties that each element contributes to the product. For this purpose, a spark spectrometry test was carried out on two pistons on two different engines. After the test, it was possible to characterize that both pistons have the nomenclature of EN AW-4032, however, the pistons are running on two different injection systems, which is why, also investigated how the range of operation of each engine affects the structure of each piston. The distribution of the materials is very similar and provides a stable structure, however, the GDI engine piston looks more relaxed on the sides and in the center concentrates more mass, while the MPFI motor piston has a homogeneous distribution throughout the body. The study presents the characteristics of the components and the working temperature in a motor. Apparently, pistons are very similar in terms of the distribution of metals, however, the manufacturing process influences the strength characteristics.

KEY WORDS: EN AW-4032, piston, GDI, MPFI, alloy aluminum.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia moderna, el ser humano ha producido cambios tecnológicos significativos en el sector automotriz, convirtiéndose en una de las industrias manufactureras más innovadoras y automatizadas. Esta se encuentra en constante adaptación de nuevas tecnologías y metodologías que les permita desarrollar procesos para el uso de recursos en la producción de materiales para la industria (CEPAL, 2022).

De esta manera, se pueden reducir las pérdidas durante la fase de producción del material y alcanzar un aumento en la durabilidad del mismo (CAPEL, 2022). Según lo mencionado por Van Hoof, Núñez y De Miguel, (2022), citados en el estudio de la CEPAL (2022): "estas metodologías incluyen análisis del flujo de materiales, análisis del ciclo de vida y medición de huellas ecológicas a partir del consumo de agua, energía y suelo, y la generación de emisiones" (p. 168).

En los países de la región, la producción de elementos automotrices se ha vuelto muy compleja. Los modelos de transformación productiva requieren desarrollar nuevos métodos de producción y negocio, que generen una extracción eficiente de los recursos (CEPAL, 2022). Además, los productos que se fabrican, deben competir con productos e insumos importados de menor valor. Sin embargo, frente a este panorama, existen iniciativas de la región, que destacan hojas de ruta y estrategias nacionales de economía circular (CEPAL, 2022).

Adicionalmente, "en los últimos años se ha realizado un impulso al desarrollo de la matriz productiva en diferentes ámbitos de la producción, en donde se pide la creación de partes y piezas en gran cantidad" (Padilla, Cuaical y Buenaño, 2019, p. 2). Sin embargo, el desarrollo de una economía circular y de producción de elementos dentro del mercado, debe iniciar por conocer el elemento y su proceso de fabricación, pero, se debe tener en cuenta que las características de los elementos que contiene cada pieza fabricada, todavía no se han caracterizado del todo.

Los pistones juegan un papel fundamental en el trabajo que realiza el motor. Estos se encuentran en constante contacto con las altas temperaturas, fricción y los esfuerzos que son generados por la combustión que se da en la cámara los desgastan. Si su aleación no es la adecuada, puede llegar a desbalancearse y generar cascabeleo que puede afectar a más elementos internos del motor.

Es por ello, que la presente investigación se centró en realizar un estudio de la aleación y las características que le aportan cada elemento al pistón de aluminio EN AW-4032, utilizado en motores de combustión interna con sistema de inyección directa de gasolina (GDI) y pistón con sistema de inyección multipunto (MPFI). La razón de comparar estos dos pistones es porque según los datos proporcionados por el CIMA (2021) el parque automotor ecuatoriano tiene más de 15 años. Consecuentemente, en unos cuantos años más ya no se tendrá en stock algunas piezas, entre ellas el pistón.

2. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS / MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio toma como metodología de investigación la descriptiva, ya que se va a caracterizar la cantidad de elementos metálicos presentes y cuáles son las características que aportan cada elemento a la aleación de aluminio 4032 de un pistón de inyección indirecta y un pistón de inyección directa. El análisis de los datos recopilados determinó las características esenciales y parámetros de funcionamiento del motor que afectan a los pistones mencionados. Además, se utilizó investigación correlacional, al plasmar en una tabla los resultados de las pruebas de espectrometría óptica por chispa, realizados en una máquina Bruker, modelo Q4 Tasman, bajo la normativa UNE-EN ISO 17072-2.

Figura 1

Máquina Bruker modelo Q4 Tasman.



Fuente: autoría propia.

3. RESULTADOS

El estudio realizado arrojó la siguiente distribución de datos, que se pueden observar en la Tabla 1, donde la distribución y la presencia de metales generan la característica y la clasificación de la familia a la que pertenece el aluminio (Al). Es decir, con cantidades de 84,52% y 83,12% de Al. Esto determina que es un metal base, lo que determina que se trata de aleaciones de aluminio y el metal que le sigue con porcentajes altos es el silicio (Si), con valores de 12,10% y 12,93%. Entonces, se deduce que existe una aleación de aluminio-silicio (International Alloy Designation System, 2012, p. 38). Los porcentajes dados están en función a la cantidad de composición química de ambas muestras.

Tabla 1

Cuantificación de metales presentes en las muestras.

Metales	Pistón Chevrolet (%)	Pistón Mazda (%)
Silicio (Si)	12,10	12,93
Hierro (Fe)	0,395	0,369
Cobre (Cu)	0,999	1,195
Manganeso (Mn)	0,056	0,160

Mina Alban, J. y Cabascango Camuendo, C. (2023). Estudio del aluminio EN AW-4032 utilizado en pistones para motores de combustión interna. *Revista Cotopaxi Tech*, 3(1), 47-58. <http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/142>
enero - julio (2023) ISSN 2806-5573

Magnesio (Mg)	0,764	0,881
Cromo (Cr)	0,044	0,012
Níquel (Ni)	0,934	0,968
Zinc (Zn)	0,057	0,192
Titanio (Ti)	0,063	0,075
Galio (Ga)	0,010	0,009
Antimonio (Sb)	0,012	0,011
Vanadio (V)	0,011	0,012
Aluminio (Al)	84,52	83,12

Fuente: autoría propia.

Dentro de la clasificación de aleaciones de aluminio establecidas por el Instituto Alemán de Normalización (DIN), la aleación aluminio-silicio pertenece a la serie 4xxx, aleación tratable térmicamente para moldeo (total). Los porcentajes de metal que caracterizan esta aleación varían desde 0,6% a 21,5% de silicio (Si). Para determinar exactamente la numeración de aleación a la que pertenece dentro de las 14 subdivisiones de aluminio-silicio, se procede a comparar los valores obtenidos con el rango de valores establecidos por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM).

Una vez calculada, la cantidad de porcentaje de los metales, se tiene que en su mayoría la composición química está conformada por: aluminio (Al), silicio (Si), cobre (Cu), níquel (Ni), magnesio (Mg) y hierro (Fe). Así, se encuentra que la numeración de aleación que más se acerca a los resultados es EN AW-4032, en su forma simbólica (EN AW- AlSi12,5MgCuNi). En la Tabla 2 se muestra la comparación de valores. La primera fila está dada por los valores estándares de la ASTM.

Tabla 2

Comparación de valores estándares AW-4032.

Piston	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Cr	% Ni	% Zn	% Ti	% Ga	% Sb	% V	% Al
Estándar	11-13,5	1	0,5-1,3	0,05-0,5	0,8-1,3	0,1	0,5-1,3	0,25	0,05-0,15	-	-	-	El resto
MPFI	12,1	0,4	0,999	0,056	0,764	0,04	0,934	0,06	0,063	0,01	0,01	0,01	84,52
GDI	12,93	0,37	1,195	0,16	0,881	0,01	0,968	0,19	0,075	0,01	0,01	0,01	83,12

Fuente: autoría propia.

La aleación de un metal se da para compensar o aumentar ciertas propiedades que se encuentran carentes en el metal base. Todos los metales que conforman la aleación deben escogerse según la capacidad de los átomos para adaptarse, es decir, que los átomos logren una estructura uniforme homogénea en el espacio.

El aluminio, como elemento base, se encuentra en un rango de 84,52% / 83,12% dentro de la aleación. Este es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre y presenta una densidad de 2,70 g/cm³, que representa un tercio de la densidad que presenta el acero, lo que lo vuelve más liviano. Además, esta característica hace que la resistencia peso-tracción sea excepcional (Newell, 2011), ligeramente oxidante, pero, puede contribuir como un aislante en el proceso de

oxidación. Finalmente, posee un módulo de elasticidad de 70 GPa y una resistencia a la tracción de 50-600 MPa (Kleiner, Geiger y Klaus, 2017).

La mayor composición del metal base aluminio en los dos pistones provoca: disminución en peso, mayor capacidad de conducción del calor, resistencia a la corrosión, ductilidad, resistencia mecánica y las fuerzas de inercia disminuyen debido a su baja densidad. Gracias a la composición estructural de los pistones se logra optimizar el peso, junto con la reducción de la altura de compresión (distancia entre cabeza y bulón del pistón) para compensar el incremento de inercia de masas que se produce en los componentes del motor.

El silicio, con una distribución de 12,10% / 12,93%, es el segundo componente más abundante después del oxígeno. Este metal se presenta de forma amorfa y cristalizada (estructura ordenada de átomos de silicio); es inerte y estable a altas temperaturas. En la Tabla 3 se destacan propiedades del silicio (Padilla, Cuaical y Buenaño, 2019).

Tabla 3

Propiedades del silicio (Si).

Densidad (25 °C)	2,329 g/cm ³
Punto de fusión	1412 °C
Punto de ebullición	3265 °C
Masa atómica	28,085 g/mol
Calor latente de fusión	1854,873 KJ/Kg [2]
Coefficiente de expansión térmica (25 °C)	2,6*10 ⁻⁶ K ⁻¹
Conductividad térmica (25°C)	1,3 W/cm°C
Resistividad eléctrica (20 °C)	2,3*10 ³ Ωm
Módulo de Young	130-188 GPa

Fuente. adaptado de Kalpakjian y Schmid, (2008).

Las características que aporta el silicio en la aleación del pistón son: incremento de las características del colado (proceso de forja), fluidez, resistencia al agrietamiento en caliente, resistencia mecánica, dureza, resistencia la desgaste, baja contracción, bajo coeficiente de expansión térmico y características buenas de alimentación de la pieza.

Estas propiedades son el producto de la mezcla homogénea del silicio. De acuerdo a los valores obtenidos de silicio, se encuentra que para la aleación Al-Si AW 4032, su composición para la fundición es de tipo eutéctica silicio (Si) 12%, debido que el pistón requiere fundición a presión y altas velocidades de enfriamiento. Otro de los elementos que proporciona valor a la aleación es el cobre, que se encuentra presente en una cantidad de 0,999% / 1,195%. Este elemento tiene un característico color rojizo anaranjado con un brillo metálico, de alta conductibilidad eléctrica y resistente a temperaturas elevadas de trabajo. Además, tiene buena ductilidad y maleabilidad, con una densidad de 8,96 kg/m³, con un punto de fusión 1082 °C, con una conductibilidad térmica de 393 W/mk, y

Mina Alban, J. y Cabascango Camuendo, C. (2023). Estudio del aluminio EN AW-4032 utilizado en pistones para motores de combustión interna. *Revista Cotopaxi Tech*, 3(1), 47-58.

<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/142>

enero - julio (2023) ISSN 2806-5573

un módulo de elasticidad de 42.500 MPa (Newell, 2011) y (Echavarría y Orrego, 2018).

Las propiedades que aporta a la estructura de los pistones son: incremento notable de la resistencia a la tracción y la dureza, tanto en condiciones de extrusión como tratado térmico, maquinabilidad, reduce la resistencia al agrietamiento en caliente, disminuye la colabilidad en el proceso de fundición del pistón, incremento de propiedades mecánicas, a mayor contenido de cobre dentro de la aleación AW-4032 aumenta la corrosión bajo tensión (efecto galleo) (Kalpakjian y Schmid, 2008).

El níquel es uno de los principales elementos de aleación: 0,934% / 0,968%. Sus características le contribuyen a la aleación resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión, siendo utilizado como elemento aleante en piezas que se encuentran sometidas a trabajos bajo altas temperaturas (Kalpakjian y Schmid, 2008).

Las características que aporta en la aleación de los pistones son: resistencia mecánica, dureza, conductividad térmica, reduce el coeficiente de expansión térmica. El níquel aleado con hierro proporciona tenacidad y resistencia a la corrosión, así también aleado con el cobre mejora las propiedades a altas temperaturas (Kalpakjian y Schmid, 2008).

El magnesio con una proporción de 0,764% / 0,881%, dentro de la aleación AW-4032 aporta: disminución del efecto fragilizante, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, ductilidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la abrasión, resistencia mecánica. También, produce alta capacidad de amortiguamiento y junto con los demás elementos que conforman la aleación del pistón es capaz de absorber energía elásticamente, incluso aporta resistencia a la tracción y dureza junto con el zinc y el aluminio (Kalpakjian y Schmid, 2008).

El hierro aporta una proporción de 0,395% / 0,369%. Por su característica de dureza y con una densidad de 7,87 g/cm³, posee un módulo de elasticidad de 207GPa y un módulo de rigidez de 81GPa (Montes, Cuevas y Cinta, 2014).

Dentro de la aleación AW-4032 aporta: tenacidad, mejora la resistencia al agrietamiento en caliente, resistencia a la fluencia a altas temperaturas, disminuye la tendencia a la adhesión en la fundición a presión del pistón, aumenta la resistencia mecánica, pero disminuye notablemente la ductilidad. Junto con el manganeso y el cromo, el hierro ayuda en las fases importantes de fundición de las piezas.

El estudio realizado por Chica et, al (2019), presenta las características que aporta cada elemento dentro de una aleación de aluminio que se presentan la Tabla 4.

Tabla 4

Influencia de metales en la aleación de aluminio.

	Elementos Químicos	%Mg	%Si	%Fe	%Ti	%Zn	%Mn	%Cu
Propiedades								
Resistencia Mecánica		-----	Mayor	Mayor	-----	-----	Mayor	Mayor
Dureza		-----	-----	-----	-----	-----	Mayor	Mayor
Ductilidad		Mayor	-----	Menor	-----	-----	Notable	-----
Resistencia en Caliente		-----	Mayor	Mayor	Mayor	Mayor	-----	Menor
Resistividad Térmica		Menor	Mayor	-----	-----	-----	-----	-----
Resistencia a la Corrosión		Mayor	-----	-----	-----	-----	Igual	Menor

Fuente: Chica, et al., (2019).

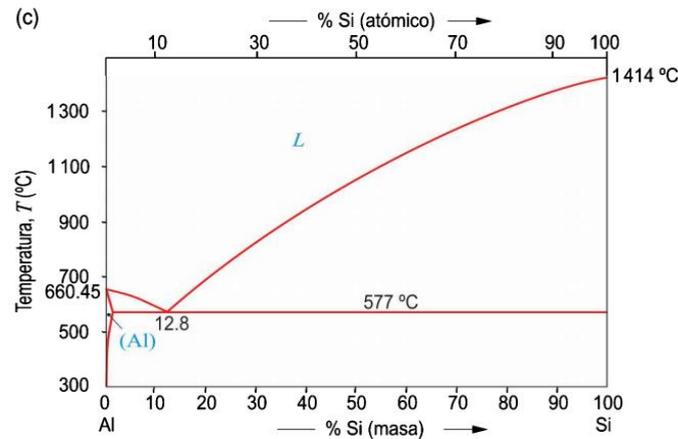
Las características y la funcionalidad de una pieza que será utilizada en la industria dependen del tipo de aleación que conforma el material. Es decir, su desempeño y el tipo de trabajo que realice dependen de su composición y del tratamiento térmico. Esto busca obtener una distribución uniforme del grano. En este proceso, las etapas son de gran importancia. Como primera etapa, más importante, dentro del proceso de fundición, es la solidificación de la aleación y el segundo factor es el tratamiento térmico. Las propiedades mecánicas de la pieza manufacturada dependen, en gran medida, de lo mencionado anteriormente. Así también, influyen en la resistencia, dureza, ductilidad, tenacidad y resistencia al desgaste.

La solidificación de la aleación es el proceso físico que consiste en el cambio de estado del metal de líquido a sólido, bajo determinada temperatura conformado por varias fases: formación de núcleos estables en el fundido (nucleación), crecimiento del núcleo hasta dar origen a cristales, la formación de granos y estructura granular.

De acuerdo a la cantidad de silicio en los resultados, se determina que la aleación AW-4032 lleva un proceso de solidificación binaria. El tipo de mezcla homogénea que forma dentro de la solidificación es de tipo eutéctica dentro del rango 11%-13% de silicio. Los resultados de las muestras son 12,10% / 12,93% de silicio. Esto quiere decir que la solidificación de la aleación se llevó a cabo de 577°C a 580°C como se encuentra descrito en la Figura 2.

Figura 2

Diagrama de equilibrio de solidificación del sistema binario Al-Si.



Fuente: Callister y Retwisch, (2016).

La Figura 3 presenta los tipos de tratamiento térmico que deben seguir los materiales antes de su producción. Para el caso del aluminio en estudio, se pueden observar los rangos de las propiedades mecánicas que se refuerzan y sus comportamientos de manera general

Tabla 5

Tratamientos de dureza.

Material	Temperatura de fusión (K)	Módulo elástico E (GPa)
Aluminio	933	62
Cobre	1357	128
Cromo	2148	259
Hierro	1811	207
Níquel	1728	207
Oro	1337	78
Plata	1235	80
Plomo	601	16
Titanio	1941	116
Wolframio	3695	401
Alúmina	2320	244 - 460
Carburo de silicio	3453	350 - 461
Carburo de titanio	3100	420 - 450
Diamante	3823	1050 - 1200
Nitruro de silicio	2173	170 - 318

Fuente: Callister y Retwisch, (2016).

Generalmente, el tratamiento térmico al que son sometidos los pistones es el T5, conocido como tratamiento térmico de precipitación - enfriamiento. Este consiste en someter al elemento desde una temperatura elevada al proceso de conformado y envejecimiento artificial. Además, se usa el T6, conocido como tratamiento térmico puesta en solución y maduración; también, se lo denomina como endurecimiento por precipitación. Se utiliza para aumentar hasta el 30% de resistencia en la aleación. Además, proporcionan una excelente resistencia a altas temperaturas, facilitan el mecanizado, reducen la flexibilidad y producen una mayor resistencia a la tracción.

4. DISCUSIÓN

Ambos pistones del estudio presentan diferentes diseños y tipos de fundición. De acuerdo al análisis visual y los datos de Barona y Velasteguí (2020), el pistón Chevrolet es de tipo Hydrothermik, con especificaciones convencionales y de cabeza plana. Por ende, al no tener tanta complicidad en el diseño, su proceso de fabricación es vaciado en moldes con presencia de flujo de grano desequilibrado. Por otro lado, el pistón Mazda es de tipo Evotec, con especificaciones especiales y adaptadas al tipo de cámara de combustión. En este caso, si hay complicidad en el diseño por lo que su proceso de fabricación es mediante forja con máquinas de mecanizado.

Un dato a tomar en cuenta es que los pistones por forja tienen más resistencia mecánica (Camiño 2017). Los datos del libro SAE, editado por Basshuyen y Schäfer (2017), mencionan que las temperaturas constantes de trabajo dentro de un motor de combustión interna a gasolina son elevadas: 1000°C en la cámara de combustión, 800°C en válvulas de escape, 250 a 350°C en el alojamiento del pistón, 200 a 400°C en la cabeza pistón y, por último, un valor promedio de 150°C en la falda del pistón. Además de presiones altas de encendido, los valores van de 50 a 120 bares.

Debido a que el pistón es sometido a estas condiciones de altas temperaturas, presiones y fricción, el diseño del pistón debe cumplir con los siguientes parámetros fundamentales en el diseño: debe tener una distribución uniforme de presión, falda con propiedades de elasticidad, aleaciones de aluminio-silicio Al-Si, específicamente, de composición eutéctica o hipoeutéctica, para la resistencia térmica y reducción de peso. Por último, se menciona que, para optimizar las características mecánicas y físicas, los tratamientos térmicos que se deben utilizar son: tratamiento térmico de temple, desde la temperatura de extrusión y maduración (T5) y tratamiento térmico de solución, temple y maduración artificial (T6). Estos tratamientos aumentan hasta el 30% de resistencia en la aleación; además, proporcionan una excelente resistencia a altas temperaturas, facilitan el mecanizado, reducen la flexibilidad y producen una mayor resistencia a la tracción (Callister y Retwisch, 2016).

Una vez identificadas las propiedades externas de varios pistones, es necesario evaluar el comportamiento microestructural de la aleación. Cada metal tiene una forma o estructura molecular, diferente al momento de aliarse con otro

Mina Alban, J. y Cabascango Camuendo, C. (2023). Estudio del aluminio EN AW-4032 utilizado en pistones para motores de combustión interna. *Revista Cotopaxi Tech*, 3(1), 47-58.

<http://ojs.istx.edu.ec/index.php/cotopaxitech/article/view/142>

enero - julio (2023) ISSN 2806-5573

metal. A esto se le llama estructura cristalina del metal. Cada metal presente en la aleación se une de manera uniforme gracias a las características que poseen. Cuando estos metales de la aleación son sometidos a esfuerzos, altas y bajas temperaturas bruscamente durante un tiempo determinado, sucede una alteración en su estructura molecular con presencia de fallas, teniendo como consecuencia la pérdida de propiedades físicas y mecánicas de la estructura que conforma el pistón.

5. CONCLUSIONES / CONSIDERACIONES FINALES

Los tratamientos térmicos a los que se encuentran sometidos los pistones por lo general son el T5 y T6. Al encontrarse trabajando dentro de la cámara de combustión y ser sometidos a temperaturas elevadas y fricción, estos presentan distribuciones de elementos metálicos muy similares, como se puede observar tanto en el pistón del motor de inyección directa como en el motor de inyección indirecta.

Las temperaturas y rangos de funcionamiento son similares en ambos motores. El pistón, por las propiedades del material, se acopla a estos rangos de trabajo. Esto llevaría a que el fabricante, en lugar de centrarse en generar nuevas aleaciones, se centre en el diseño del pistón para generar las características específicas de trabajo que tiene cada motor.

Finalmente, los sistemas de inyección en el mercado automotriz siguen evolucionando. Sin embargo, los elementos de fabricación de un motor se mantienen. Esto puede llevar a deducir que el comportamiento del material conlleva a mantener los principios de funcionamiento del motor.

6. REFERENCIAS

- Barona, G. y Velasteguí, L. (2020). Materiales de aleación aluminio-silicio aplicados en la fabricación de partes de motores de combustión interna alternativos Parte II. *Ciencia digital*, 3(2).
<https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i2.1203>
- Basshuyen, RV. y F. Schäfer (2017). *Internal Combustion Engine Handbook*. Segunda edición.
- Callister, D. y Retwisch, D. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Segunda edición.
- Camiño, F. (2017). *Diseño de un proceso de fundición de aleaciones de aluminio*. [Tesis]. Repositorio Coruña.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2022). *Ciencia, tecnología e innovación: Cooperación, integración y desafíos regionales*.
www.cepal.org/apps

- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2022). *Hacia la transformación del modelo de desarrollo en América Latina y el Caribe: producción, inclusión y sostenibilidad*.
- Chica, L., Rocha, J., Gómez, J. y Cabascango P. (2019). Análisis del sistema de producción y caracterización microestructural para evaluar el comportamiento mecánico de chasis de vehículo fabricado por extrusión. *Ciencia digital*, 3(1) 461-480. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i1.349>
- Echavarría, AV. Y Orrego, GP. (2012). Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas. *Revista-UDEA*, 51(34). DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.rcm.11281>
- Kalpakjian, S. y Schmid, SR. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Quinta edición.
- Kleiner, M., Geiger, M., y Klaus, A. (2003). Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 52(2), 521-542. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60202-9
- Montes, JM., Cuevas, FG y Cintas, J. (2014). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Primera edición.
- Newell, J. (2011). *Ciencia de los materiales, aplicaciones en ingeniería*. Alfaomega, México.
- Padilla, C., Cuaical, B., & Buenaño, L. (2019). Análisis microestructural y diseño de cigüeñal y biela de un motor mono cilíndrico de 4 tiempos. *Ciencia Digital*, 3(1), 246-264. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i1.293>