

Efecto de la temperatura de colado en coquilla y la adición de Se a una aleación base Al para uso automotriz sobre sus propiedades mecánicas y microestructurales

Effect of die casting temperature and Se addition to an Al-based alloy for automotive use on its mechanical and microstructural properties

Jhoana J. Mendoza Castañeda ^a, Carlos E. Borja Soto ^b, José L. Rodríguez Muñoz ^c, Justo F. Montiel Hernández ^d, Jorge A. Verduzco Martínez ^e

Abstract:

This work presents some of the progress made in an initial investigation of the effect of Se addition on the mechanical and microstructural properties of an ANSI AA (ISO) 319.0 alloy cast in an ASTM A36 structural steel mold. Cylindrical bars of 3.34 cm diameter and 20 cm length were obtained. One of the bars was obtained without Se addition and cast at 610 °C. Two cylindrical bars with 0.05% Se by weight were also obtained and cast at 610 °C and 720 °C. The ingots were machined to obtain specimens for mechanical testing in tension, compression, and hardness. Their microstructural characterization was also performed. The addition of Se slightly increases the hardness value of the ANSI AA (ISO) 319.0 alloy when cast at 610 °C (73.33 HRB) compared to the same alloy without the addition of Se (69.05 HRB); an increase of 4.28 HRB. The casting temperature also affected the hardness value in the alloy with the addition of Se cast at 720 °C, since it presented a hardness value of 65.07 HRB, since it was qualitatively increased in the size of the phases present in the material. The addition of Se and casting temperature modified the hardness, mechanical resistance to compression and tension. It was not possible to observe intermetallic particles of the $Al_{12}Mg_{17}$ and Al_2Se_3 phases, so it is necessary to carry out microstructure studies in a scanning electron microscope and structural studies using the X-ray diffraction technique, which are left as future work in the investigation.

Keywords:

Alloy, mechanical properties, additions, casting, hardness.

Resumen:

El presente trabajo muestra algunos de los avances en una investigación inicial acerca del efecto de la adición de Se sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de una aleación ANSI AA (ISO) 319.0 colada en un molde metálico de acero estructural ASTM A36. Fueron obtenidas barras cilíndricas de 3.34 cm de diámetro y 20 cm de largo. Una de las barras fue obtenida sin adición de Se y colada a 610 °C. También fueron obtenidas dos barras cilíndricas con adición de 0.05 % Se en peso, las cuales fueron coladas a 610 °C y 720°C. Los lingotes fueron maquinados para obtener probetas para realizar ensayos mecánicos a la tensión, compresión y dureza. También fue realizada su caracterización microestructural. La adición de Se aumenta ligeramente el valor de dureza de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 cuando esta es colada a 610 °C (73.33 HRB) respecto a la misma aleación sin adición de Se (69.05 HRB); un incremento de 4.28 HRB. La temperatura de colado también afectó el valor de dureza en la aleación con adición de Se colada a 720°C, ya que presentó un valor de dureza de 65.07 HRB, debido a que cualitativamente fue incrementado en el tamaño de las fases presentes en el material. La adición de Se y temperatura de colado modificó la dureza, resistencia mecánica a la compresión y a la tensión. No fue posible observar partículas intermetálicas de las fases $Al_{12}Mg_{17}$ y Al_2Se_3 , por lo cual resulta necesario realizar

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4296-7984>, Email: me449287@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/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^c 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

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0001-6890-6069>, Email: justo_montiel@uaeh.edu.mx

^e Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo | Morelia-Michoacán | México, <https://orcid.org/0000-0002-5713-9025>, Email: jorge.verduzco@umich.mx

estudios de microestructura en un microscopio electrónico de barrido y estructurales mediante la técnica de difracción de rayo X, los cuales quedan como trabajo futuro en la investigación.

Palabras Clave:

Aleación, propiedades mecánicas, adiciones, fundición, dureza.

Introducción

Cuando el aluminio se combina con elementos metálicos o no metálicos es posible la obtención de aleaciones metálicas ligeras. Algunas de las propiedades físicas y químicas relevantes de las aleaciones de aluminio son su baja densidad y alta resistencia a la corrosión, entre otras (Aleaciones de aluminio, 2024). El aluminio y sus aleaciones son materiales reciclables que pueden ser reprocesados para la obtención de distintos productos en la industria de la transformación (Reciclaje de aluminio, 2024).

Las aleaciones de aluminio se clasifican en tres grupos que dependen de su proceso de fabricación, estos grupos a su vez se dividen en series numeradas de acuerdo a la información contenida en las tablas 1-3. Las aleaciones de aluminio contenidas en la Tabla 1 pueden ser procesadas mediante el proceso de forja y no pueden ser tratadas térmicamente. En el caso de las aleaciones mostradas en la Tabla 2, estas sí pueden ser forjas y tratadas térmicamente para modificar sus propiedades mecánicas y microestructurales. La Tabla 3 contiene las series de aleaciones de aluminio que son recomendables para obtener piezas fundidas.

Las aleaciones forjadas tratables térmicamente del aluminio se endurecen por medio de precipitación para lograr valores de propiedades mecánicas adecuadas para ser usadas en las estructuras metálicas de las aeronaves (Valdez et al., 2019).

Las aleaciones obtenidas por medio de fundición son aplicadas principalmente en componentes de suspensión, componentes de fuselajes, carcasas de transformadores eléctricos, maquinaria y equipos industriales. En el caso de la aleación Serie ANSI AA (ISO) 319.0, esta es usada en blocks, cabezotes y cárteres para motores de combustión interna en automóviles. Misma que es procesada mediante fundición en molde de arena y moldes permanentes metálicos. Algunas de las propiedades mecánicas de dicha aleación son el módulo de Young, $E = 74 \text{ GPa}$ y esfuerzo máximo, $\sigma_y = 165 - 185 \text{ MPa}$, entre otras (López et al., 2020).

Tabla 1. Aleaciones de aluminio forjadas no tratables térmicamente (ASM International, 2015). Fuente: Elaboración propia.

Serie	Elemento de aleación
-------	----------------------

1XXX	Al puro $\geq 99\%$
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg

Tabla 2. Aleaciones de aluminio forjadas tratables térmicamente (ASM International, 2015). Fuente: Elaboración propia.

Serie	Elemento de aleación
2XXX	Cu
6XXX	Mg y Si
7XXX	Zn
8XXX	Otros

Tabla 3. Aleaciones de aluminio por fundición (ASM International, 2015). Fuente: Elaboración propia.

Serie	Elemento de aleación
2XX.X	Cu
3XX.X	Si, Cu, Mg
4XX.X	Si
7XX.X	Zn
8XX.X	Sn

Las aleaciones de aluminio forjadas no tratables térmicamente se obtienen mediante los procesos de manufactura como laminado, extrusión o forjado; debido a que deben ser endurecidas por trabajo en frío. Son mayormente aplicadas en envases, chasis de vehículos, pistones y bloques de motor; esto debido a su resistencia y ductilidad (ASM International, 2015).

Las aleaciones de la serie 5XXX contienen magnesio en su composición química y se caracterizan por ser más resistentes a la corrosión respecto a las otras series de aleaciones de aluminio. Debido a las transformaciones de fase que ocurren al reaccionar la fase matriz de aluminio y el magnesio conducen a la formación de partículas del intermetálico $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$, el cual es frágil y duro (Konieczny, 2024). Por lo tanto, tal intermetálico potencialmente podría incrementar la resistencia mecánica de las aleaciones de aluminio que contengan magnesio en la composición química. La Figura 1 muestra el diagrama de fases Al-Mg que ha sido reportado en la literatura (Murray, 1988). En dicho diagrama se observa que la formación de diferentes

tipos de intermetálicos dependen de la cantidad de magnesio en el sistema de aleación.

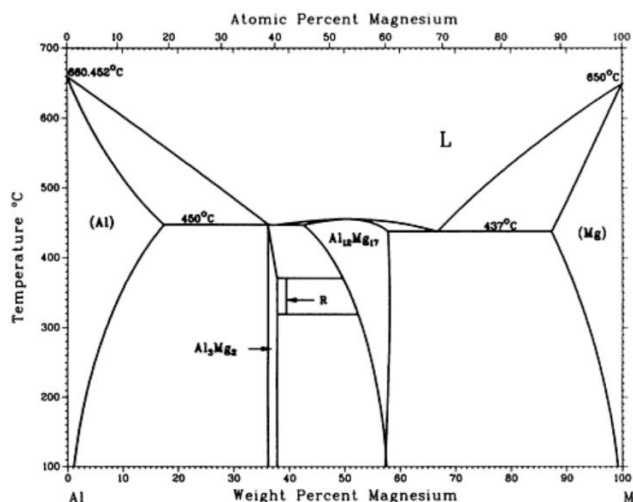


Figura 1. Diagrama de fases Al-Mg. Fuente: Murray, 1988.

Por otra parte, el uso del selenio como elemento de aleación en aleaciones base aluminio no es convencional debido a riesgos de seguridad en su manejo. Sin embargo, existen algunos trabajos en donde ha sido implementado para la formación de capas que actúan como recubrimiento sin estar disueltas en todo el volumen del material (Ze Shao et al., 2022).

La Figura 2 muestra el diagrama de equilibrio Al-Se que ha sido reportado en la literatura (Howe, 1989). De acuerdo con el diagrama binario, la reacción que ocurre entre el aluminio y el selenio genera el intermetálico Al_2Se_3 . La formación de compuestos intermetálicos en las aleaciones metálicas ocurre debido a que los elementos que reaccionan no cumplen con los requisitos para la formación de aleaciones sólidas. La cantidad del intermetálico Al_2Se_3 depende de la cantidad de selenio en la composición química en el sistema de aleación.

El selenio es un elemento de origen volcánico que surge principalmente como un producto secundario de los procesos electrolíticos de la refinación del cobre. Es mayormente utilizado en componentes fotoeléctricos (Acosta, 2007). El compuesto Al_2Se_3 es la única fase intermedia confirmada en el sistema Al-Se. Debido a la considerable volatilización del selenio durante la fusión puede formar inclusiones o fases intermedias poco útiles y se corre el riesgo de gases o vapores tóxicos (SeO_2) si hay oxígeno (Howe, 1989). Por lo tanto, el selenio tendría que ser agregado como elemento de aleación una vez que el baño metálico ha sido desoxidado. Adicionalmente, el selenio deberá ser integrado al líquido metálico mediante su inmersión hasta el fondo del crisol en donde se esté procesando la aleación de aluminio. La aleación ANSI AA (ISO) 319.0 pertenece a la serie 3XX.X, cuyos elementos de aleación principales son el silicio y el cobre. Esto de

acuerdo a la composición química en peso: 5.5 - 6.5 % Si, 3.0 - 4.0 % Cu, máximo 1.0 % Fe, máximo 0.5 % Mn, máximo 0.5 % Mg, máximo 0.5 % Ni y máximo 1.0 % Zn. Dicha aleación es usada para la fabricación de piezas por fundición para la obtención de componentes automotrices tales como bloques de motor y cabezales, entre otros componentes.

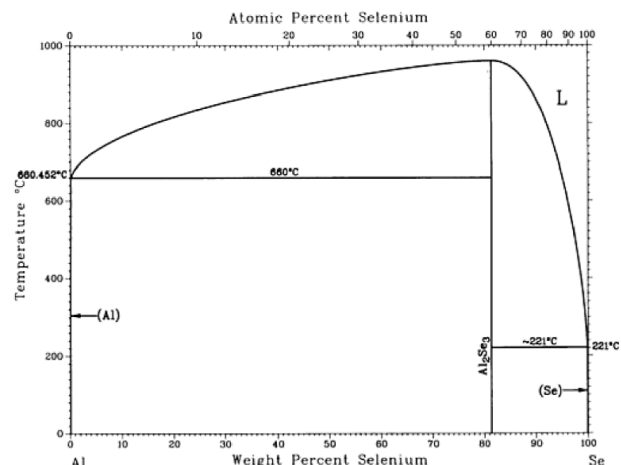


Figura 2. Diagrama de fases Al-Se. Fuente: Howe, 1989.

Cabe mencionar que la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 puede ser tratada térmicamente para aumentar su resistencia mecánica mediante tratamiento térmico de precipitación (Cast Aluminum, 2025). La nomenclatura de las aleaciones de aluminio ha sido establecida por organizaciones internacionales tales como el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) y la Organización Internacional de Estandarización (ISO). El presente trabajo es un avance en la investigación acerca del efecto de la adición de selenio sobre las propiedades mecánicas y microestructurales de una aleación ANSI AA (ISO) 319.0. La aleación fue procesada mediante fundición y colada en moldes metálicos de acero estructural ASTM A36. Cabe mencionar que no existe información en la literatura en relación al tema de estudio de este trabajo. La adición de selenio a la aleación fue con la intención de promover la formación de partículas de intermetálicos que pudieran incrementar la resistencia mecánica de la aleación procesada. Adicionalmente, la aleación con adición de selenio fue colada al molde a las temperaturas de 610 °C y 720 °C, esto para conocer el efecto de temperatura de procesamiento en las propiedades mecánicas del material.

Metodología

Fueron obtenidos lingotes de la aleación de aluminio aleación ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de selenio amorfo gris en 0.05% en peso. Adicionalmente uno de los

lingotes fue obtenido sin adiciones para ser considerado como referencia en cuanto a sus propiedades mecánicas y microestructurales; de tal manera que dichas propiedades pudiesen ser comparadas respecto a los materiales con adición de selenio. Las dimensiones de los lingotes obtenidos fueron de 3.34 cm de diámetro y 20 cm de altura. La aleación fue procesada en un horno eléctrico de resistencias de la marca Nabertherm equipado con un crisol de grafito. Los materiales procesados fueron colados a las temperaturas de 610 °C y 720 °C. La Figura 3 muestra un modelo tridimensional del molde rectangular que fue usado para la obtención de los lingotes cilíndricos, cuyas dimensiones fueron establecidas en 3.34 cm de diámetro interior, 23 cm de altura y 81 cm² de sección transversal cuadrada. Antes realizar la adición de selenio, el baño metálico fue desoxidado y desgasificado con adiciones de 0.2% y 0.5% en peso de desoxidante y desgasificante, respectivamente.

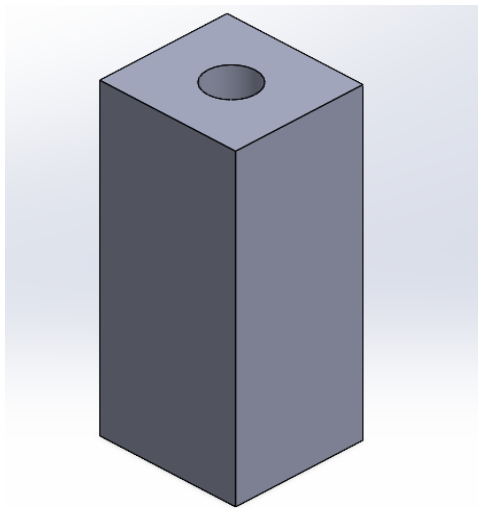


Figura 3. Molde de fundición. Fuente: Elaboración propia.

El metal fue colocado por gravedad en el molde metálico para la obtención de las barras cilíndricas. El selenio fue agregado mediante inmersión hasta el fondo del crisol para evitar la formación de vapores tóxicos. Los materiales obtenidos fueron caracterizados mecánicamente mediante ensayos de dureza en un durómetro marca HOYTOM modelo Duplex-713-SR, esto de acuerdo con la norma ASTM E18. También fueron realizados ensayos mecánicos a la tensión y compresión en una máquina universal marca Instron, esto de acuerdo con la norma ASTM E8M. Finalmente, los materiales fueron caracterizados microestructuralmente con un microscopio óptico metalográfico marca Nikon modelo eclipse MA100. El presente trabajo no incluye ensayos de caracterización estructural para la identificación de las fases formadas, ya que serán realizados en trabajos futuros.

Resultados

La Figura 4 muestra el crisol del horno eléctrico que fue usado en el trabajo experimental. La carga metálica introducida al horno fue de 1.127 kg de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0. Antes de iniciar el calentamiento del crisol de horno hasta las temperaturas de trabajo, fue precalentado a 120 °C durante 1 hora para eliminar el agua del crisol, debido a sus propiedades hidrofílicas y el riesgo de fracturarlo.



Figura 4. Carga metálica en el interior del crisol del horno. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 muestra la carga metálica en estado líquido dentro del crisol del horno una vez alcanzada la temperatura de fusión del material.



Figura 5. Baño metálico al interior del crisol del horno. Fuente: Elaboración propia.

La función del desoxidante y el desgasificante consiste en la eliminación de óxidos y la extracción de hidrogeno del baño metálico. Ambos son fundamentales para evitar la formación de inclusiones no metálicas del tipo oxido y la

presencia de porosidades en el material una vez que fue solidificado en el molde metálico.

La Figura 6 muestra una de las mediciones de temperatura que fue realizada mediante la implementación de una cámara termográfica durante el procesamiento del material en el horno. Después de realizar la colada para la solidificación de los materiales, estos fueron desmoldados una vez alcanzada la temperatura ambiente.

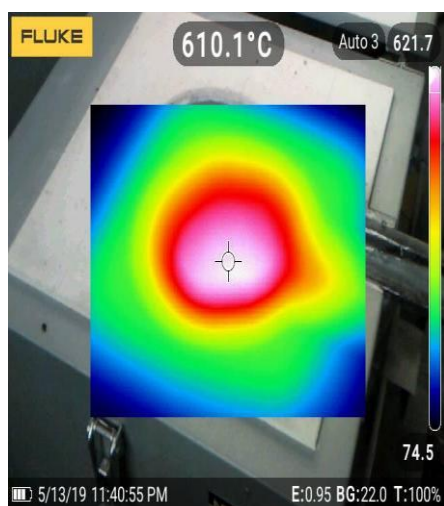


Figura 6. Medición de temperatura con cámara termográfica. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra el material solidificado al interior del molde metálico. Fue posible observar la contracción volumétrica del material por la evidente presencia del rechupe.

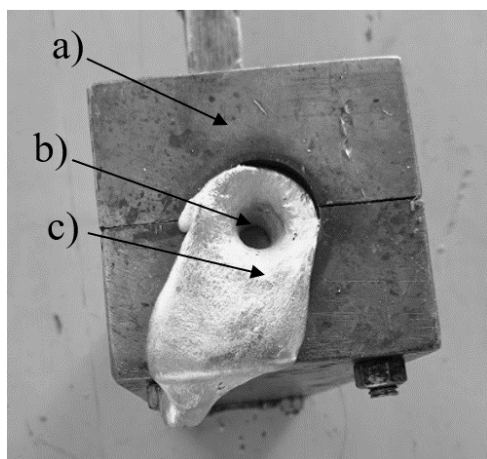


Figura 7. Material solidificado en coquilla. a) molde metálico, b) rechupe y c) lingote. Fuente: Elaboración propia.

La contracción volumétrica ocurre por la diferencia de volúmenes dada la dilatación del material a altas temperaturas. naturalmente por que fue colado en el molde metálico. Cabe mencionar, que el rechupe

generado en los materiales solidificados no afecto la obtención de las probetas para la caracterización del mismo.

La Figura 8 muestra el proceso de torneado que fue llevado a cabo para obtener las probetas para ensayos mecánicos a la tensión. Sin embargo, también fue posible el maquinado del material para la obtención de probetas para realizar ensayos mecánicos a la compresión. El equipo usado fue un torno paralelo manual marca Machino Expo RT modelo C400TM/1 con un chuck de tres mordazas. En cuanto a los parámetros de maquinado en el torno, la velocidad de rotación del material fue establecida en 600 revoluciones por minuto, un avance de 0.002 pulgadas por revolución y el uso de un buril de acero de alta velocidad (AV). Los lingotes obtenidos también fueron usados para obtener discos de 20 mm de diámetro y 10 mm de espesor para ser usados los análisis metalográfico y dureza HRB.



Figura 8. Mecanizado de probetas en torno paralelo. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra los valores de dureza que fueron obtenidos en los materiales obtenidos. El valor promedio de dureza para la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 sin adición de Se colado a 610 °C fue de 69.05 HRB con un error estándar de 0.88. En el caso de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se colada a 610 °C, el valor promedio de dureza que fue obtenido correspondió a 73.33 HRB con un error estándar de 0.89. Finalmente, la misma aleación con adición de Se colada a mayor temperatura (720 °C) obtuvo el valor promedio de dureza más bajo, es decir, 68.07 HRB con un error estándar de 1.3.

Tabla 4. Datos obtenidos de las mediciones de dureza Rockwell B en las aleaciones procesadas. Fuente: Elaboración propia.

ANSI AA (ISO) 319.0 sin adición de Se colada a 610 °C	ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se colada a 610 °C	ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se colada a 720 °C
62.4	70.4	63.8
69.5	69.8	58.4
69.7	77	67.5
69.3	71	69.2
69	74.8	68.8
68.8	69.9	68.9
69.9	73.3	74.2
73.7	74.9	69
67.9	76.3	71.7
70.3	75.9	69.2

La Figura 9 muestra una metalografía de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 sin adición de Se colada a 610°C. Es posible observar la presencia de inclusiones no metálicas. Dos fases en tonalidad gris (oscura y tenue) que corresponderían a las fases $AlSi$ y Al_2Cu , respectivamente. No fue posible identificar las fases formadas por el Mg y Al, tal como $Al_{12}Mg_{17}$ en la aleación, dada la baja cantidad de Mg en 0.5 % en peso como máximo.

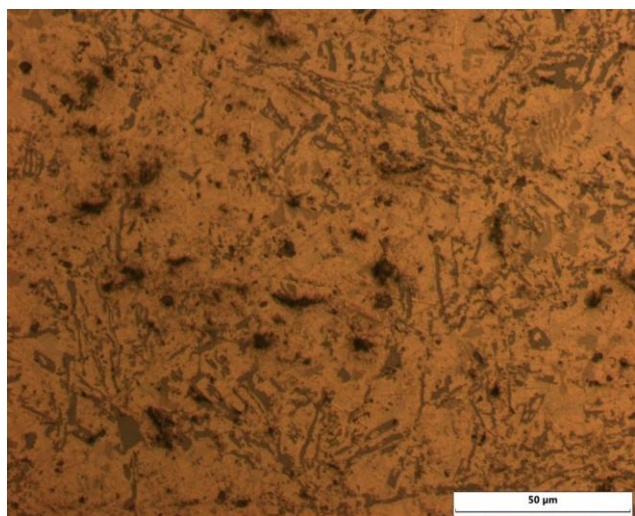


Figura 9. Aleación serie ANSI AA (ISO) 319.0 sin adición de Se en 0.05% en peso colada a 610°C. Imagen tomada a 50 X. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10 muestra una metalografía de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se en 0.05% en peso colada a 610 °C.

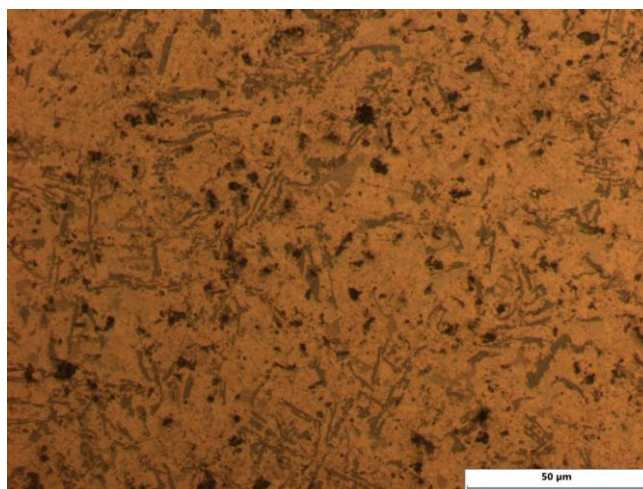


Figura 10. Aleación serie ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se en 0.05% en peso colada a 610°C. Imagen tomada a 50 X. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 11 muestra la metalografía de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se en 0.05% en peso colada a 720 °C. Es importante indicar que la fase Al_2Se_3 no fue observable a 50X en el microscopio óptico metalográfico en los materiales obtenidos. De acuerdo con el diagrama de equilibrio Al–Se sería formado dicho compuesto intermetálico, el cual incrementa la dureza de la aleación de acuerdo a los datos de dureza obtenidos experimentalmente. Por lo tanto, resulta necesario realizar estudios de microestructura en un microscopio electrónico de barrido y estructurales mediante la técnica de difracción de rayo X. Ambos estudios quedan como trabajo futuro.

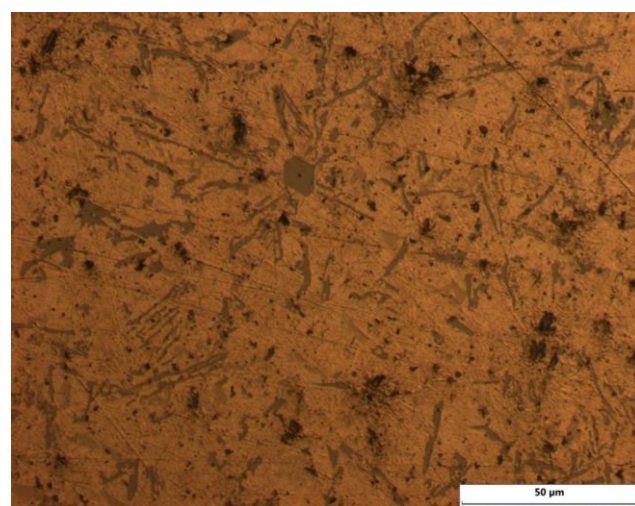


Figura 11. Aleación serie ANSI AA (ISO) 319.0 con adición de Se en 0.05% en peso colada a 720°C. Imagen tomada a 50 X. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 12 muestra las curvas esfuerzo – deformación de los materiales ensayados mecánicamente a la compresión. Es posible observar que el esfuerzo máximo

a la compresión de la aleación con adición de 0.05% en peso colada a 610 °C y 720 °C, correspondieron a 107.31 MPa y 92.27 MPa, respectivamente.

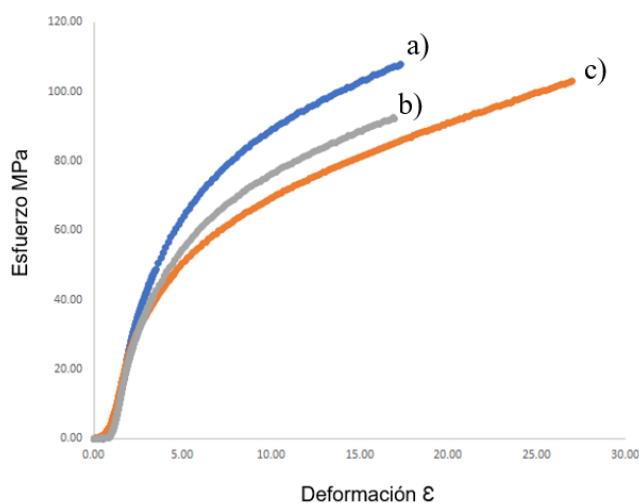


Figura 12. Curvas esfuerzo – deformación que fueron obtenidas mediante ensayos mecánicos a la compresión. a) curva de la probeta colada a 610°C con adición de Se, b) curva de la probeta colada a 720°C con adición de Se y c) curva de la probeta sin adición de Se colada a 610°C. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, la temperatura de colado tuvo un efecto sobre la resistencia mecánica. En el caso de la aleación sin adición de Se colada a 610 °C (naranja) el valor de resistencia mecánica a la compresión fue de 81 MPa para una deformación plástica a $\epsilon = 15$, aproximadamente. Sin embargo, dicha aleación presentó mayor ductilidad al alcanzar una deformación plástica total alrededor de $\epsilon = 27.5$ y un valor de esfuerzo máximo de $\sigma_y = 103.15$ MPa.

El incremento de resistencia mecánica durante la deformación plástica es debido al fenómeno de endurecimiento por deformación que ha sido descrito ampliamente en la literatura (Askeland, 2011). El módulo de Young o módulo de elasticidad, E, para los materiales ensayados a la compresión fue de 0.0374 MPa, aproximadamente.

La Figura 13 muestra las curvas obtenidas mediante ensayos mecánicos a la tensión de los materiales procesados mediante fundición. Los materiales con 0.05 % de Se mostraron mayor resistencia mecánica a la tensión para una deformación $\epsilon = 9.0$; dado el efecto de la temperatura de colado en la coquilla y la adición de Se. La aleación con adición de Se colada a 610 °C fue la que mostró mayor resistencia mecánica a la tensión (curva azul) $\sigma_y = 13.71$ MPa. En caso de la aleación con adición de Se colada a 720 °C (curva verde), esta presenta una tendencia similar a la aleación colada a 610 °C. Sin

embargo, falló prematuramente por la presencia de porosidad, por ello mostró un valor de resistencia a la tensión $\sigma_y = 10.94$ MPa. En el caso de la aleación sin adición de Se (curva naranja) la deformación total fue la mayor obtenida $\epsilon = 18.41$. Respecto al valor obtenido del módulo de Young para los tres materiales, este fue de 0.436 MPa, aproximadamente. Dicho valor de módulo de elasticidad es muy aproximado al valor obtenido mediante ensayo mecánico a la compresión 0.374 MPa. La diferencia entre ambos módulos fue de 0.062 MPa.

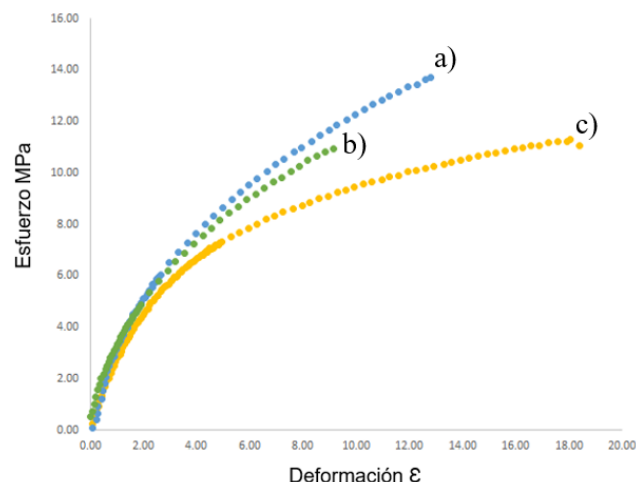


Figura 13. Curvas esfuerzo – deformación que fueron obtenidas mediante ensayos mecánicos a la tensión. a) curva de la probeta colada a 610°C con adición de Se, b) curva de la probeta colada a 720°C con adición de Se y c) curva de la probeta sin adición de Se colada a 610°C. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Fue posible la obtención de lingotes de la aleación estudiada mediante fundición y colada en molde metálico. El valor de dureza de la aleación ANSI AA (ISO) 319.0 aumenta ligeramente con la adición de Se cuando es colada a 610° C. El incremento de la temperatura de colado también afecta las propiedades mecánicas del material por el incremento del tamaño y distribución de las fases. No fue posible observar las fases Al_2Se_3 y $Al_{12}Mg_{17}$ en las metalografías obtenidas a 50X, dados los contenidos bajos de los elementos Mg y Se en la aleación. La temperatura de colado también modifica las propiedades mecánicas, ya que la dureza de la aleación con adición de Se disminuyó su dureza cuando fue colada a 720 °C. El presente trabajo inicial deberá ser ampliado mediante el estudio de los materiales mediante las técnicas de microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X.

Referencias

- Acosta, L. (2007). *El selenio*. Laboratorio Santa Elena, Uruguay: Disponible en: http://www.produccionanimal.com.ar/suplementacion_mineral/95-selenio.pdf. Fecha de consulta, 8(01), 2014.
- Aleaciones de aluminio. (2024). Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico, Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 23 de marzo de 2025, de <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/aleaciones-de-aluminio>
- Anderson, K., Weritz, J., & Kaufman, J. G. (Eds.). (2018). *Aluminum science and technology*, Vol. 2A, ASM handbook. ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02a.9781627082075>
- Askeland, D. R., Wright, W. J., & Wheatley, D. (2022). *Ciencia e ingeniería de materiales* (8.ª ed.). Cengage Learning.
- ASM International Handbook (1992). *Alloy phase diagrams*. Volume 3. Materials Park, OH: ASM International.
- ASM International Handbook. (2004). *Metallography And Microstructures*. Volume 9. (ASM Handbook).
- ASM International. (2015). *Aluminum and aluminum alloys: Subject guide*. ASM International. <https://www.asminternational.org/aluminum-and-aluminum-alloys-subject-guide/>
- ASTM International. (2018). *ASTM E9 - 19 Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM E8/E8M – 21 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM International.
- Cast Aluminum. (s.f.). Makeitfrom.com. Recuperado el 16 de octubre de 2025, de <https://www.makeitfrom.com/material-properties/319.0-SC64D-A03190-Cast-Aluminum>
- Gol'dshteyn, Ya. E., Mushtakova, T. L., & Komissarova, T. A. (1980). *Effect of selenium on the structure and properties of structural steel*. Metal Science and Heat Treatment, 21(10), 741–746. <https://doi.org/10.1007/BF00751269>
- Howe, J. M. (1989). *The Al-Se (aluminum–selenium) system*. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 10(6), 650–651. <https://doi.org/10.1007/BF02880677>
- Konieczny, M. (2024). *Mechanical properties and wear characterization of Al-Mg composites synthesized at different temperatures*. AIMS Materials Science, 11(2), 309–322. <https://doi.org/10.3934/matisci.2024017>
- López, G. B., & López, E. V. (2020). *Materiales de aleación aluminio-silicio aplicados en la fabricación de partes de motores de combustión interna alternativos Parte II*. ConcienciaDigital, 3(2), 6-16. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i2.1203>
- Reciclaje de aluminio: ¿por qué es clave para la economía circular? (2024, 31 de octubre). Residuos Expo. Recuperado de <https://residuosexpo.com/2025/reciclaje-de-aluminio-por-que-es-clave-para-la-economia-circular/>
- Shao, E.-Z., Liu, K., Xie, H., Geng, K., Bai, K., Qiu, J., Wang, J., Wang, W.-X., & Song, J. (2022, octubre). *A new alloy for Al-chalcogen system: AlSe surface alloy on Al*. <https://arxiv.org/abs/2210.08739>
- Valdez Melgoza, L. A., Garay Reyes, C. G., Ruíz Esparza Rodríguez, M., Maldonado Orozco, M. C., & Martínez Sánchez, R. (2019). *Aleaciones de aluminio*. Calidad en la industria aeroespacial. CyD (Conacyt). Recuperado de <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=370>