

Evaluación de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de aleaciones Al_5Mg y $Al_{10}Mg$ modificadas con 2% de Zn después del tratamiento térmico de envejecimiento

Evaluation of the mechanical and metallurgical properties of Modified Al_5Mg and $Al_{10}Mg$ alloys with 2% Zn after aging heat treatment

Álvaro José Cotes Toro¹, Dino Carmelo Manco-Jaraba², Elías Ernesto Rojas Martínez³

¹Ingeniero Metalúrgico, M. Sc. Gerencia de Proyectos de Investigación y Desarrollo,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9646-8553>

²Ingeniero de Minas, M. Sc. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Universidad de La Guajira.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8506-094X>

³Geólogo, Ms Sc. Geología Económica, Fundación Universitaria del Área Andina, Grupo de Investigación en Ingeniería Geológica. Valledupar. Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0402-1565>.

Cite this article as: A. J. Cotes Toro, D. C. Manco-Jaraba, E. E. Rojas Martínez "Evaluación de las propiedades mecánicas y metalúrgicas de aleaciones Al_5Mg y $Al_{10}Mg$ modificadas con 2% de Zn después del tratamiento térmico de envejecimiento", *Prospectiva*, Vol. 21 N° 1, 2023.

Recibido: 18/04/2022 / Aceptado: 16/11/2022

<http://doi.org/10.15665/rp.v21i1.2948>

RESUMEN

Desde la antigüedad el hombre ha utilizado diversos materiales y muchos de ellos los ha combinado, con el fin de mejorarle sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas para darle diversos usos. Esta investigación tiene como objetivo determinar la influencia de la adición de una pequeña cantidad de zinc (2%) sobre las propiedades mecánicas de dos aleaciones representativas de Aluminio- Magnesio, como son Al_5Mg y $Al_{10}Mg$. Metodológicamente el procedimiento utilizado cuenta inicialmente con una revisión del estado del arte sobre los principios de tratamientos térmicos bases o fundamentales, posteriormente se realizó el diseño de la colada para la obtención de las probetas en condiciones óptimas. El desarrollo experimental constó de la selección del medio de moldeo, diseño de modelos, fusión y proceso de tratamiento térmico de envejecimiento artificial y natural de la aleación Aluminio - Magnesio modificada. Subsiguientemente, se efectuaron pruebas de valoración de propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, dureza), y parámetros metalúrgicos (colabilidad, agrietamiento en caliente). Las probetas con contenido de 10% Mg envejecidas a 14 horas a una temperatura de 150°C, y las probetas con contenidos del 5% de Mg envejecidas a 16 horas a una temperatura de 150°C registraron las mejores propiedades mecánicas, al igual que las probetas de Al_5Mg sometidas al tratamiento térmico (homogenización y temple) envejecidas por 30 días. Concluyendo que el contenido de Zn añadido tuvo un efecto directo en los resultados obtenidos en el tratamiento térmico (solubilización, temple y envejecido artificial), en cuanto al mejoramiento de las propiedades mecánicas.

Palabras clave: Aleaciones de aluminio-magnesio, Envejecimiento, Tratamientos térmicos.

ABSTRACT

Since ancient times, man has used different materials and many of them have been combined in order to improve their physicochemical and mechanical properties for different uses. The objective of this research is to determine the influence of the addition of a small amount of zinc (2%) on the mechanical properties of two representative Aluminum-Magnesium alloys, such as Al_5Mg and $Al_{10}Mg$. Methodologically, the procedure used initially included a review of the state of the art on the principles of basic or fundamental heat treatments, then the design of the casting was carried out to obtain the specimens under optimum conditions. The experimental development consisted of the selection of the molding medium, model design, melting and heat treatment process of artificial and natural aging of the modified Aluminum-Magnesium alloy. Subsequently, tests were carried out to evaluate mechanical properties (tensile strength, hardness) as well as metallurgical parameters (castability, hot cracking). The

specimens with 10% Mg content aged for 14 hours at a temperature of 150°C, and the specimens with 5% Mg content aged for 16 hours at a temperature of 150°C recorded the best mechanical properties, as did the Al₅Mg specimens subjected to heat treatment (homogenization and quenching) aged for 30 days. It was concluded that the added Zn content had a direct effect on the results obtained in the heat treatment (solubilization, quenching and artificial aging), in terms of the improvement of the mechanical properties.

Keywords: Aluminum-magnesium alloys, Aging, Heat treatments.

1. INTRODUCCIÓN

El aluminio es uno de los principales materiales utilizados en la industrial moderna, debido a la combinación de algunas propiedades que lo hacen muy útil en diversas aplicaciones, como su baja densidad y su alta resistencia a la corrosión, es un buen conductor de la electricidad, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato [1]–[3]. Por consiguiente, es el metal más industrialmente utilizado después del acero. Sin embargo, a pesar de la enorme aplicabilidad del aluminio en nuestros días, sólo se le conoce como metal desde hace aproximadamente 180 años, siendo un metal relativamente joven en la escena industrial mundial, si es comparado con otros metales como el hierro, el cual influye en nuestra vida desde hace más de dos mil años [4], [5].

Los continuos avances tecnológicos obligan cada día a buscar nuevos materiales con mejores propiedades, debido a que la resistencia mecánica del aluminio puro es muy baja para muchas aplicaciones en la actualidad [6]–[8]. Para conseguir materiales de mayor resistencia o de determinadas propiedades se hace necesario alearlo con otros elementos, principalmente cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc, que influyen en una mayor resistencia mecánica, como también sobre otras propiedades [9]–[12].

Dentro de nuevas aleaciones se encuentran las denominadas grupo 5XXX, o aleaciones Aluminio – Magnesio, con un contenidos de magnesio hasta 12%, que han adquirido importancia industrial, debido a su bajo peso y buenas propiedades mecánicas, al igual que las aleaciones ternarias aluminio - magnesio –zinc, que presentan teóricamente una elevada resistencia mecánica, de tal forma que su uso se ha incrementado en sectores como el aeronáutico, donde son utilizadas para piezas estructurales, automovilístico, rines, piezas decorativas; y gracias a su elevada resistencia a la corrosión y a los ambientes salinos encontró aplicaciones en la industria marítima, de tal forma que brindan nuevas alternativas y herramientas para explorar y manipular [9], [13]–[19].

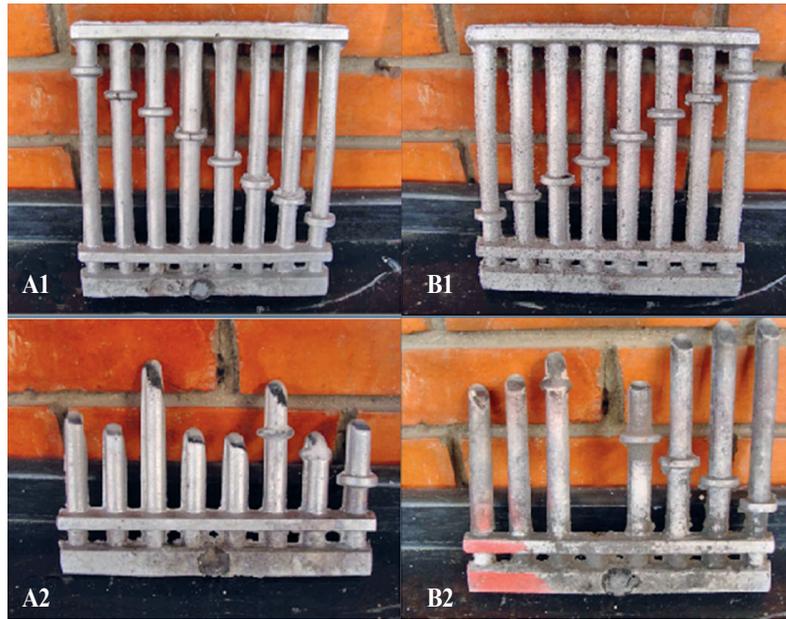
Esta investigación se centra en la respuesta al tratamiento térmico de envejecimientos de dos aleaciones representativas del grupo 5XXX, Al₅Mg y Al₁₀Mg, buscando ofrecer un aporte académico y científico, al desarrollo de nuevas perspectivas y campos de aplicación para estas aleaciones, siempre de la mano con la necesidad de nuevos materiales con características especiales para aplicaciones específicas.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación desarrolla una metodología de tipo experimental, donde inicialmente se procedió con una revisión de antecedentes sobre los principios de tratamientos térmicos bases o fundamentales; posteriormente, se diseñó la colada para la consecución de las probetas en condiciones óptimas, con bases de datos encontrados en la guía Foseco de fundición [20].

Se elaboraron cuatro aleaciones, divididas en dos grupos. El grupo A fue subdividido en A1 (Al₅Mg) en condición As Cast, colada de arena y A2 (Al₅Mg₂Zn) en condición colada de arena; El grupo B es subdividido en B1 (Al₁₀Mg) en condición As Cast, colada de arena y en B2 (Al₁₀Mg₂Zn) en condición colada de arena. Estas aleaciones fueron sometidas a tratamiento térmico de envejecimiento (solubilizadas, templadas y envejecidas artificialmente). A las probetas ya envejecidas se le realizaron pruebas de valoración de propiedades mecánicas (resistencia a la tracción, dureza), al igual que pruebas de parámetros metalúrgicos (colabilidad, agrietamiento en caliente).

Figura 2. Probeta de agrietamiento en caliente de la aleación A1 (Al₅Mg), B1 (Al₁₀Mg), A2 (Al₅Mg₂Zn) y B2 (Al₁₀Mg₂Zn).
Figure 2. Testing of hot cracking of alloy A1 (Al₅Mg), B1 (Al₁₀Mg), A2 (Al₅Mg₂Zn) and B2 (Al₁₀Mg₂Zn).



Ensayo de dureza

La dureza de las probetas fue determinada utilizando la escala Rockwell B (Figuras 3-5), empleando un durómetro marca Wilson CLARK INSTRUMENT. El equipo fue previamente calibrado mediante el uso de bloques de calibración:

Bloque de calibración: 84,5 +/- 1,0 HRB.

Resultado obtenido: 84,0 HRB (promedio de 5 tomas).

Figura 3. Gráfico dureza vs tiempo de envejecimiento a 150°C.
Figure 3. Hardness vs. aging time graph at 150°C.

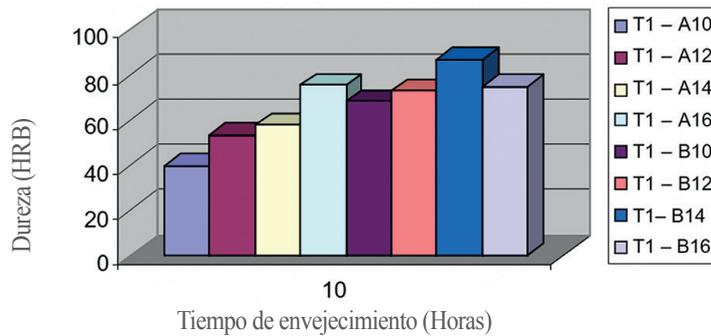


Figura 4. Gráfico dureza vs tiempo de envejecimiento a 200°C.
Figure 4. Hardness vs. aging time graph at 200°C.

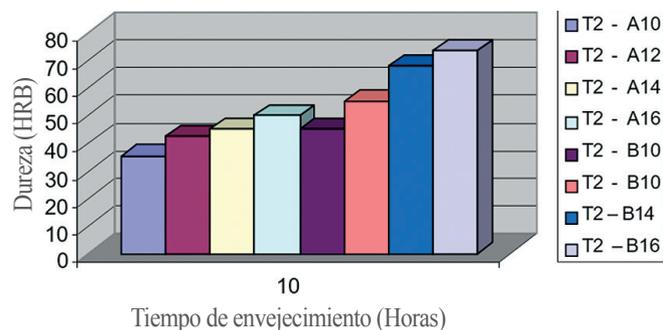
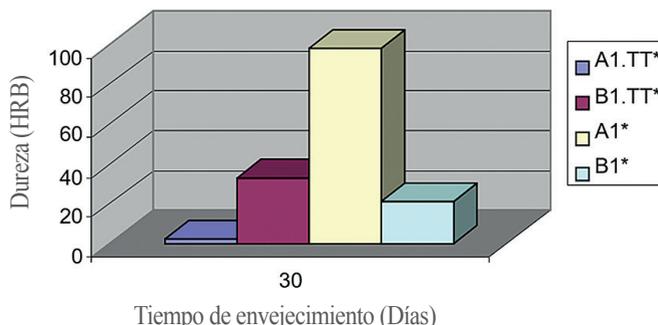


Figura 5. Gráfico dureza vs tiempo de envejecimiento probetas As Cast.
Figure 5. Hardness vs. aging time graph As Cast specimens.



El procedimiento fue realizado eliminando cualquier posibilidad de que la probeta haya sido afectada en la etapa de corte o preparación, efectuando mediciones que garanticen una completa y real valoración del parámetro. Los resultados de dureza Rockwell B obtenidos se exhiben en la tabla 2, donde se muestra una relación directa de la dureza con la concentración de solutos y la temperatura del tratamiento térmico ejecutado para cada probeta, aunado a esto, el tamaño de grano resultado de cada proceso (tiempo y temperatura del tratamiento térmico) también juega un papel fundamental en los resultados obtenidos.

Tabla 2. Ensayo de dureza. TT*=homogenizada a 430°C x 6 horas, temple en agua a 60°C, envejecimiento natural= As Cast, envejecimiento natural.
Table 2. Hardness test. TT*=homogenized at 430°C x 6 hours, quenched in water at 60°C, natural aging= As Cast, natural aging.

Identificación Probeta	Tiempo de permanencia (horas)	Dureza HRB
150°C Al₅Mg₂Zn		
T1 - A10	10	40
T1 - A12	12	58
T1 - A14	14	53.5
T1 - A16	16	75.5
150°C Al₁₀Mg₂Zn		
T1 - B10	10	68.5
T1 - B12	12	73
T1 - B14	14	87
T1 - B16	16	75
200°C Al₅Mg₂Zn		
T2 - A10	10	35.5
T2 - A12	12	40.5
T2 - A14	14	50
T2 - A16	16	42.5
200°C Al₁₀Mg₂Zn		
T2 - B10	10	45
T2 - B12	12	55
T2 - B14	14	73.5
T2 - B16	16	68
As Cast		
A1.TT*	30 días	2.5
B1.TT*	30 días	32.5
A1*	50 días	97.5
B1*	50 días	21

Se observó qué en las probetas A2 la dureza aumenta al incrementar el tiempo del tratamiento térmico debido a la disminución del tamaño de grano al aumentar el tiempo de tratamiento, ocasionándose una obstrucción mayor para

las dislocaciones y asimismo un aumento de la dureza progresivamente. Al aumentar la temperatura se incrementa el crecimiento de los granos y se dan valores más bajos de dureza, razón decisiva para concluir que la mejor temperatura para el tratamiento térmico es a 150°C.

Las probetas B2 cuenta con un comportamiento similar a las encontradas en las probetas A2, con una excepción, no solo se observa un aumento en el tamaño de grano al aumentar la temperatura, sino también que a una temperatura de 200°C en un tiempo de 16 horas decaen los valores de dureza, llegando a la conclusión que las mejores condiciones de trabajo son a 150°C a un tiempo de 14 horas, y que 16 horas es un tiempo muy prolongado para el tratamiento térmico, en las probetas analizadas.

Ensayo de tensión uniaxial

Las probetas fueron sometidas al ensayo de tensión uniaxial con una velocidad de separación de mordazas de 0.1 mm/min. Tras analizar los resultados obtenidos del ensayo de tracción, se pudo observar como la variación de la deformación y el esfuerzo de las diferentes probetas, dependen del tiempo, la temperatura de ensayo del tratamiento térmico y de la concentración de solutos.

En las Tablas 3-4 y en las Figuras 79-93 se describen algunas propiedades mecánicas, de las aleaciones estudiadas.

Tabla 3. Datos de límite elástico y deformación en el límite elástico (en %)
 Table 3. Elastic limit and deformation data at the elastic limit (in %).

150°C				
Tiempo de envejecido (Horas)	Al ₅ Mg ₂ Zn		Al ₁₀ Mg ₂ Zn	
	Límite Elástico (N/mm ²)	Deformación (%)	Límite Elástico (N/mm ²)	Deformación (%)
10	152,131	1,88222	212,526	2,26444
12	151,418	1,66222	213,975	2,4
14	166,818	1,91778	216,21	2,54889
16	191,084	2,32667	199,042	2,40667

200°C				
Tiempo de envejecido (Horas)	Al ₅ Mg ₂ Zn		Al ₁₀ Mg ₂ Zn	
	Límite Elástico (N/mm ²)	Deformación (%)	Límite Elástico (N/mm ²)	Deformación (%)
10	151,418	1,66222	103,759	1,24955
12	188,874	2,57556	163,748	2,39111
14	168,82	2,12	172,369	2,1
16	158,45	1,4	136,25	1,125

Figura 6. Gráfico esfuerzo vs deformación As Cast. Las probetas de A1.TT* y B1.TT* fueron homogenizadas a 430°C x 6 horas, temple en agua a 60°C, envejecimiento natural. Las probetas A1* y B1 son As Cast con envejecimiento natural.
 Figure 6. Stress vs. strain graph As Cast. Specimens A1.TT* and B1.TT* were homogenized at 430°C x 6 hours, quenched in water at 60°C, natural aging. Specimens A1* and B1 are As Cast with natural aging.

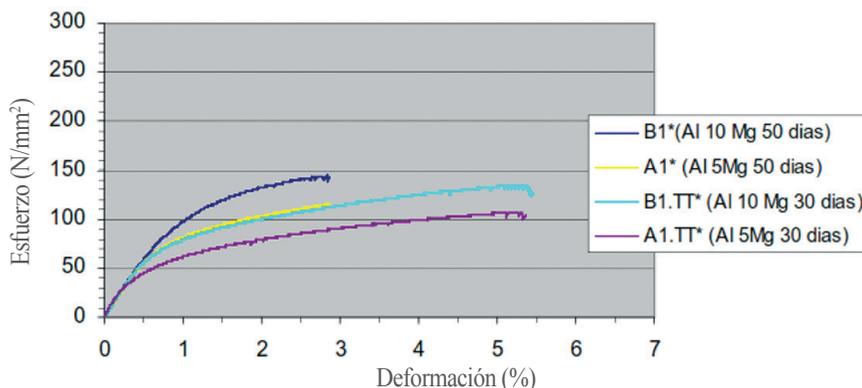
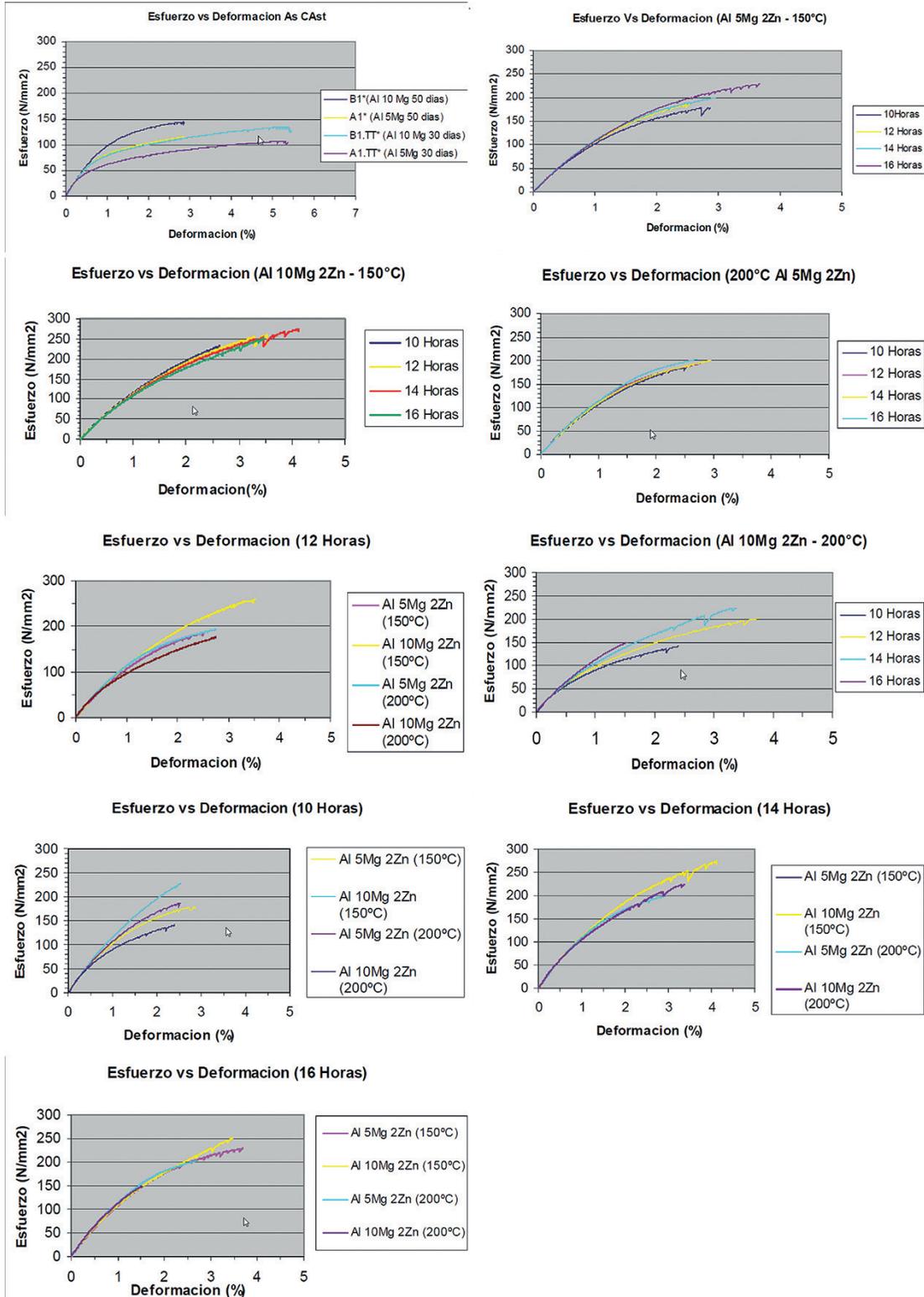


Figura 7. Gráficos de esfuerzo vs deformación aleaciones. A: A2 (Al₅Mg₂Zn) envejecida artificialmente a 150°C; B: B2 (Al₁₀Mg₂Zn) envejecida artificialmente a 150°C; C: A2 (Al₅Mg₂Zn) envejecida artificialmente a 200°C; D: B2 (Al₁₀Mg₂Zn) envejecida artificialmente a 200°C; E: A2 (Al₅Mg₂Zn) y B2 (Al₁₀Mg₂Zn) envejecida artificialmente durante 10 horas; F: A2 (Al₅Mg₂Zn) y B2 (Al₁₀Mg₂Zn) envejecida artificialmente durante 12 horas; G: A2 (Al₅Mg₂Zn) y B2 (Al₁₀Mg₂Zn) envejecida artificialmente durante 14 horas; H: A2 (Al₅Mg₂Zn) y B2 (Al₁₀Mg₂Zn) envejecida artificialmente durante 16 horas.

Figure 7. Stress vs. strain plots Alloys. A: A2 (Al₅Mg₂Zn) artificially aged at 150°C; B: B2 (Al₁₀Mg₂Zn) artificially aged at 150°C; C: A2 (Al₅Mg₂Zn) artificially aged at 200°C; D: B2 (Al₁₀Mg₂Zn) artificially aged at 200°C; E: A2 (Al₅Mg₂Zn) and B2 (Al₁₀Mg₂Zn) artificially aged for 10 hours; F: A2 (Al₅Mg₂Zn) and B2 (Al₁₀Mg₂Zn) artificially aged for 12 hours; G: A2 (Al₅Mg₂Zn) and B2 (Al₁₀Mg₂Zn) artificially aged for 14 hours; H: A2 (Al₅Mg₂Zn) and B2 (Al₁₀Mg₂Zn) artificially aged for 16 hours.



Se puede ver como en las probetas A2 las curvas de esfuerzo muestran una relación directamente proporcional entre esfuerzo, tiempo y temperatura, exceptuando los datos registrados en un tiempo de 16 horas, que son mayores en la curva a condiciones de temperatura de 150°C, comparadas con los datos que resultan del ensayo a temperatura de 200°C (donde se registran decrecimiento en los valores del esfuerzo en comparación a los datos obtenidos en un periodo de tiempo de 14 horas). Con respecto a la deformación, las curvas nos muestran que hay un comportamiento directamente proporcional de la deformación con el tiempo e inversamente proporcional con la temperatura.

Estas probetas sirven de modelo para el mecanismo convencional de endurecimiento por precipitación, por tanto, muestran un comportamiento directo o inversamente proporcional con el tiempo, la temperatura o concentración de solutos.

Las probetas B2 muestran curvas que no permiten establecer una relación directa o inversamente proporcional entre tiempo, temperatura, deformación o esfuerzo, por el contrario, se observa como las curvas cambian bruscamente con el aumento del tiempo o de la temperatura de ensayo. Este fenómeno, se notó físicamente en el comportamiento dentado de las probetas llamado flujo serrado, teóricamente es debido al producto de la interacción entre las dislocaciones móviles y átomos de soluto, que se difunden y temporalmente bloquean o aseguran las dislocaciones en el transcurso de la deformación (efecto de Portevin-Le Chatelier) [21]–[24], siendo una herramienta que sirve para sustentar los saltos, o aparición de dientes en cada curva, cuando se analizan individualmente cada una de ellas.

Según los datos registrados en las curvas de esfuerzo vs deformación en condición As Cast, se percibe qué, las probetas que fueron sometidas al tratamiento térmico (homogenización y temple) durante 30 días, reportaron las mejores propiedades mecánicas en el grupo de las probetas en condición As Cast (siendo entre estas la B1.TT*, la que registró mejores propiedades mecánicas), cabe mencionar, que a pesar de este comportamiento, los registros fueron muy bajos en comparación con la probetas con contenidos de Zn.

La resistencia última a la tracción, muestran como las aleaciones con contenido de 5% de Mg tienen un aumento directamente proporcional con el tiempo del tratamiento térmico, registrando el punto más alto de RUT a las 16 horas del tratamiento. Las probetas con contenidos de 10% de Mg, tiene el punto más alto de RUT a las 14 horas del tiempo de tratamiento y decrece hasta el punto mínimo a las 16 horas (Tabla 4).

Tabla 4. Datos de resistencia última a la tracción (RUT) y deformación máxima (en %).
Table 4. Ultimate tensile strength (UTR) and maximum deformation data (in %).

150°C				
Tiempo de envejecido (Horas)	Al ₅ Mg ₂ Zn		Al ₁₀ Mg ₂ Zn	
	RUT (N/mm ²)	Deformación máxima (%)	RUT (N/mm ²)	Deformación máxima (%)
10	178,362	2,86889	232,838	2,63556
12	185,902	2,52889	237,897	3,53556
14	199,14	2,94889	267,616	4,12222
16	229,178	3,68	251,823	3,46667

200°C				
Tiempo de envejecido (Horas)	Al ₅ Mg ₂ Zn		Al ₁₀ Mg ₂ Zn	
	RUT (N/mm ²)	Deformación máxima (%)	RUT (N/mm ²)	Deformación máxima (%)
110	185,902	2,52889	126,552	1,9228
12	193,196	2,76	201,007	3,76
14	199,14	2,94889	223,308	3,37333
16	201,965	2,70222	148,815	1,53111

4. CONCLUSIONES

Las probetas con contenido de 10% Mg envejecidas a 14 horas a una temperatura de 150°C, y las probetas con contenidos del 5% de Mg envejecidas a 16 horas a una temperatura de 150°C registraron las mejores propiedades mecánicas.

Las probetas de Al₅Mg sometidas al tratamiento térmico (homogenización y temple), y envejecidas por 30 días registraron las mejores propiedades mecánicas.

El contenido de Zn tuvo un efecto directo en los resultados obtenidos en el tratamiento térmico (solubilización, temple y envejecido artificial), obteniéndose un mejoramiento de las propiedades mecánicas, ya que teóricamente, las aleaciones Al₅Mg y Al₁₀Mg, no se encuentran en el grupo tratadas por envejecido artificial (no se observó un cambio significativo en las propiedades mecánicas).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] B. Davó and J. J. Damborenea, "Corrosión e inhibición en aleaciones de aluminio de media resistencia," *Rev. Metal. Vol 40, No 6*, vol. 40, no. 6, pp. 442–446, 2004, doi: 10.3989/revmetalm.2004.v40.i6.304.
- [2] R. Falla, K. Quintana, F. Franco, and N. Sánchez, "Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063-T5," *Rev. Prospect.*, vol. 10, no. 1, pp. 79–84, 2012, doi: 10.15665/rp.v10i1.399.
- [3] J. C. Pereira, L. Durán, D. Deventer, and J. Zambrano, "Comportamiento mecánico a torsión de la aleación de aluminio AA6061 tratada térmicamente," *Supl. la Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 28, no. 2, pp. 183–190, 2009.
- [4] C. Vargel, *El comportamiento del aluminio y sus aleaciones*, 7th ed. 1981.
- [5] K. Van Horn, *Aluminio. Propiedades, metalurgia física y diagramas de fases*. 1967.
- [6] F. De Los Reyes and E. Franco, "Caracterización del envejecimiento del acero 12Cr1MoV a partir de técnicas de imagenología," *Tecnol. Química*, vol. 29, no. 3, pp. 43–47, 2009.
- [7] R. Rodríguez and I. Gutiérrez, "Estudio de la contribución de las fases a las propiedades mecánicas en aceros con estructuras mixtas," in *VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, 2002, pp. 87–96.
- [8] D. Reigoza, "Estudio microestructural por microscopía óptica con técnicas de metalografía a color en un pistón de una moto AKT XM 200," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [9] I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, and M. Qian, *Light alloys: metallurgy of the light metals*, 5th ed. Butterworth-Heinemann, 2017.
- [10] F. X. (Francesc X. Gil, *Aleaciones ligeras / Francisco Javier Gil Mur ...[et al.]*, ed. Barcelona: Edicions UPC, 2001.
- [11] C. Aparicio Bádenas, J. Manero Planella, D. Rodríguez Rius, A. Andres Doménech, P. Arandés, and J. Planell Estany, "Aleaciones ligeras." Edicions UPC, 2001.
- [12] A. Baquero, *Propiedades de la fundición*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1998.
- [13] B. Suárez-Peña, J. Asensio-Lozano, and G. F. Vander-Voort, "Metalografía a color en aleaciones Al-Si comerciales. Optimización de las técnicas de caracterización microestructural mediante microscopía óptica de reflexión," *Rev. Metal. Vol 46, No 5 (2010)DO - 10.3989/revmetalm.1013*, vol. 46, no. 5, pp. 469–476, Oct. 2010, [Online]. Available: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1137/1149>.
- [14] C. Fosca, C. Merino, E. Otero, and P. Hierro, "Metalografía en color de los aceros inoxidables mediante la técnica de ataque coloreado," *Rev. Metal.*, vol. 32, no. 4, pp. 223–230, 1996, doi: 10.3989/revmetalm.1996.v32.i4.904.
- [15] R. M. Nunes *et al.*, *Heat Treating*, 4th ed. 1991.
- [16] R. Nunes *et al.*, *ASM Handbook: Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, Volumen 2. 1990.
- [17] J. A. Collins, *Failure of materials in mechanical design: analysis, prediction, prevention*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 1993.
- [18] ASM Handbook Committee, *Metallography and Microstructures*, 9th ed., vol. 9. EEUU: Metals Handbook, 1985.
- [19] L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys Structure and Properties*, 1st ed. 1976.
- [20] Foseco, "Aluminium silicon alloys." England.
- [21] E. D. Padilla, V. Vega, E. Tabuchi, G. Vela, and O. Gonzales, "La metalografía cuantitativa en la investigación de aleaciones ferrosas y no ferrosas," *Rev. del Inst. Investig. la Fac. Ing. Geológica, Minera, Met. y Geográfica*, vol. 4, no. 7 SE-Artículos científicos, pp. 18–23, Jul. 2001, doi: 10.15381/iigeo.v4i7.3062.
- [22] J. Escobedo, J. Fernández, S. Escobedo, A. Flores, and D. Cortés, "Estudio cinético de la eliminación de magnesio en las aleaciones de aluminio mediante la inyección de polvos de sílice," *Rev. Metal. Vol 39, No 3*, vol. 39, no. 3, pp. 172–182, 2003, doi: 10.3989/revmetalm.2003.v39.i3.327.
- [23] N. S. Stoloff, "Physical and mechanical metallurgy of Ni3Al and its alloys," *Int. Mater. Rev.*, vol. 34, no. 1, pp. 153–184, 1989.
- [24] G. E. Dieter and D. J. Bacon, *Mechanical metallurgy*, vol. 3. McGraw-hill New York, 1986.