

Transformaciones morfológicas en aleaciones de Al-Li tratadas térmicamente

I. Alfonso-López ^{a*}, A. Plata^b, A.S. Patiño^b, L.E. Reyes-Gordillo^b, F. Reyes-Calderón ^b, N. Alcantar-Mondragón ^{a,b}, L.E. Carranza ^a, I.A. Figueroa ^c

^aInstituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Morelia, 58190, México.

^bDepartamento de Metal Mecánica, Posgrado en Metalurgia. Doctorado en Ciencias en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Morelia, Michoacán 58120, México.

^cInstituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior S/N, Cd. Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

ABSTRACT

In this work, heat treatments were applied to Al-5%Li alloys, varying times and temperatures, which ranged between 8 and 16 h, and 450 and 600 °C. This led to microstructural changes derived from diffusion in the Al-Li eutectic phase and its transformation. The processes of fragmentation, spheroidization, and coarsening were observed, and even localized melting when heat treatment temperatures above the eutectic line were used. These results showed that, depending on the heat treatment conditions, microstructural modifications can occur to obtain different mechanical properties, but they can also cause porosity, which may be used as a starting point for producing metallic foams from these alloys, expanding their applications.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 20 octubre, 2025

Revisado 05 diciembre, 2025




Aceptado 30 diciembre, 2025

KEYWORDS

Aluminum, Lithium, Heat treatment, Microstructure

Introducción

El estudio de las uniones soldadas manifiesta distintas regiones microestructurales, una de ellas es la zona de fusión (ZF), región donde sucede el derretimiento y cristalización para así dar origen al cordón de soldadura. Dado que todos los metales son de naturaleza cristalina y la mayoría dispone de redes cristalinas, existe el fenómeno de solidificación; que es la transición de líquido a sólido [1, 2].

AUTOR DE CORRESPONDENCIA  Ismeli Alfonso  ialfonso@unam.mx  Instituto de Investigaciones en Materiales, Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Morelia, 58190, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/k8rm7459>

© 2026 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

En aleaciones binarias de Al-Li cada 1% de litio (hasta el límite de solubilidad de Li del 4.2%) reduce la densidad de la aleación en aproximadamente un 3% e incrementa el módulo elástico en un 6% [1]. Para mejorar aún más las propiedades de estas aleaciones, pueden someterse a tratamientos térmicos para disolver las segundas fases y lograr modificaciones microestructurales que influyen directamente el cambio de propiedades mecánicas y físicas.

El estudio de los tratamientos térmicos de las aleaciones aluminio-litio se ha venido incrementando, y se ha centrado en investigar los estados de fundición y homogenización de las aleaciones utilizando diversos enfoques [4,5]. Adicionalmente, ha sido utilizado el estudio de la dimensión fractal para el análisis no convencional de las fases, ya que esta propiedad puede servir para tener una idea de cambios microestructurales globales, no solo de tamaño o forma de las fases. La geometría fractal permite estudiar fenómenos irregulares que no pueden ser caracterizados con las teorías geométricas clásicas, y fue establecido por Mandelbrot en 1982 [6]. Una de las aplicaciones recientes de las aleaciones metálicas es en la industria del transporte en general, para aligerar el peso y disminuir el gasto de combustible. Por esto el uso de las espumas metálicas ha venido incrementándose, y el caso particular de las aleaciones de aluminio con alto contenido de litio hace que una espuma metálica tenga incluso una menor densidad. Estos materiales presentan características únicas, como son su estructura ligera y buenas propiedades físicas, químicas y mecánicas [7,8]. Las espumas metálicas son útiles en aplicaciones que requieran un alto intercambio de calor, son estables a temperaturas elevadas, poseen resistencia al fuego, y son completamente reciclables. Sus aplicaciones van desde el uso como biomaterial en el sustituto de hueso, hasta componentes de seguridad de automóviles. Estos materiales presentan una interesante combinación de propiedades, tales como alta rigidez, baja densidad, aumento de absorción de energía al impacto y tolerancia a altas temperaturas. Por tal motivo, la presente investigación comprende la caracterización de una aleación metálica Al-5%Li y su posterior tratamiento térmico a temperaturas que conlleven la modificación de las segundas fases, o incluso la fusión localizada de éstas para obtener porosidad que sea útil en la fabricación de espumas metálicas. Se realizará un estudio microestructural de la aleación en estado de fundición analizando las fases existentes, y la posterior realización de tratamientos térmicos de solución, donde se evaluará su efecto sobre la microestructura resultante y los cambios morfológicos.

Metodología

2.1 Materiales

Como material base para este trabajo se utilizó una aleación maestra de Al, con un contenido nominal de litio de alrededor de 5% en peso, reportado de acuerdo con el proveedor: MARCO METALES DE MEXICO, con la composición química mostrada en la Tabla I. Esta composición química hace que la aleación disminuya su densidad y tenga segundas fases, como más adelante se demostrará, ya que la máxima solubilidad del Li en el Al es de aproximadamente del 4.2 % en peso (o 12% atómico) a una temperatura de 596 °C, y disminuye a medida que la temperatura baja.

Tabla I. Composición química del material en % en peso.

Elemento	Al	Li	Fe	Si
Especificación nominal	Balance	4-6	0.30	0.30
Resultado lote del proveedor	Balance	5.39	0.05	0.014

La caracterización de la aleación en condición de llegada (as cast) se realizó para determinar la microestructura presente, esto con la finalidad de compararla con las obtenidas después de realizar los tratamientos térmicos, que conllevan a modificaciones de fases. Para esto, las aleaciones se cortaron en probetas cúbicas de 1 cm de lado, seguidas de lo cual se lijaron y pulieron utilizando técnicas metalográficas convencionales. Se realizó un análisis microestructural por medio de un microscopio metalográfico marca LABOMED, modelo MET400, además de utilizarse microscopía electrónica de Barrido (MEB) por medio de un equipo JEOL JSM IT300 operado a 20 kV, el cual cuenta con un detector para EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) Oxford Instruments X-MAX. La cuantificación de fases se realizó mediante análisis de imágenes utilizando el programa ImageJ, esto con la finalidad de

obtener el porcentaje de fases presentes y analizar el cambio de fases, así como sus tamaños y formas, que se produjeron después de los tratamientos térmicos. Para el análisis cristalográfico de las fases se utilizó un difractómetro de rayos X (DRX) BRUKER modelo D2 Phaser con radiación $K\alpha\text{Cu}$ de 1.54 \AA , entre 30 a 80° y paso de 0.2 . Se indexó con el programa Match 3, que permite analizar las fases presentes. El cálculo de la densidad se hizo con ayuda de una balanza Quintix.

2.2. Tratamientos térmicos

Se cortaron 12 probetas cúbicas de 1 cm por lado, las cuales fueron sometidas a tratamientos térmicos de solución, buscando disolver la mayor cantidad posible de segundas fases AlLi , así como lograr su fusión localizada para el caso de las temperaturas elevadas. En la Figura 1 se aprecian los tiempos y temperaturas utilizados, que estuvieron entre 8 y 16 h , y entre 450 y 600°C . Una vez transcurrido el tiempo seleccionado, las probetas se sacaron del horno y se enfriaron al aire.

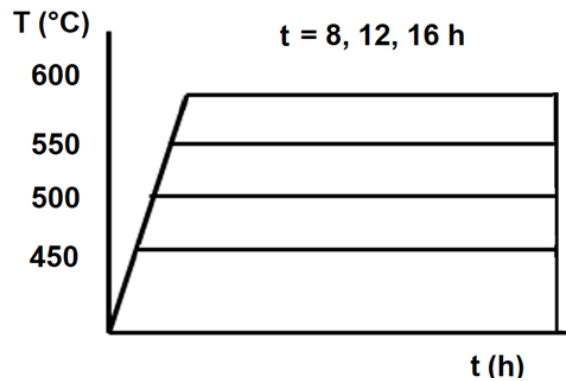


Figura 1. Gráfico de los tratamientos térmicos utilizados.

Resultados y discusión

3.1. Aleación en estado de colada

En la [Figura 2](#) se muestra la microestructura de la aleación Al-5\%Li en estado de colada, donde se aprecia una estructura conformada por el eutéctico Al-Li , de color oscuro, y la matriz de $\alpha\text{-Al}$ de una tonalidad gris clara. A diferencia de otras aleaciones de Al , donde es difícil definir las segundas fases, en este caso tanto en la micrografía de microscopía óptica (Figura 2a) como de MEB (Figura 2b) es fácilmente distinguible el eutéctico. La densidad de la aleación resultante fue de 2.3 g/cm^3 , mostrando la disminución debido a la adición del Li , ya que para el aluminio puro la densidad es de 2.7 g/cm^3 .

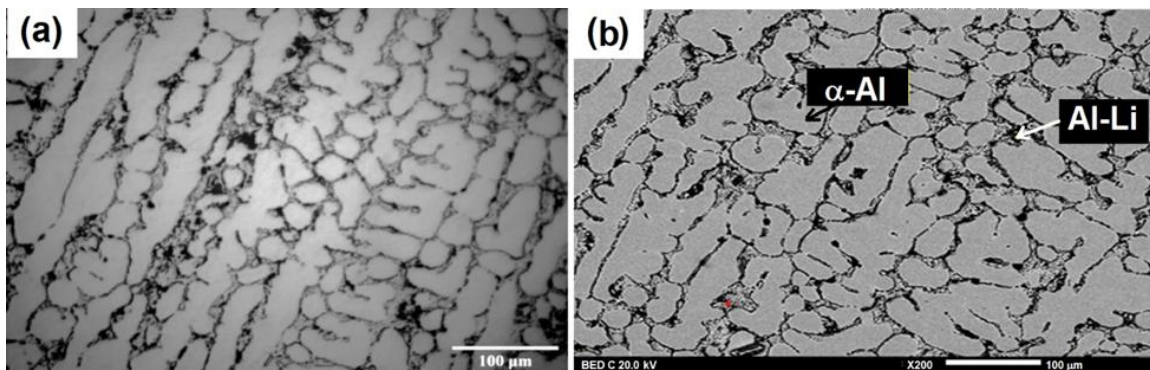


Figura 2. Micrografías de la aleación Al-5\%Li obtenidas por microscopías óptica (a) y electrónica de barrido (b).

En complemento a esta micrografía, el difractograma obtenido mediante DRX mostrado en la **Figura 3** corrobora la presencia de estas fases, pero también la oxidación del Li, confirmado por la presencia de Li_2O .

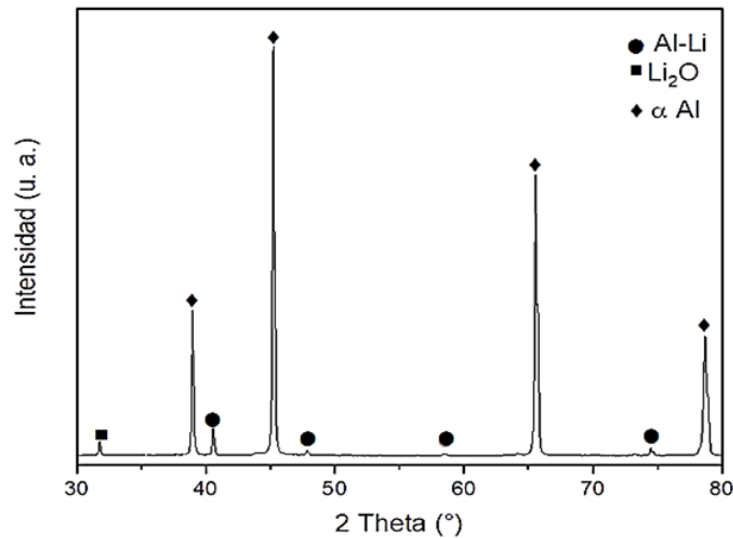
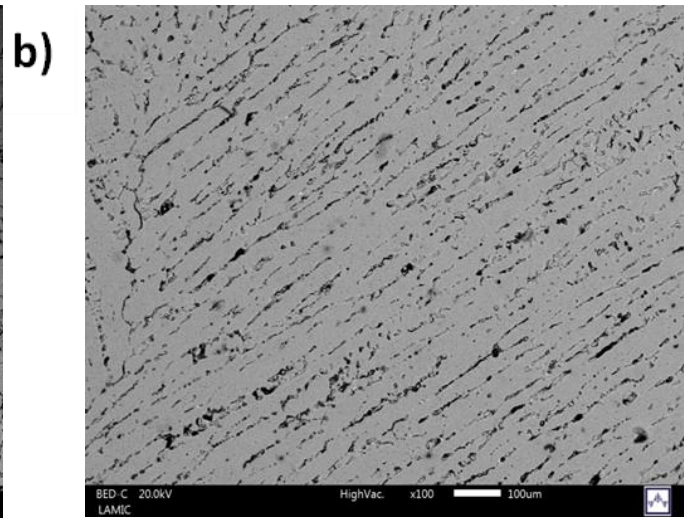
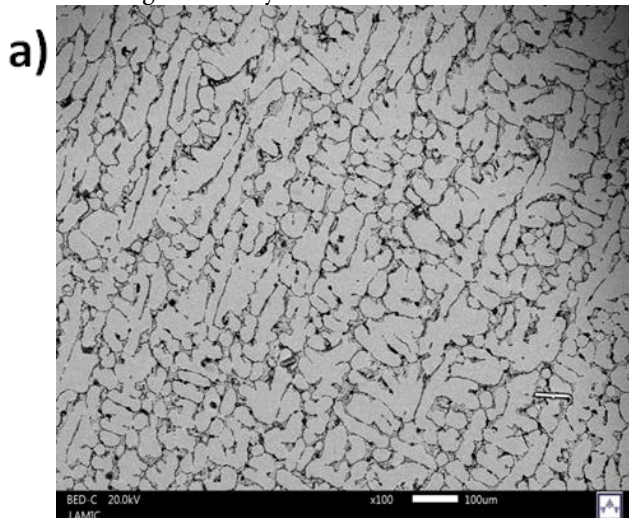


Figura 3. Difractograma de la aleación Al-5%Li en estado de colada

3.2. Aleaciones tratadas térmicamente

En la **Figura 4** se presentan las imágenes obtenidas por MEB de las muestras tratadas a 450°C durante 8 horas, 500°C por 12 h y 550°C durante 16 h, esto con la finalidad de comparar las modificaciones originadas después de los tratamientos térmicos de solución. Es claramente visible que la fase eutéctica fibrilar de la Figura 4a (estado de colada) comienza a fragmentarse y disolverse para después esferoidizarse, proceso que generalmente ocurre en las aleaciones de aluminio [1]. Esto muestra que a mayor temperatura y tiempos más largos el proceso es beneficiado. El análisis de tamaño y forma de partícula, dimensión fractal y porcentaje de la fase Al-Li demostraron esto.

Dentro de la micrografía Figura 3 se puede visualizar que tiene una matriz ferrítica dentro de la matriz se perciben tonalidades café, lo cual se entiende que es bainita, se hace presente de dos formas, bainita superior, producto de la transformación que comienza en la nucleación de granos de ferrita en las fronteras de austenita, está bainita se distingue por el ordenamiento de las agujas dentro del grano y bainita inferior la cual se difiere del anterior por el desacomodo de las agujas debido a la transformación. Dentro de las islas de bainita. puede alojar la austenita retenida, la cual no se puede apreciar, pero su existencia está confirmada por el difractograma de rayos X.



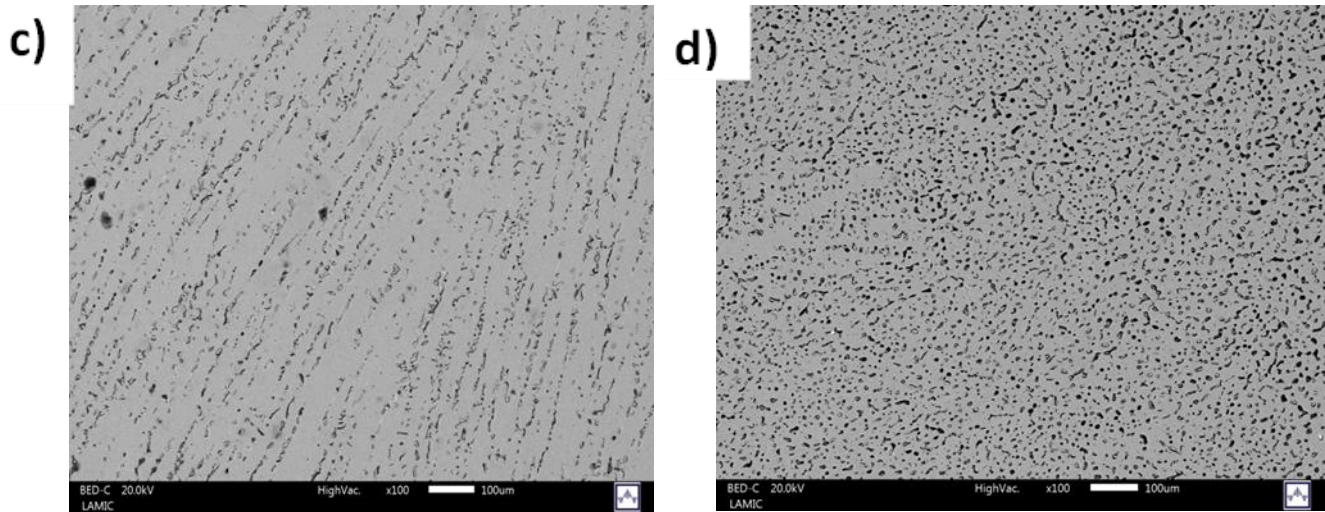


Figura 4. Aleaciones Al-Li en estado de colada (a) y para diferentes condiciones de tratamientos térmicos (b: 450°C durante 8 horas, c: 500°C por 12 h y d: 550°C durante 16).

Por otra parte, si se sobrepasa la temperatura de fusión localizada del eutéctico Al-Li se forman poros, lo cual se aprecia en la Figura 5, que muestra imágenes obtenidas por microscopía óptica para el estudio de las morfologías de las muestras tratadas térmicamente a 600°C con 8 h (Figura 5a) y con 16 horas de permanencia (Figura 5b). Se aprecia la matriz de α -Al, de color gris más claro, rodeando a poros y fases ya en forma fragmentada y redondeada, sin la presencia de la estructura eutéctica observada en la Figura 2. Esto se debe a la disolución del litio en la matriz, pero también a la fusión localizada de esta segunda fase eutéctica, rica en Li, que forma estos poros. El porcentaje de porosidad logrado fue de 15 %, con poros de 50 μm .

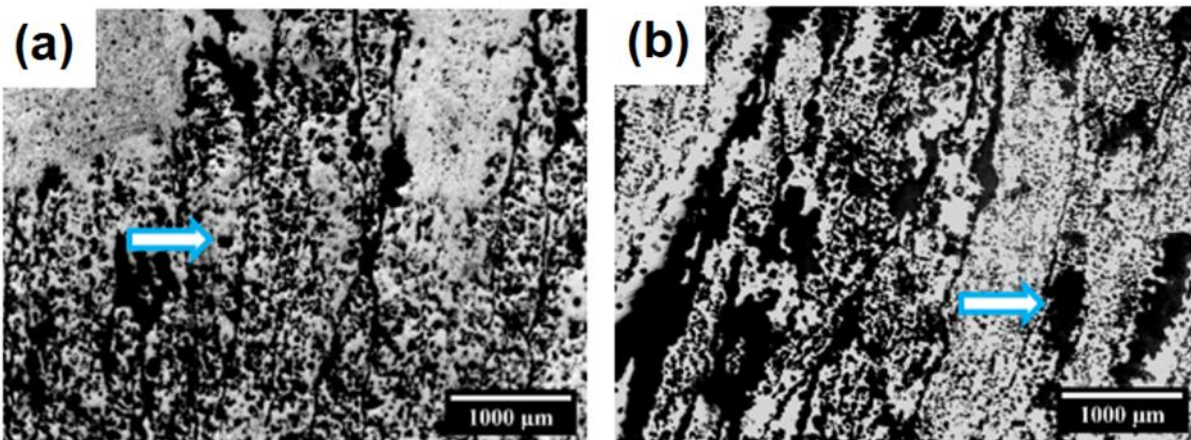


Figura 5. Microestructuras obtenidas por microscopía óptica de las aleaciones Al-Li tratadas a una temperatura de 600 °C y tiempos de permanencia de 8 horas (a) y 16 h (b).

Conclusiones

1. La aleación Al-5%Li presenta una estructura formada por el eutéctico, presentando una densidad de 2.3 g/cm³, 15 % menor que la del Al.
2. Los tratamientos térmicos de solución provocaron la disolución de las segundas fases mediante el proceso de fragmentación y esferoidización del eutéctico.
3. Si la temperatura de tratamiento térmico sobrepasa la línea eutéctica se generan poros, logrando un porcentaje de porosidad del 15 %, con poros de 50 μm.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Morelia, Tecnológico Nacional de México, y al apoyo de PAPIIT DGAPA UNAM proyecto IT101025.

Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación

ORCID

I. Alfonso  <https://orcid.org/0000-0001-7311-8614>

L.E. Reyes  <https://orcid.org/0009-0001-8073-7445>

F. Reyes  <https://orcid.org/0000-0002-2745-4833>

N. Alcantar  <https://orcid.org/0000-0002-4658-5409>

L.E. Carranza  <https://orcid.org/0000-0002-8028-2700>

I.A. Figueroa  <https://orcid.org/0000-0001-9699-0261>

Referencias

- [1] J.E. Hatch, Aluminum, properties and physical metallurgy, American Society for Metals, 1993.
- [2] Metals handbook: Vol. 2. Properties and selection: Nonferrous alloys and special-purpose materials (10th ed.). ASM International. 1990.
- [3] J.L. Walter, M. R. Jackson, C.T. Sims, Alloying. ASM International, 1988.
- [4] J. Xu, Y. Deng, J. Chen, Y. Xie, X. Guo, Effect of ageing treatments on the precipitation behavior and mechanical properties of Al–Cu–Li alloys, Mater. Sci. Eng. A 773 (2020) 138885.
- [5] X.Y. Wei, Z.Q. Zheng, Q.N. Chen, X. Fu, Homogenization Treatment of an Al-Li-Cu-Mg-Mn-Zr Alloy, Mater. Sci. Forum. 546-549 (2007) 719–722.
- [6] B. Mandelbrot, The fractal geometry of nature, W. H. Freeman and Co, 1982.
- [7] H. P. Degischer, B. Kriszt, Handbook of cellular metals: Production, Processing, Applications, InterScience, 2002.
- [8] N. Dukhan Ed., Metal Foams: Fundamentals and Applications, DEStech Publications, 2013.