

Influencia del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del aluminio 6061-0 y 6061-T8

Influence of Cold Working on the Mechanical Properties of Aluminum 6061-0 and 6061-T8

E. López-Arreola ^{a,*}, M.A. Suárez-Rosales ^a, O. Santiago-Muñoz ^a

^aDepartamento de materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 02200, Azcapotzalco, CDMX, México.

Resumen

La aleación de aluminio 6061 se emplea ampliamente en sectores industriales debido a que es un material de un bajo costo y con excelentes propiedades mecánicas. No obstante, la demanda de materiales más resistentes, en áreas como la automotriz y marítima, ha impulsado el interés por mejorar sus características. Esta aleación puede incrementar su dureza, esfuerzo de cedencia y resistencia última a la tensión (UTS) mediante procesos de formado y tratamientos térmicos. En este trabajo se evaluó el aluminio 6061 bajo dos condiciones: recocido con laminación en frío y tratamiento térmico T8. Los resultados muestran que la condición T8 ofrece mayores valores de dureza, esfuerzo de cedencia y UTS, atribuibles a la interacción de dislocaciones con precipitados. El mejor desempeño se obtuvo con 60% de trabajo en frío y envejecimiento a 185 °C por 5 h, duplicando la dureza y aumentando significativamente el esfuerzo de cedencia y la UTS.

Palabras Clave:

AA6061, Endurecimiento, Esfuerzo, Precipitados, Envejecido.

Abstract

Aluminum alloy 6061 is widely used in industrial applications due to its low cost and excellent mechanical properties. However, the growing demand for stronger materials in automotive and marine sectors has driven efforts to further enhance its performance. This alloy can improve hardness, yield strength, and ultimate tensile strength (UTS) through forming processes and heat treatments. In this study, aluminum 6061 was evaluated under two conditions: annealing followed by cold rolling, and T8 heat treatment. Results show that the T8 condition provides higher hardness, yield strength, and UTS values, mainly attributed to the interaction between dislocations and precipitates. The best performance was achieved with 60% cold work combined with aging at 185 °C for 5 hours, which successfully doubled the hardness and significantly increased both yield strength and UTS.

Keywords:

AA6061, Hardening, Stress, Precipitates, Aged.

1. Introducción

El aluminio constituye aproximadamente el 8% de la corteza terrestre, lo que lo ubica como el tercer elemento más abundante después del oxígeno y el silicio. Sus propiedades como baja densidad, buena conductividad eléctrica y elevada resistencia mecánica, lo convierten en un material de gran interés para aplicaciones industriales en sectores estratégicos.

Dentro de sus aleaciones, la serie 6000 se distingue por la capacidad de endurecimiento por precipitación. Entre ellas, la aleación AA6061, compuesta principalmente por magnesio y silicio, combina resistencia mecánica, ductilidad y procesabilidad, cualidades que han favorecido su amplio uso en la industria (Christy, Murugan, & Kumar, 2010).

Los tratamientos térmicos y termo-mecánicos permiten modificar significativamente sus propiedades (Obando & Sánchez, 2014). Uno de los tratamientos térmicos aplicados a la aleación AA6061 es el tratamiento térmico de recocido (con nomenclatura AA6061-0), el cual adquiere una alta tenacidad, pero comprometiendo su dureza. Por otro lado, la condición T8 implica una combinación de tratamientos térmicos y deformación en frío (tratamiento térmico de solubilizado, deformación en frío y tratamiento térmico de envejecido artificial), generando un fortalecimiento adicional y un mejor desempeño mecánico. No obstante, mientras que en materiales como el acero AISI 1040, el latón y el cobre existen gráficos de diseño que relacionan el porcentaje de trabajo en frío, en un rango de 10 a 60 %, con sus propiedades mecánicas, dicha información no se encuentra disponible para la aleación AA6061 en diferentes condiciones (Callister & Rethwisch, 2017).

*Autor para la correspondencia: eloar@azc.uam.mx

Correo electrónico: eloar@azc.uam.mx (Edgar López-Arreola), masuarez@azc.uam.mx (Miguel Ángel Suárez-Rosales), al2193040883@azc.uam.mx (Oscar Santiago-Muñoz)

Este vacío limita su aplicación directa en la ingeniería de diseño. Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo establecer dicha relación para el estado con y sin tratamiento térmico, a fin de ofrecer una herramienta práctica que facilite la selección del material con base en resistencia, ductilidad y esfuerzo de cedencia.

En estudios previos se han reportado condiciones específicas que permiten obtener resultados destacados en la aleación AA6061. Bonilla Cazinales y Gordillo Medina (2021) analizaron el efecto del tiempo de envejecimiento artificial, aplicando un solubilizado a 530 °C seguido de un envejecimiento a 175 °C en intervalos de 15 minutos a 18 horas. Los autores encontraron que, tras 18 horas de tratamiento, se alcanzó la mejor combinación de resistencia y dureza, lo que evidencia la relevancia del control del tiempo en este proceso.

Por otro lado, Kumar et al. (2019) evaluaron el envejecimiento artificial de la aleación AA6061 a tres temperaturas distintas (160 °C, 200 °C y 240 °C). Reportaron que el incremento de la temperatura favorece la resistencia a la tracción, aunque reduce la ductilidad, mientras que la dureza y la tenacidad mostraron un comportamiento similar al límite último de resistencia.

Dichas investigaciones constituyen un antecedente fundamental para la generación de gráficos de selección de materiales, considerando diferentes condiciones de tratamiento térmico, porcentajes específicos de deformación y las propiedades mecánicas asociadas.

2. Desarrollo experimental

Toda la experimentación se realizó en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, en el Área de Ciencia de materiales. Cada uno de los ensayos se realizó por triplicado para determinar la desviación estándar de los resultados obtenidos.

2.1. Tratamientos térmicos

Se realizaron los tratamientos térmicos de recocido y solubilizado en soleras de aluminio AA6061 con dimensiones ½ x ½ x 4 pulgadas. La temperatura y tiempo de recocido fue de 500°C durante 3 horas con enfriamiento dentro del horno. Dichos parámetros de solubilizado se eligieron con la intención de evitar pandeamiento en las muestras y que esto influyera en el proceso de laminación. Por otro lado, para el tratamiento térmico de solubilizado se realizó a la misma temperatura, sin embargo, el tiempo de permanencia a dicha temperatura fuera por 1 hora con enfriamiento en agua a temperatura ambiente.

2.2. Laminación en frío de las probetas

Se realizaron porcentajes de deformación a temperatura ambiente (25 – 30 °C) del 10 al 60% para las probetas recocidas y solubilizadas, empleando aceite mineral como lubricante. El porcentaje de trabajo en frío se definió de manera nominal con base en la reducción de espesor. Dado que la laminación se realizó con reducciones discretas de 0.1 mm por paso, los espesores finales se ajustaron al múltiplo más cercano, reportándose el número total de pasos efectivos. En la tabla 1 se presentan los espesores iniciales y finales de las muestras.

Tabla 1: Espesores iniciales y finales de las muestras

Probetas	Espesor inicial [mm]	Espesor final [mm]	Número de pasos totales
0%	6.35 ± 0.10	6.35 ± 0.10	0
10%	6.35 ± 0.10	5.75 ± 0.10	6
20%	6.35 ± 0.10	5.05 ± 0.10	13
30%	6.35 ± 0.10	4.45 ± 0.10	19
40%	12.7 ± 0.10	7.60 ± 0.10	51
50%	12.7 ± 0.10	6.40 ± 0.10	63
60%	12.7 ± 0.10	5.10 ± 0.10	76

Para las probetas solubilizadas, después de ser sometidas al proceso de deformación, se aplicó un tratamiento térmico de envejecido artificial a una temperatura de 185 °C durante un periodo de 5 horas, debido a que, en estas condiciones, se alcanzan los valores máximos de dureza, según lo reportado por Mishra, Rao y colaboradores (Mishra, Rao, & Murthy, 2018).

2.3. Medición de dureza

Se realizó la medición de dureza de las probetas recocidas-laminadas y a las probetas con tratamiento T8 (Que conlleva el proceso de solubilizado, laminación y envejecimiento artificial). La medición de dureza se realizó en escala Brinell aplicando una carga de 187 kgf durante 15 segundos, con un indentador de carburo de tungsteno de 5 mm de diámetro. En la figura 1 se presenta una representación de las tomas de durezas.



Figura 1: Indentación de dureza Brinell en una probeta de aluminio AA 6061.

2.4. Maquinado de probetas

Todas las probetas fueron maquinadas de acuerdo con la geometría presentadas en la figura 2 correspondiente a la norma ASTM E8/E8M (ASTM International, 2024).

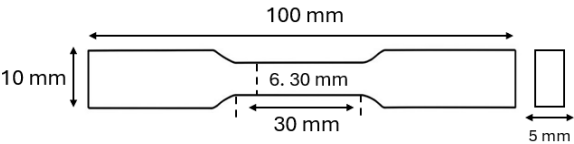


Figura 2: Medidas de las probetas de tensión de acuerdo con la norma ASTM E8/E8M (ASTM International, 2024).

2.5. Ensayo de tensión

Se realizaron los ensayos de tensión por triplicado a temperatura ambiente (25-30°C) en una máquina de ensayos universal marca Instron, a una velocidad de cabezal de 2 mm/min. La longitud de trabajo de la probeta fue de 30 mm

3. Resultados y discusión

Los resultados promedios de las durezas para las probetas de aluminio AA6061-0 (recocidas) y AA6061-T8, se presentan en la tabla 2 y 3, respectivamente.

Tabla 2: Valores del tamaño de huella promedio y de la dureza en escala Brinell de las probetas 6061-0.

Probetas	Dureza Brinell [kg/mm²]
0%	25 ± 2.1
10%	34 ± 2.3
20%	37 ± 2.0
30%	41 ± 2.4
40%	46 ± 1.9
50%	50 ± 2.2
60%	56 ± 2.05

Se puede observar que, para ambas condiciones, el material aumenta su dureza conforme aumenta el porcentaje de trabajo en frío, esto está relacionado a que el material experimenta un incremento en la densidad de dislocaciones debido al proceso de laminación en frío, lo que se traduce en un aumento de la dureza.

Tabla 3: Valores del tamaño de huella promedio y de la dureza en escala Brinell de las probetas 6061-T8.

Probetas	Dureza Brinell [kg/mm ²]
0%	45 ± 2.51
10%	66 ± 2.02
20%	75 ± 2.62
30%	84 ± 1.72
40%	101 ± 2.22
50%	109 ± 1.88
60%	113 ± 2.02

No obstante, aunque la tendencia observada es similar, resulta evidente que las probetas sometidas al tratamiento térmico T8 alcanzaron valores de dureza superiores, como se aprecia en la figura 3.

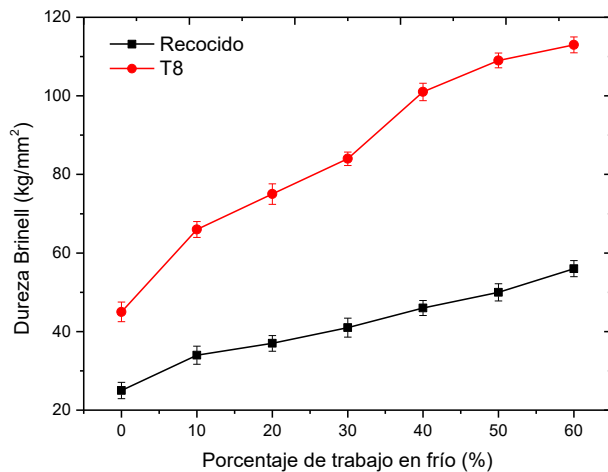


Figura 3: Dureza Brinell vs porcentaje de trabajo en frío para las probetas 6061-0 y 6061-T8.

Por ejemplo, con un 20 % de laminación en frío, se registraron valores de dureza Brinell de 37 BHN para la condición de recocido y de 75 BHN para la condición T8. Esta diferencia, observada bajo el mismo porcentaje de deformación, se explica porque las probetas recocidas endurecen únicamente por deformación plástica, es decir, por el incremento en la densidad de dislocaciones (Dieter & Bacon, 1961). En contraste, en las probetas tratadas en condición T8, aunque también se presenta un aumento en la densidad de dislocaciones, el incremento de dureza se atribuye además a la interacción de estos defectos con la formación de precipitados durante el tratamiento de envejecimiento artificial. Este comportamiento coincide con lo reportado por Garza Garza (1999), quien mencionó que en el material AA6061 los precipitados formados son del tipo Mg₂Si y, con lo señalado por Fellicia y Putra (2019), quienes observaron que el aumento en la resistencia y dureza del material se debe a la formación de dichos precipitados.

Estos precipitados se “dan” en los límites de grano debido a que son considerados como zonas de alta energía (Askeland & Wright, 2017). Dichas partículas de tamaño nanométrico funcionan como barreras que impiden el libre movimiento y propagación de las dislocaciones lo que se traduce como un aumento más significativo en términos de la dureza, es decir, en las probetas con tratamiento térmico de recocido solo se tiene la presencia del mecanismo de endurecimiento por deformación, en contraste, en las probetas con T8 se cuenta con una combinación de mecanismos de endurecimiento entre el endurecimiento por deformación provocado por la laminación en frío y el mecanismo de

endurecimiento por precipitación debido al tratamiento térmico de envejecido (mecanismo de fortalecimiento adicional).

Por otro lado, se analizaron las propiedades mecánicas en tensión del aluminio AA6061 en ambas condiciones. Los gráficos esfuerzo-deformación se presentan en las figuras 4 y 5 para las condiciones de recocido y T8, respectivamente. Se observa que, al ir incrementando el porcentaje de deformación, incrementa el esfuerzo máximo (UTS) para ambas condiciones.

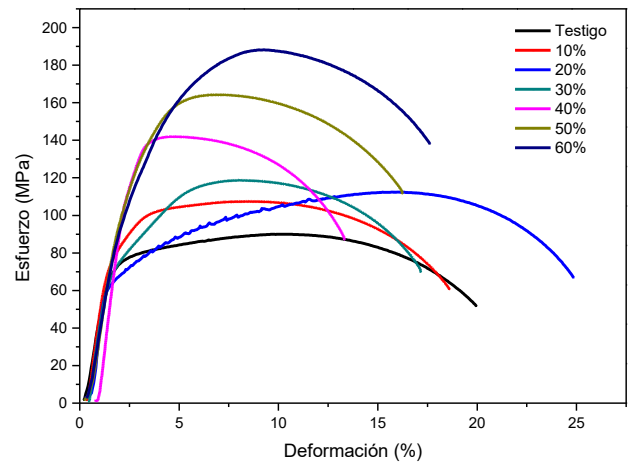


Figura 4: Comparativa de las curvas esfuerzo vs deformación correspondientes a las probetas 6061-0.

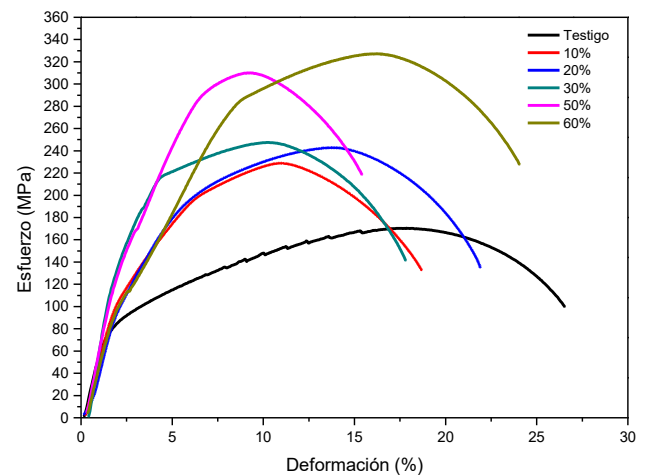


Figura 5: Comparativa de las curvas esfuerzo vs deformación correspondientes a las probetas 6061-T8.

En las tablas 4 y 5 se presentan las propiedades mecánicas obtenidas de los gráficos esfuerzo-deformación, para las condiciones del material recocido y T8, respectivamente.

Tabla 4: Propiedades mecánicas de las probetas 6061-0.

Probeta	Esfuerzo de cedencia [MPa]	UTS [MPa]
0%	71.83 ± 8.10	89.98 ± 10.11
10%	81.3 ± 14.33	107.34 ± 8.12
20%	89.74 ± 10.18	122.21 ± 13.47
30%	99.23 ± 9.56	134.16 ± 10.34
40%	123.33 ± 7.88	141.92 ± 10.65
50%	140.62 ± 12.94	164.27 ± 5.24
60%	158.83 ± 12.12	188.19 ± 9.74

Al comparar los valores obtenidos para la condición 6061-T8 con los reportados por Mirzakhani y Mansourinejad, se observa que los resultados presentan diferencias mínimas respecto a los obtenidos en el presente trabajo. No obstante, los valores de resistencia última a la tensión (UTS) y esfuerzo de cedencia reportados por dichos autores son ligeramente superiores.

Para deformaciones del 20, 40 y 60 %, se obtuvieron valores de esfuerzo de cedencia de 230, 255 y 260 MPa, respectivamente. De manera análoga, los valores de UTS correspondientes a dichas deformaciones fueron de 300, 320 y 350 MPa, respectivamente. Esta diferencia puede atribuirse a las condiciones del tratamiento térmico de envejecido aplicado en su estudio, el cual se realizó durante un periodo de 4 horas. En este sentido, los mayores valores de estas propiedades mecánicas pueden relacionarse con las variaciones en el tamaño y distribución de los precipitados formados como consecuencia de los distintos tiempos de envejecido (Mirzakhani & Mansourinejad, 2011).

Tabla 5: Propiedades mecánicas de las probetas 6061-T8.

Probeta	Esfuerzo de cedencia [MPa]	UTS [MPa]
0%	83.61 ± 11.14	170.38 ± 8.61
10%	190.62 ± 7.81	228.90 ± 13.91
20%	194.37 ± 12.19	243.05 ± 10.48
30%	214.76 ± 14.23	247.52 ± 7.22
40%	245.64 ± 12.17	278.80 ± 11.37
50%	276.52 ± 6.62	310.09 ± 9.14
60%	285.43 ± 8.59	327.31 ± 7.84

En la figura 6 se presenta el comportamiento del esfuerzo de cedencia en función del porcentaje de trabajo en frío. Para la probeta testigo se obtuvo un valor de 71.83 MPa, mientras que al 10 % se registró 81.30 MPa y al 20 % se obtuvo 89.74 MPa. Es decir, con forme se fue incrementando el porcentaje de trabajo en frío, el esfuerzo de cedencia fue en aumento.

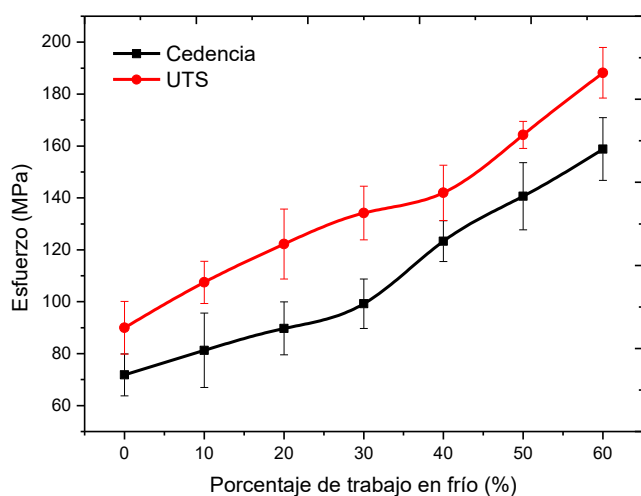


Figura 6: Comportamiento del esfuerzo de cedencia y UTS en función del porcentaje de trabajo en frío para las probetas 6061-0.

Lo anterior coincide con lo reportado por Mirzakhani y Mansourinejad (2011), quienes señalan que, a medida que aumenta el porcentaje de trabajo en frío, los valores de esfuerzo de cedencia tienden a incrementarse. Este comportamiento está directamente relacionado con el incremento en la densidad de dislocaciones dentro de la estructura del material; a mayor densidad de dislocaciones, mayor es el esfuerzo requerido para iniciar la deformación plástica, lo que se traduce en un incremento tanto del esfuerzo de cedencia como de la resistencia a la tracción.

En el caso del UTS se observa una tendencia similar a la dureza, con un incremento conforme aumenta el porcentaje de trabajo en frío. Por ejemplo, al 30 % de deformación se obtuvo un valor de 134.16 MPa, mientras que al 60 % se alcanzó 188.19 MPa. Este aumento se atribuye al mecanismo de endurecimiento por deformación: durante la laminación en frío, la deformación permanente genera un incremento en la densidad de dislocaciones, cuya interacción dificulta su movimiento y confiere al material una mayor resistencia, reflejada en el incremento del UTS (Loja et al., 2020).

En la figura 7 se muestran los resultados correspondientes a la condición T8. Al igual que en el estado de recocido, tanto el UTS como el esfuerzo de cedencia aumentan con el porcentaje de deformación; no obstante, en la condición T8 se alcanzaron valores superiores en ambas propiedades mecánicas para todos los porcentajes de deformación en comparación con las probetas recocidas. Esto se puede relacionar a que cuando el material previamente laminado en frío se somete a un tratamiento térmico de envejecido, se produce el mecanismo de fortalecimiento adicional y se ve reflejado en un incremento en la resistencia (Abd al Kaream Salman, 2014; Vázquez Briseño, 2017). Además, cuando se lamina en frío se produce una reducción significativa, más dislocaciones, lo cual proporciona más sitios de nucleación para la precipitación y aumenta la resistencia (Sadanand et al., 2022). Las dislocaciones al ser consideradas como zonas de alta energía, al igual que los límites de grano, sirven como centros de nucleación para los precipitados. De igual forma que en la dureza, la interacción entre estos dos aumenta la resistencia del material.

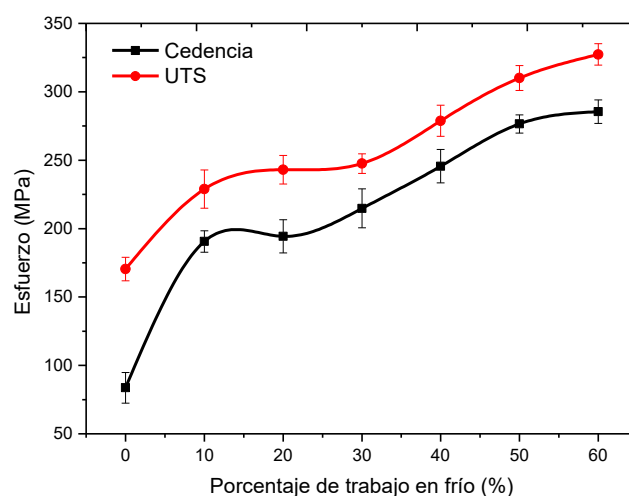


Figura 7: Comportamiento del esfuerzo de cedencia y UTS en función del porcentaje de trabajo en frío para las probetas 6061-T8.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que las propiedades mecánicas de la aleación AA6061 pueden incrementarse de manera significativa mediante la laminación en frío y, de forma aún más notable, mediante la aplicación del tratamiento térmico T8. En la condición inicial 6061-0, la dureza Brinell aumentó de 25 a 56 BHN al incrementar la deformación en frío hasta un 60 %, lo que representa un incremento aproximado del 124 %. De manera consistente, el esfuerzo de cedencia se incrementó de 71.83 a 158.83 MPa (≈ 121 %), mientras que la resistencia última a la tensión (UTS) aumentó de 89.98 a 188.19 MPa (≈ 132 %). Estos incrementos se atribuyen principalmente al endurecimiento por deformación, asociado al aumento en la densidad de dislocaciones inducido por la laminación en frío.

Por otro lado, la condición 6061-T8 exhibió valores mecánicos superiores en todo el rango de deformación analizado. En comparación con el estado recocido, la dureza Brinell alcanzó un valor máximo de 113 BHN, lo que corresponde a un incremento aproximado del 352 % respecto a la condición inicial. De manera análoga, el esfuerzo de cedencia aumentó de 83.61 a 285.43 MPa (≈ 241 %), y el UTS se incrementó de 170.38 a 327.31 MPa (≈ 92 %) al aplicar una deformación del 60 %. Estos resultados evidencian que la combinación de deformación en frío y envejecimiento artificial a 185 °C durante 5 horas produce un efecto significativo que supera ampliamente el fortalecimiento obtenido únicamente por trabajo en frío.

El notorio aumento en las propiedades mecánicas bajo la condición T8 se asocia a la acción conjunta del endurecimiento por dislocaciones y el endurecimiento por precipitación, debido a que dichos precipitados interactúan eficazmente con el movimiento de dislocaciones.

En conjunto, los resultados demuestran que la ruta termomecánica empleada permite un control efectivo del nivel de endurecimiento del AA6061, ofreciendo una base experimental sólida para su aplicación en componentes estructurales donde se requieren elevadas propiedades mecánicas. Sin embargo, las propiedades mecánicas podrían seguir siendo mejoradas al estudiar diferentes tiempos y temperaturas de envejecido, debido a que es esencial obtener un tipo de precipitado que contribuya a un mayor incremento de las propiedades mecánicas.

Para futuros estudios, resulta de interés la caracterización de los precipitados mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM), con el propósito de analizar su tamaño, morfología y distribución dentro del material, y establecer su influencia en los mecanismos de fortalecimiento y en el comportamiento mecánico global. El control de estas características microestructurales podría ser determinante para la optimización de sus propiedades finales.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, por las facilidades otorgadas, así como por el acceso a sus laboratorios y recursos técnicos que contribuyeron al desarrollo de este estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Abd al Kaream Salman, R. (2014). The Effect of Rolling and Heat Treatment on Mechanical Behavior of 6061 Aluminum Alloy. *Production & Metallurgy Engineering Department, University of Technology/Baghdad*. <https://doi.org/10.30684/etj.33.6A.9>
- Askeland, D., & Wright, W. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México, DF: Cengage Learning.
- ASTM International. (2024). ASTM E8/E8M-24: Standard test methods for tension testing of metallic materials.
- Bonilla Cazinales, A., & Gordillo Medina, L. (2021). Efecto del tiempo de envejecido en la estructura cristalina y las propiedades mecánicas del aluminio 6061.
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2017). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. Reverté.
- Christy, T., Murugan, N., & Kumar, S. (2010). A comparative study on the microstructures and mechanical properties of Al 6061 and the MMC Al 6061/TiB2/12p. *Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 57-65. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2010.91005>
- Dieter, G., & Bacon, D. (1961). *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill.
- Fellicia, D. R., & Putra, M. U. (2019). The Effect of Aging on Microstructure, Mechanical Properties, and Electrical Conductivity of 6061 Aluminium Alloy for Circuit Breaker. *International Conference on Technologies and Policies in Electric Power & Energy*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/IEEECONF48524.2019.9102525>
- Garza Garza, M. D. (1999). Caracterización de precipitados en la aleación de aluminio 6061 por medio de microscopía de fuerza atómica. *Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León*.
- Kumar, M., Baloch, M., Abro, M., Memon, S., & A.D., C. (2019). Effect of artificial aging temperature on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, 31-36. <https://doi.org/10.22581/muet1982.1901.03>
- Loja, J., Zulca, P., & Morales, J. (2020). Características del proceso de conformado en láminas de aluminio de la serie 6000. *Polo del Conocimiento*, 3-21. <https://doi.org/10.23857/pc.v5i9.1671>
- Mirzakhani, B., & Mansourinejad, M. (2011). Tensile properties of AA6061 in different designated precipitation hardening and cold working. *Procedia engineering*, 136-140. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.025>
- Obando, F., & Sánchez, E. (2014). Tratamientos Térmicos para Aluminios. *Metal Actual*, 36-43.
- Sadanand, R., Sharma, S., & Prabhu, P. (2022). Alternate Thermomechanical Heat Treatment Cycles for the Enhancement in Hardness and Tensile Properties of Commercial Grade AA6061. *Materials Research*. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0047>
- Vázquez Briseño, L. (2017). *Teoría de la plasticidad a los procesos de formado de metales*. México: Pearson Educación de México.