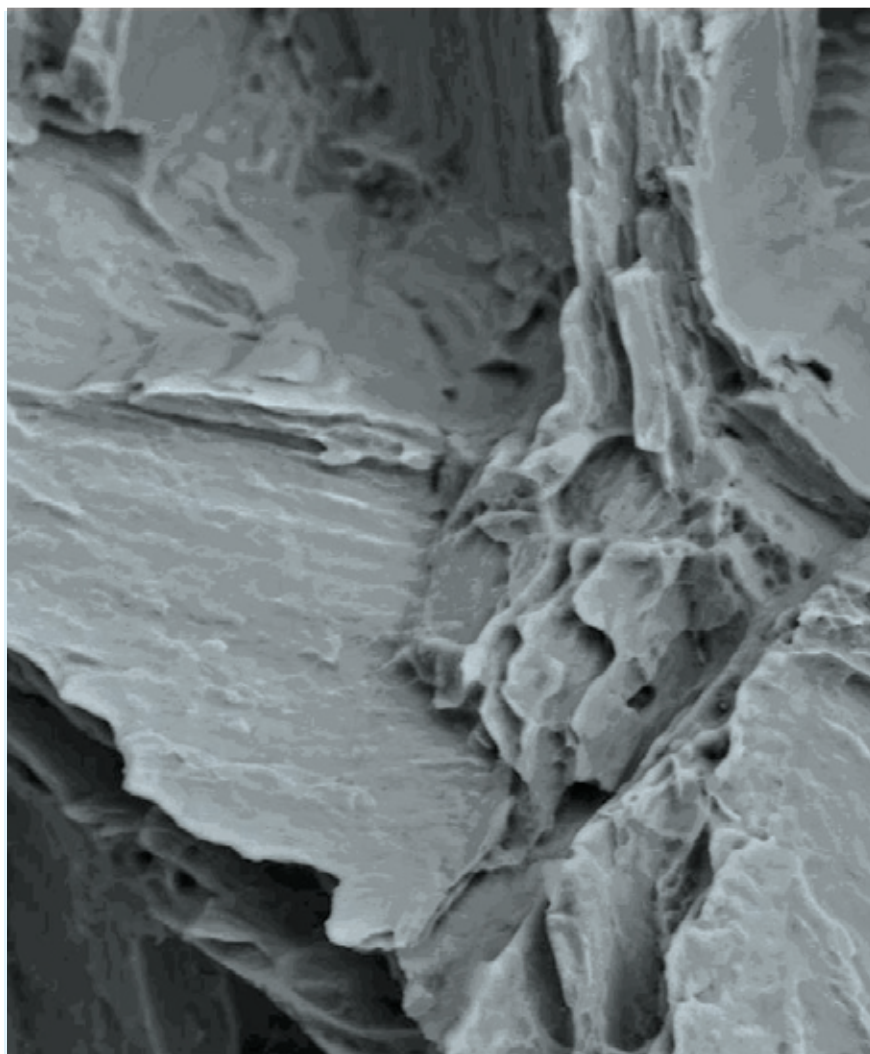


# Evaluación de la resistencia mecánica de uniones soldadas mediante proceso SFA y GTAW de la aleación de magnesio AZ31B

JULIÁN ARNALDO ÁVILA\*  
HÉCTOR ENRIQUE JARAMILLO SUÁREZ\*\*  
FERNANDO FRANCO ARENAS\*\*\*

## Resumen

En el presente trabajo se muestran los resultados de la evaluación del comportamiento mecánico de las uniones soldadas de la aleación de magnesio AZ31B usando el proceso de soldadura fricción-agitación (SFA) y GTAW, consistente en la evaluación de la resistencia a la tensión y microdurezas de las uniones soldadas; realizando un análisis de tipo explicativo de su correlación con los cambios de microestructura, tamaños de grano presentes en las diferentes zonas, y los defectos de calidad, adicionalmente se realizó el análisis fractográfico para determinar la causa de falla en las probetas soldadas y ensayadas. Los resultados obtenidos mostraron una mayor resistencia a la tensión de las uniones soldadas



\* Estudiante de la Maestría en ingeniería de Materiales. Integrante del Grupo de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente y del Grupo de Investigación de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle. julianarnaldoavila@hotmail.com

\*\* Ms.C. en Ingeniería Civil. Docente del Departamento de Energética y Mecánica e integrante del Grupo de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente. hjsuarez@uao.edu.co

\*\*\* Ingeniero Mecánico, Especialista en Metalurgia y Soldadura, Docente de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle e integrante del Grupo de Investigación de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle. fdo\_franco@yahoo.com

de GTAW, en comparación con las uniones de SFA.

**Palabras clave:** Soldadura por fricción-agitación, Aleación de Mg AZ31B, fractografía, resistencia mecánica.

**Abstract**

This paper present the results of the evaluation of mechanical behavior of magnesium alloy welded joints AZ31B using stirring-friction agitation welding (SFA) and GTAW, to the assessment of the tensile strength and microhardness of welded joints, made an analysis of explanatory type of correlation with changes in microstructure, grain sizes present in different zones, and quality defects, further fractographic analysis was performed to determine the cause of failure in welded specimens and tested. The results showed a higher tensile strength of welded joints for GTAW, compared with SFA joins.

**Key words:** stirring-friction agitation welding, Mg AZ31B alloy, fractographic, strength

**Introducción**

Las aleaciones ligeras, particularmente las aleaciones de magnesio, debido a su bajo peso específico, elevada resistencia mecánica específica, fácil maquinabilidad y se puede reciclar [1], muestran un gran potencial de aplicabilidad estructural donde actualmente se posiciona el aluminio [2], [3], al presente es utilizado en carcasas de electrodomésticos, cubiertas dentro de automóviles y marcos de bicicletas entre otras aplicaciones, que tienen como factor común: piezas únicas, en la mayoría de los casos extruidas, no se presentan uniones del material, sin embargo, cuando se requiere hacer estructuras, es nece-

sario unir placas, y los métodos de unión más usados son la soldadura por fusión convencional tal como GTAW y GMAW, en los cuales se encuentran mayores problemas de agrietamiento y porosidad en estas aleaciones ligeras que en los aceros. Como alternativa a los procesos de soldadura convencionales, se ha creado la soldadura por fricción-agitación (SFA) (o Friction Stir welding, FSW), este proceso consume baja energía, no produce gases peligrosos, brinda propiedades mecánicas superiores a los métodos convencionales de soldadura, es aplicado industrialmente en algunos países, y se encuentra en proceso de investigación sobre diferentes materiales y configuraciones a lo largo del mundo. Este análisis consistió de pruebas mecánicas, en condición de carga estática, tales como microdureza y tensión, al material base, a las uniones soldadas por GTAW y SFA, donde el esfuerzo último de las uniones soldadas es similar al del material base, en el caso de la GTAW y la SFA presenta un 95% de eficiencia en la junta.

**Procedimiento experimental**

Se soldaron placas de la aleación de magnesio de AZ31B, cortadas de perfiles extruidos, cuya

composición química se presenta en la Tabla 1, con dimensiones de 90 x 120 x 3.2mm, mediante los procesos de soldadura por fricción-agitación SFA y GTAW. Para realizar las uniones soldadas por SFA se utilizó una máquina Fresadora Nangtong X6125A acondicionada para la realización de las soldaduras, modificando dos variables, la velocidad de rotación ( $V_R$ ) y velocidad de avance ( $V_A$ ), ver Tabla 2. El proceso de soldadura por fusión GTAW se llevó a cabo en un equipo de soldadura ESAB Heliarc 252; los parámetros utilizados fueron: Voltaje 15 V, Amperaje: 59A; velocidad de soldadura promedio de 3.83 mm/s, con corriente alterna con la unidad de alta frecuencia. El material de aporte usado fue el alambre ER AZ61A en forma de tres alambres trenzados de 1.6mm de diámetro, cuya composición se muestra en la Tabla 1. El esfuerzo de fluencia del material de aporte corresponde a 228 MPa y su resistencia última tiene un valor de 310 MPa [4]. Las placas se soldaron perpendicularmente a la dirección de extrusión, las láminas se fijaron a tope sin bisel y se realizó un cordón de soldadura por la cara y un cordón por el lado raíz, después de esmerilar el primer cordón.

**Tabla 1.** Composición química (% peso) de la

aleación de magnesio AZ31B y ER AZ61A

| Aleación | Al  | Mg  | Fe    | Mn   | Si   | Zn   |
|----------|-----|-----|-------|------|------|------|
| AZ31B    | 2.8 | Bal | 0.007 | 0.52 | 0.09 | 0.52 |
| ER AZ61A | 6.5 | Bal | ---   | 0.2  | ---  | 1.0  |

**Tabla 2.** Parámetros de realización de la soldadura SFA

| Designación de la muestra | $V_R$ (rev/min) | $V_A$ (mm/min) | $V_R/V_A$ (rev/mm) |
|---------------------------|-----------------|----------------|--------------------|
| 1115                      | 1120            | 158.75         | 7.05               |
| 1121                      | 1120            | 216.92         | 5.16               |
| 1615                      | 1600            | 158.75         | 10.07              |
| 1621                      | 1600            | 216.92         | 7.37               |

Las probetas de la aleación AZ31B en estado de suministro, las uniones soldadas por GTAW y por SFA se caracterizaron mecánicamente mediante las pruebas de microdureza y tensión, adicionalmente se realizó el análisis metalográfico para determinar el tamaño de grano, los defectos y las fases presentes en la unión soldada.

El análisis metalográfico se realizó mediante un microscopio óptico marca Olympus PMEU, para lo cual se cortaron y se montaron en acrílico de autocurado las muestras de la sección transversal al cordón de soldadura, se realizó un desbaste inicial de la superficie con papel lija de CSi hasta la granulometría 1000, se pulieron utilizando paños con alúmina de grano hasta 0.05  $\mu\text{m}$ , para dar un acabado espejo y finalmente fue atacada con un reactivo de acético-picral para revelar la microestructura, compuesto por 10mL de ácido acético (99%), 4.2 g ácido pícrico, 10mL H<sub>2</sub>O, 70mL de etanol (95%) [5]. La medición de tamaño de grano se realizó bajo la norma ASTM E112 usando el método de intercepción.

Las pruebas de microdureza se realizaron sobre la sección transversal de la unión soldada a lo largo de la línea a mitad de espesor, con indentaciones separadas cada 1 mm, en un microdurómetro

Wilson 401 MVD a una carga de 100 g y un tiempo de sostenimiento de 10s.

Las pruebas de tensión se realizaron bajo la norma ASTM E8, sobre probetas planas de sección reducida, mostradas en la Figura 1, con la carga aplicada en dirección transversal al cordón de soldadura y coincidente con el sentido de flujo de los granos en la extrusión, en una máquina Instron 3366, de 30 KN de capacidad, a una velocidad de 1 mm/min.

### Resultados y discusión

#### Análisis microestructural

La muestra soldada por GTAW, Figura 2a), presenta poros en el cordón de raíz y exceso de soldadura que produce concentradores de tensiones en el pie de la soldadura y consta de tres zonas diferentes que son el material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y la zona Fundida (ZF) [6]. La SFA presentó indicios de defectos a bajos aumentos como porosidades en el lado raíz de longitud máxima 250  $\mu\text{m}$  en la muestra 1121 con la menor entrada de calor, mientras que la muestra 1615 con mayor entrada de calor no presentó defectos, el inicio de la fractura no tiene relación con el lado avance o lado retorno, ni del lado raíz o lado caras de la soldadura SFA.

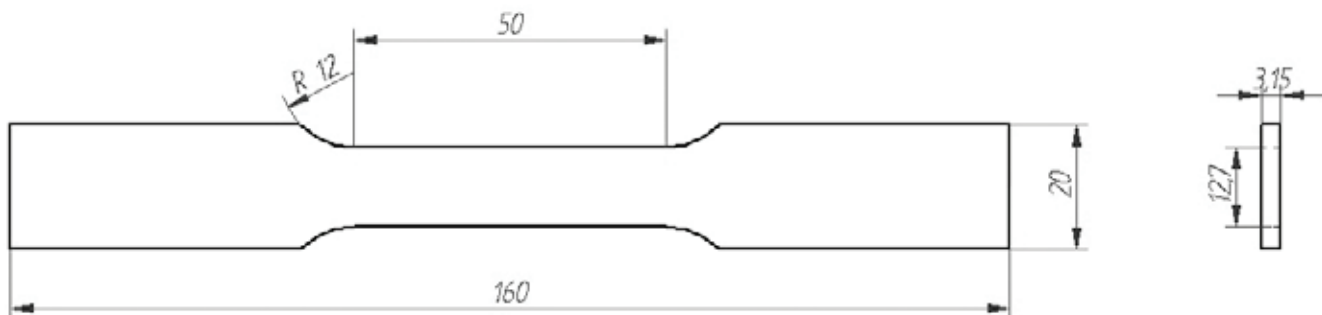


Figura 1. Dimensiones en mm de las probetas utilizadas en la prueba a tensión

La microestructura presente en el metal base está compuesta por granos grandes maclados de tamaños variados y ligeramente orientados según la dirección de conformado (ver Figura 2a) y 2b)), con numerosas inclusiones no metálicas de  $Al_xMn_y$ , dispersas y en algunos casos también orientadas. La microestructura de la zona fundida (ZF) por GTAW presenta granos finos equiaxiales con precipitados de una segunda fase tipo  $Al_xMg_y$  alojados en los bordes de grano [2] como lo presenta la Figura 2c), entre las dos zonas anteriores se encuentra la ZAC, mostrando la disminución en el tamaño y forma de los granos y la aparición de una segunda fase. Por otra parte, la SFA no presenta defectos de soldadura, y está conformada por tres zonas características; la zona agitada (ZA) como se observa en la Figura 2d), presentó un grano aún más fino por causa de la recristalización dinámica, encontrándose el tamaño de grano más fino para la probeta 1615. La zona termomecánicamente afectada ZTMA presenta una combinación de diferentes tamaños de grano, con evidencias de orientación de los granos de acuerdo con el giro de la herramienta; y, por último está la zona afectada por el calor (ZAC), la más pequeña y difícilmente detectable.

Sobre micrografías a 100 aumentos, se realizó la medición de tamaño de grano bajo la norma ASTM E112-96 usando el método de intercepción. En la Tabla 3 se presentan los resultados del cálculo del tamaño de grano. En general los tamaños de grano medidos en la SFA fueron menores comparadas con la GTAW, pero tanto para la zona fundida GTAW como para la zona agitada de SFA presentaron tamaños de grano menores comparadas con

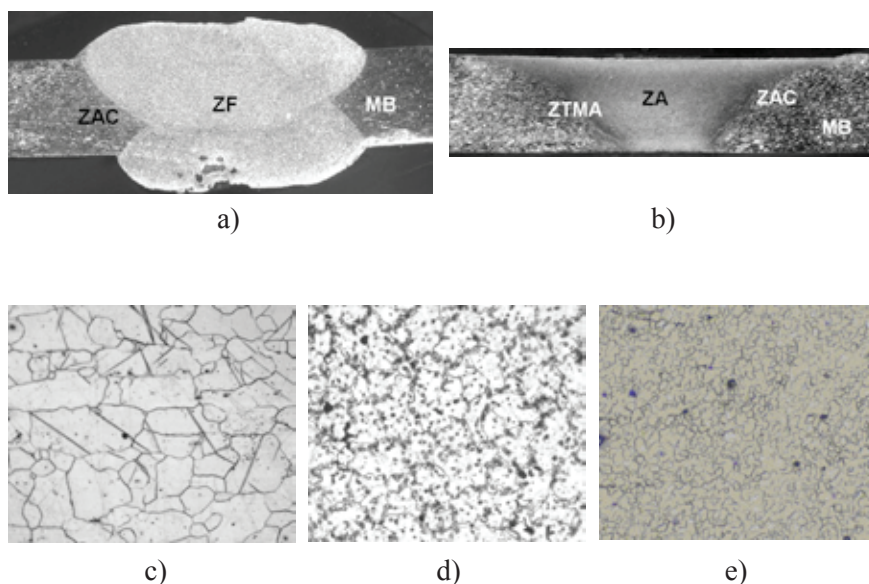
el metal base; un 64% y 85% respectivamente más pequeños que el material base.

**Tabla 3.** Determinación del tamaño de grano ASTM del material base, zona fundida y zona agitada

| Zona/<br>Tratamiento | Tamaño de Grano<br>ASTM ( $\mu\text{m}$ ) |       |
|----------------------|---|-------|
| MB                   | 5.7                                       | 49.43 |
| ZF                   | 8.7                                       | 17.7  |
| ZA / 1115            | 12.28                                     | 5.10  |
| ZA / 1121            | 12.10                                     | 5.40  |
| ZA / 1615            | 11.28                                     | 7.20  |
| ZA / 1621            | 11.63                                     | 6.40  |

**Microdureza**

Los resultados de microdureza



**Figura 2.** Macrografía del cordón de soldadura 10x: a) macrografía de Unión GTAW, b) macrografía de Unión SFA. Microestructuras típicas de c) material base, 100x, d) ZF, 100x y e) ZA, 100x

obtenidos en las uniones de SFA en la zona agitada presentan menor variabilidad, comparada con otras zonas. Se observa que la muestra 1615, que corresponde a la mayor relación de velocidades, presentó la menor dureza promedio general con un promedio de 47.7Hv. Esto refleja el efecto de un mayor aporte térmico para las condiciones de soldadura. En la zona termomecánicamente afectada, la

combinación de tamaños de grano y la presencia de orientaciones preferenciales debidas a la agitación presentan valores muy variables, que oscilan  $\pm 3.5$  puntos de dureza con relación a la zona agitada (ver Figura 3).

La zona fundida en la GTAW presenta mayor dureza respecto del material base, con valores de  $56 \pm 4$  Hv, ese aumento en la dureza favorece la fragilización del material, en la ZAC los valores de microdureza disminuyen notoriamente frente a los valores del metal base y de la zona fundida, lo cual propicia una posible fractura del material por esta zona bajo carga de tensión axial.

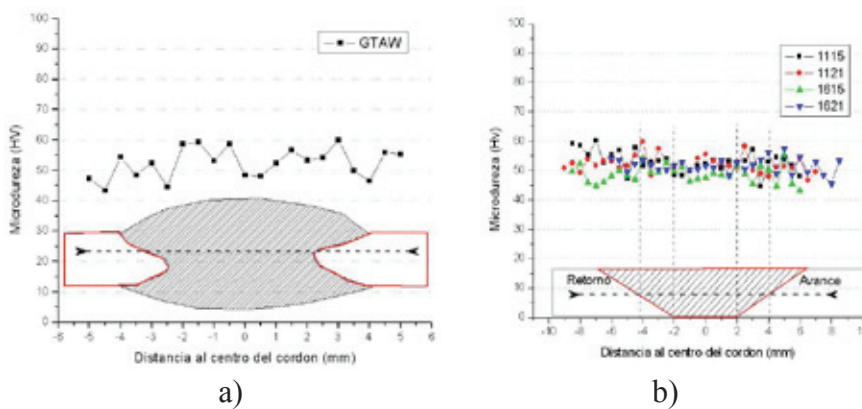


Figura 3. Resultados de microdureza en las uniones soldadas por a) GTAW y b) SFA.

**Prueba de tensión**

Los resultados de los ensayos de tensión mostraron una resistencia mecánica ligeramente superior para las uniones por GTAW, con eficiencia mecánica promedia de 99%, respecto a las uniones SFA que presentaron eficiencias en la unión promedias del 90 al 95%, con valores de elongación entre 2.6 y 3.2%. No obstante, se puede destacar que los tratamientos por SFA presentaron valores superiores de resistencia a la tensión en comparación con los obtenidos en trabajos anteriores [1], donde la máxima eficiencia alcanzada de la junta fue

de 84%, con elongaciones del 5%, para combinaciones de 136 mm/min y 1500 RPM. Otros autores han reportado en sus estudios eficiencias del 88% en la unión soldada por SFA para la aleación de magnesio AZ31B con un 0.5% de cesio [7].

Las uniones realizadas por SFA fallaron por la ZTMA donde existen granos de diferentes tamaños y en la mayoría de los casos orientados de acuerdo con el flujo plástico provocado por la herramienta en el límite con la zona agitada.

Tabla 4. Resultados de las pruebas de tensión de las uniones soldadas y del material base.

| Tratamiento   | $\sigma_u$ (MPa) | $\Delta L$ % | $\eta$ (%) |
|---------------|------------------|--------------|------------|
| SFA / 1115    | 196.29           | 3.03         | 91.30      |
| SFA / 1121    | 194.10           | 2.57         | 90.28      |
| SFA / 1615    | 193.60           | 3.20         | 90.05      |
| SFA / 1621    | 206.05           | 2.83         | 95.84      |
| GTAW          | 212.90           | 5.87         | 99.02      |
| Material Base | 215.00           | 12.93        | 100.00     |

**Fractografía**

La fractura en el material de suministro durante la prueba de tensión ocurrió en la mayoría de los casos sobre un plano a 45° respecto de la dirección de carga axial, con evidencia de una fractura de los granos de tipo dúctil, la fractura en el MB es de tipo intergranular, Figura 4 a), la fractura en GTAW (Figura 4 b)), la cual presenta una combinación de falla intergranular dúctil con presencia de dimples [8]. Las uniones de SFA presentaron múltiples dimples con tamaños diferentes en concordancia con que la falla ocurrió en la ZTMA, fracturas similares se han reportado por Chowdhury *et al* [9], teniendo para la SFA una superficie aparentemente lisa a bajos aumentos, ver (Figura 4 c).

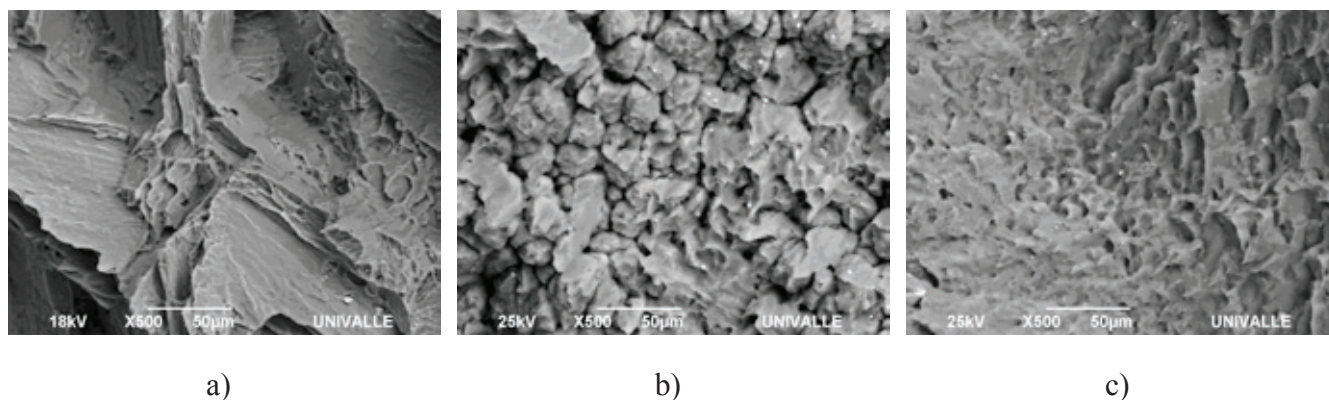


Figura 4. Fractografías SEM de las muestras de las pruebas a Tensión, a.) Metal base, b) GTAW, c.)SFA

## CONCLUSIONES

La eficiencia mecánica máxima obtenida en las uniones soldadas por GTAW fueron ligeramente superiores a las obtenidas por SFA, como se puede observar en los valores de  $\eta$  de la Tabla 4. Sin embargo, los valores de eficiencia mecánica obtenidos para SFA en este estudio fueron mejores comparativamente con resultados reportados en estudios anteriores [1], lo cual da indicios favorables sobre la calidad de los procesos en la obtención de la soldadura por SFA.

Las uniones soldadas por GTAW presentan poros debido al proceso de fusión, la cual no influye de manera significativa en las pruebas a tensión debido a que la aleación utilizada como material de aporte presenta propiedades superiores al material base, favoreciendo la fractura en la zona afectada por el calor, donde los valores de dureza y tamaño de grano son más dispersos.

## AGRADECIMIENTOS

Las soldaduras GTAW se realizaron en la Reconstructora Alemana

Ltda. en la ciudad de Cali, a la Escuela de Ingeniería de Materiales y Mecánica de la Universidad del Valle, por el uso de los laboratorios de metalografía, el microscopio electrónico y el laboratorio de mecánica. ⚙️

## REFERENCIAS

- [1] Betancourt D. Y., Sánchez H. F. Evaluación metalúrgica y mecánica de soldadura por fricción agitación en la aleación AZ-31B. Santiago de Cali, 2008. 109 p. Trabajo de Grado. Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Materiales.
- [2] K.U. Kainer, “Magnesium Alloys and Technology”; 2003, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA.
- [3] Amú M., Franco F. “Microestructura y propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de la unión soldada de la aleación 6261-T”. Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales, S1(2), p. 767-772, 2009
- [4] Oates W. “Welding handbook”. Miami: American Welding Society V3, Ed. 8, p.125-126, 1996.
- [5] S.M. Chowdhury, D.L. Chen, S.D. Bhole, X.Cao, E. Powidajko, D.C.Weckman, Y. Zhou. “Tensile properties and strain-hardening behavior of double-sided arc welded and friction stir welded AZ31B magnesium alloy”; Materials Science and Engineering A, Vol. 527 (2010), p. 2951–2961.
- [6] Gang S., Liming L., Peichong W. “Overlap welding of magnesium AZ31B sheets using laser-arc hybrid process”; Materials Science and Engineering, Vol. 429 (2006), p. 312–319.
- [7] YU S., CHEN X., HUANG Z., LIU Y. Microstructure and mechanical properties of friction stir welding of AZ31B magnesium alloy added with cerium; Journal of Rare Earths, Vol. 28, No. 2, Apr. 2010, p. 316.
- [8] ASM Handbook. “Fractography”; 1987, ASM International, Vol. 12, Ninth Edition.
- [9] Chowdhury S. M., Chen D. L., Bhole S. D., Cao X., Powidajko E., Weckman D. C., Y. Zhou, “Tensile properties and strain-hardening behavior of double-sided arc welded and friction stir welded AZ31B magnesium alloy”; Materials Science and Engineering, Vol. 527 (2010), p. 2951–2961.