

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNIONES SOLDADAS MEDIANTE PROCESO GTAW DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ31B

J. A. Ávila ^{(1), (3)}, K. J. Quintana ^{(1), (3)}, *H. E. Jaramillo ^{(1), (2)}, F. Franco ^{(3), (4)}

(1) Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales, COLOMBIA

(2) Departamento de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, COLOMBIA

(3) Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, COLOMBIA

(4) Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle, COLOMBIA

E-mail: hjsuarez@uao.edu.co

En el presente trabajo se muestran los resultados de la evaluación del comportamiento mecánico, la resistencia a la fatiga, la resistencia a la tensión y la microdureza, de las uniones soldadas de la aleación de magnesio AZ31B usando el proceso de soldadura GTAW, respecto de las propiedades del material en estado de suministro. Igualmente se realizó un análisis microestructural de las diferentes muestras soldadas para identificar los cambios de fases y de tamaño de grano por efecto del ciclo térmico de la soldadura y correlacionarlos con las propiedades mecánicas observadas. Los resultados obtenidos mostraron una reducción la resistencia a la tensión en las muestras soldadas, el material en estado de suministro alcanza la vida infinita en los ensayos a carga dinámica sobre un valor de 107.5 MPa, contrario a las uniones soldadas que no presentan un límite a la fatiga.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Palabras clave: GTAW, AZ31B, fatiga, soldadura

1. INTRODUCCIÓN

La aleaciones de magnesio clasifican en la categoría de aleaciones livianas, o ligeras, debido a su bajo peso específico, que le confiere una elevada resistencia mecánica específica, es fácil de maquinar y tiene buen potencial de reciclado, ofreciendo una competencia directa dentro de las aplicaciones industriales, donde comúnmente se han utilizado las aleaciones de aluminio [1, 2]. La realización de uniones soldadas de las aleaciones de magnesio de buena calidad abre las puertas para la construcción de diferentes elementos estructurales donde se requiera disminuir peso [3]; sin embargo, los procesos de soldadura por fusión convencionales tal como GTAW, que utiliza un electrodo no consumible de tungsteno para producir el arco y son protegidos por una gas inerte, presentan regularmente algunos problemas de deformación en laminas delgadas debido a las tensiones internas generadas por la exposición a altas temperaturas, adicionalmente se pueden presentar problemas asociados a la fusión del material, tales como presencia de poros y fusión incompleta y, en algunas aleaciones, fisuración de solidificación. En este contexto el presente documento plantea un análisis mecánico de las uniones soldadas de la aleación de magnesio AZ31B, mediante esta técnica de soldadura con el objetivo de evaluar la viabilidad de su aplicación estructural. Este análisis consistió de pruebas mecánicas, en condición de carga estática, tales como microdureza y tensión, y dinámica al material base y a las uniones soldadas por GTAW, teniendo en cuenta que si bien un elemento estructural puede presentar buen comportamiento bajo una condición de trabajo estática; en el caso de cargas dinámicas la resistencia del elemento puede disminuir notablemente, situación que fue hallada en este estudio, donde el esfuerzo último de las uniones soldadas, es similar al del material base, pero respecto a la resistencia a la fatiga los valores se tornan muy diferentes.

2. 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 3.20 mm, mediante el procedimiento de la

soldadura por fusión GTAW 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, y se hizo uso del modo de 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 ultima 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 el lado caras, 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

Las probetas de la aleación AZ31B en estado de suministro y las uniones soldadas por GTAW se caracterizaron mecánicamente mediante las pruebas de microdureza, tensión y fatiga, adicionalmente se realizó el análisis metalográfico para determinar el tamaño de grano 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 μm, para dar un acabado espejo y finalmente fue atacada con un reactivo de acético-picral para debelar la microestructura, compuesto por 10mL de ácido acético (99%), 4.2 g ácido pícrico, 10mL H₂O, 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.a, 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. Las pruebas de fatiga se realizaron de acuerdo a la norma E466, en una máquina servo hidráulica Instron 8872 en modo a tensión, con una frecuencia de 10Hz, con $R = -1 (R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max})$, con una onda de tipo sinusoidal, sobre probetas maquinadas obtenidas por medio de un centro de mecanizado CNC First mcv 300, las dimensiones de las probetas para éste ensayo se muestran en la Figura 1.b)

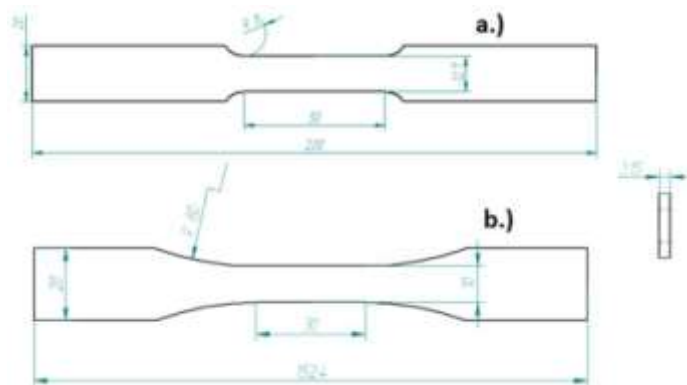


Figura 1. Dimensiones en mm de las probetas utilizadas en a) prueba a tensión y b) prueba de fatiga

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis microestructural

La muestra soldada se dividió en tres zonas como se presenta en la Figura 2.a: material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC) y la zona Fundida (ZF) [6]. La microestructura presente en el metal base está compuesta por granos grandes maclados de tamaños variados y ligeramente orientados según la dirección de conformado, con numerosas inclusiones no metálicas de Al_xMn_y , dispersas y en algunos casos también orientadas. La microestructura de la zona fundida presenta granos finos equiaxiales con precipitados de una segunda fase alojados en los bordes de grano como lo presenta la Figura 2.d y Figura 2.e. 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, ver Figura 2.c.

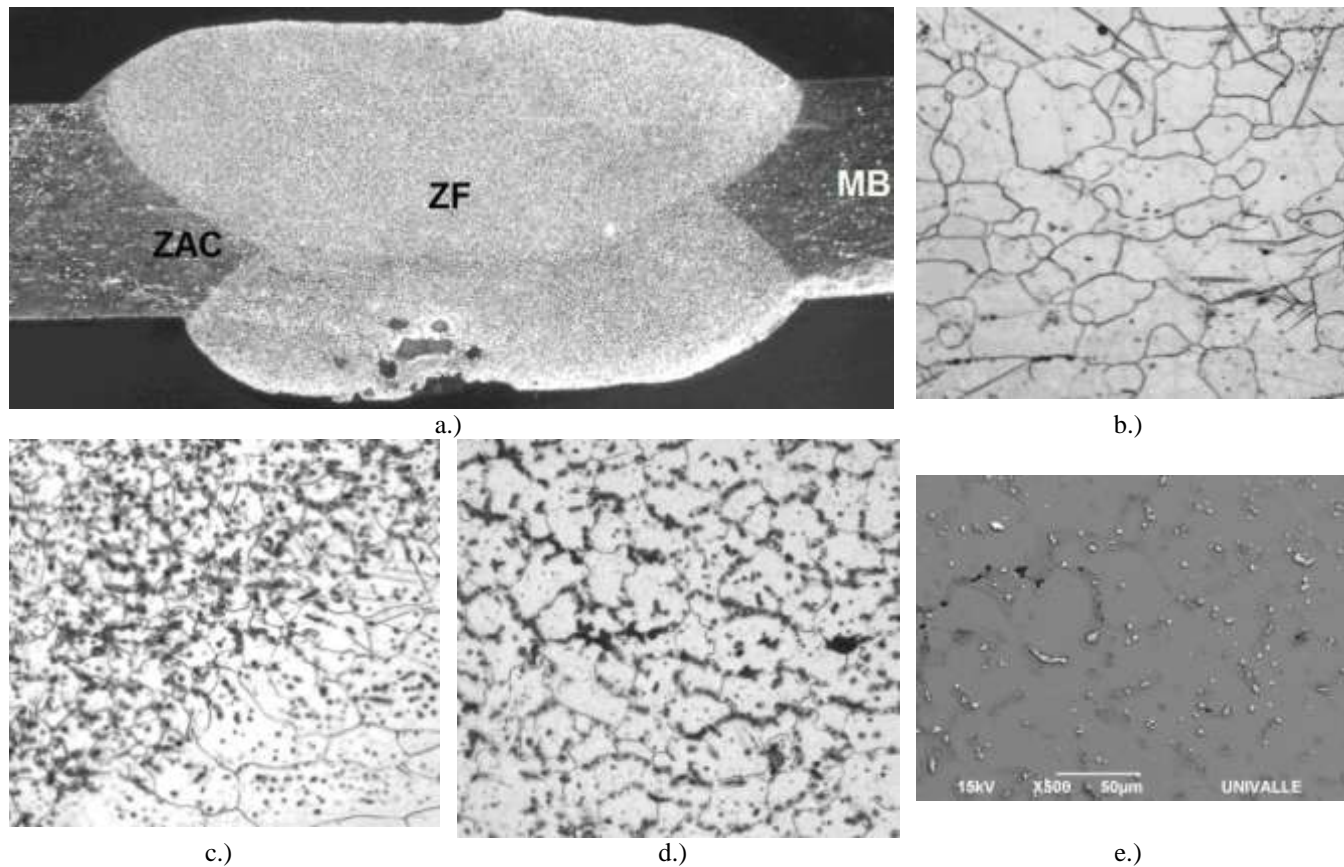


Figura 2. a.) macrografía del cordón de soldadura, 10x; Microestructuras: b.) material base, 100x, c.) transición entre la zona soldada y el material base, 100x d.) zona fundida 100x y e.) micrografía SEM de la zona fundida

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 2 se presentan los resultados del cálculo del tamaño de grano. Para el MB se encontró granos con un tamaño promedio superior al 35% más con relación a la ZF. La presencia de granos finos y segundas fases en la zona fundida representa la elevación de la resistencia mecánica del cordón de soldadura respecto al metal base, lo cual evidencia que la falla en el caso de las pruebas a tensión se realice por la ZAC.

Tabla 2. Determinación del tamaño de grano ASTM del material base y la zona fundida

Zona	Tamaño de Grano ASTM	Tamaño de grano equivalente (µm)
MB	5.7	49.43
ZF	8.7	17.7

3.2 Microdureza

Los resultados de microdureza obtenidos se muestran en la Figura 3, lo cual evidencia que la zona fundida presenta una mayor dureza respecto del material base, con valores entre 52-60 Hv, ese aumento en la dureza favorece la fragilización del material en la ZF; mientras que el material base presentan valores con mas variabilidad que oscilan entre 43-55 Hv, debido a la presencia de impurezas no metálicas, a los diferentes tamaños de grano y sus orientaciones. 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.

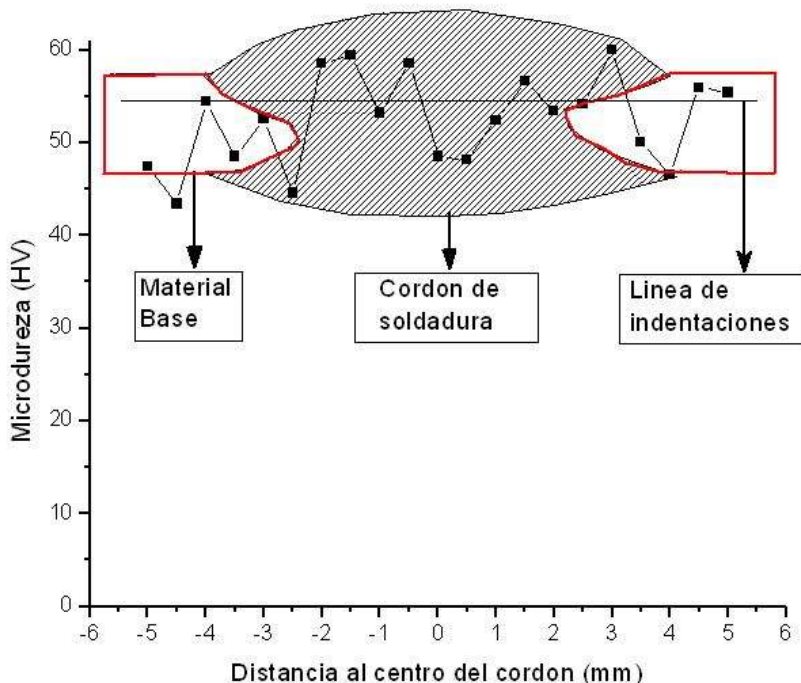


Figura 3. Perfil de microdureza de uniones soldadas realizadas por GTAW.

3.3 Prueba de tensión

Los resultados obtenidos del ensayo de tensión revelan una respuesta positiva de la unión soldada en comportamiento estático, al presentar valores de resistencia a la tensión muy similares con el material base; eficiencia mecánica del 99.02%; sin embargo, el esfuerzo a fluencia disminuye en un 11%, la ductilidad o capacidad de deformación plástica pasa de un 12.5% al 5.9% representando un 44% menos de capacidad de elongación frente al metal base, como se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de tensión del material en estado de suministro y de las uniones soldadas

Muestra	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Esfuerzo Ultimo (MPa)	Elongación (%)
GTAW	156	213	5,9
Suministro	174	215	12,5

La fractura del material en estado de suministro y del material soldado, obtenidas a partir del ensayo de tensión, presentan una inclinación alrededor de 45° respecto de la tensión aplicada, característica de una falla de tipo dúctil. La fractura en el material soldado se presentó en la ZAC a la misma inclinación del material en estado de suministro, lo cual, de acuerdo al perfil de microdurezas obtenido, presenta menores valores de dureza.

3.4 Pruebas de fatiga

Las curvas de resistencia a la fatiga se presentan en la Figura 4, en ésta es posible observar la resistencia a la fatiga del material (S_f) en función del número de ciclos a la cual falla la muestra. En estado de suministro la resistencia a fatiga es mayor que la del material soldado, logrando superar el umbral del millón de ciclos, y pasar a la zona de vida infinita al valor de 107.5 MPa [7]; las uniones realizadas mediante GTAW sobre un valor de 72 MPa (34% del esfuerzo último) supera únicamente los 260000 ciclos, presentando un comportamiento de resistencia a la fatiga de vida finita.

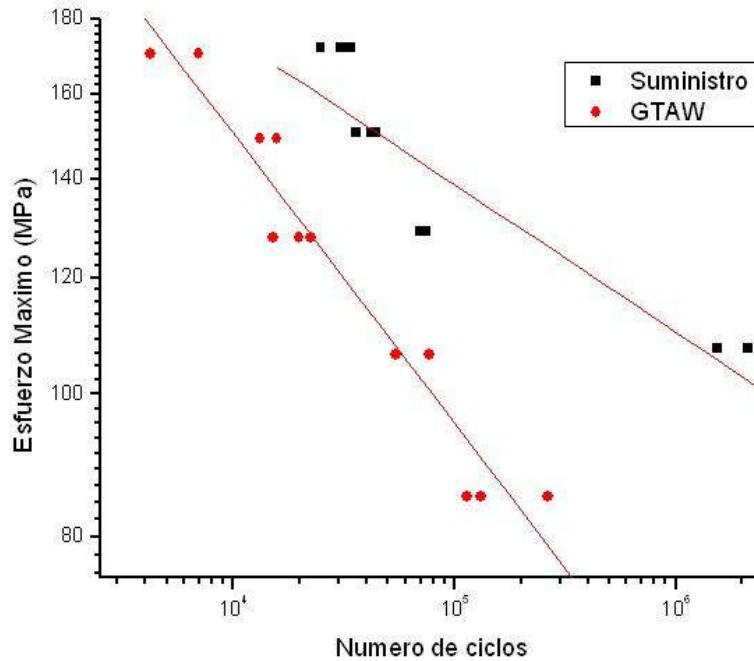


Figura 4. Curva de resistencia a la fatiga S/N para el material en estado de suministro y las uniones soldadas por GTAW

Para los casos de las muestras en estado de suministro y para las uniones soldadas por GTAW, el comportamiento de las curvas de S_f versus el número de ciclos (N) se ajusta de acuerdo con la ecuación 1, los valores de a y b se encuentran en la Tabla 4.

$$S_f = aN^b \text{ Ecuación 1}$$

Tabla 4. Valores de a y b para la ecuación 1.

	a	b
Suministro	438.70	-0.09
GTAW	924.76	-0.19

El comportamiento de la resistencia a la fatiga del material base y las uniones soldadas se asemejan a las realizadas por Padmanaban et al. [8]. La falla en la unión soldada se realizó por la zona fundida, el endurecimiento de la ZF, la presencia de impurezas y porosidades asociadas al proceso GTAW, facilita la nucleación de las grietas cuando la muestra es sometida a repetidas deformaciones elásticas en dirección axial y pese a no ser sometida a esfuerzos iguales o superiores al esfuerzo último de la unión soldada, se presenta la falla a valores de esfuerzos muy inferiores.

3.5 Fractografía

La fractura en el material de suministro en la prueba de tensión ocurrió a 45° respecto de la tensión aplicada, se observaron dimples en la zona de fractura (ver Figura 5.a), características comunes de una falla dúctil, fracturas

similares se han reportado por Chowdhury et. al [9]. La fractura en las muestras soldadas en prueba a tensión ocurrió en la ZAC, la superficie de fractura presentó una combinación de diferentes tamaños de dimples, asociados a la zona fundida y a la ZAC como se aprecia en la Figura 5.b.

En el caso de las pruebas a fatiga, en todas las muestras se observó una zona de crecimiento de grieta (Figura 5c, y 5e), y una zona de fractura final, evidenciándose en ésta última un desgarramiento pronunciado característico de la falla dúctil como el presentado en la prueba a tensión. Las fracturas exhiben estriación a diferente orden de magnitud, dependiente del tamaño de grano en el cual se encuentra la falla; la fractura en ambos casos, del material en suministro y de las uniones soldadas se inicia en los límites de grano (figura 5.d y 5.f), pero se propaga por cleavage, con patrones de ríos “river patterns” dirigidos desde la zona de origen de la falla.¹⁰

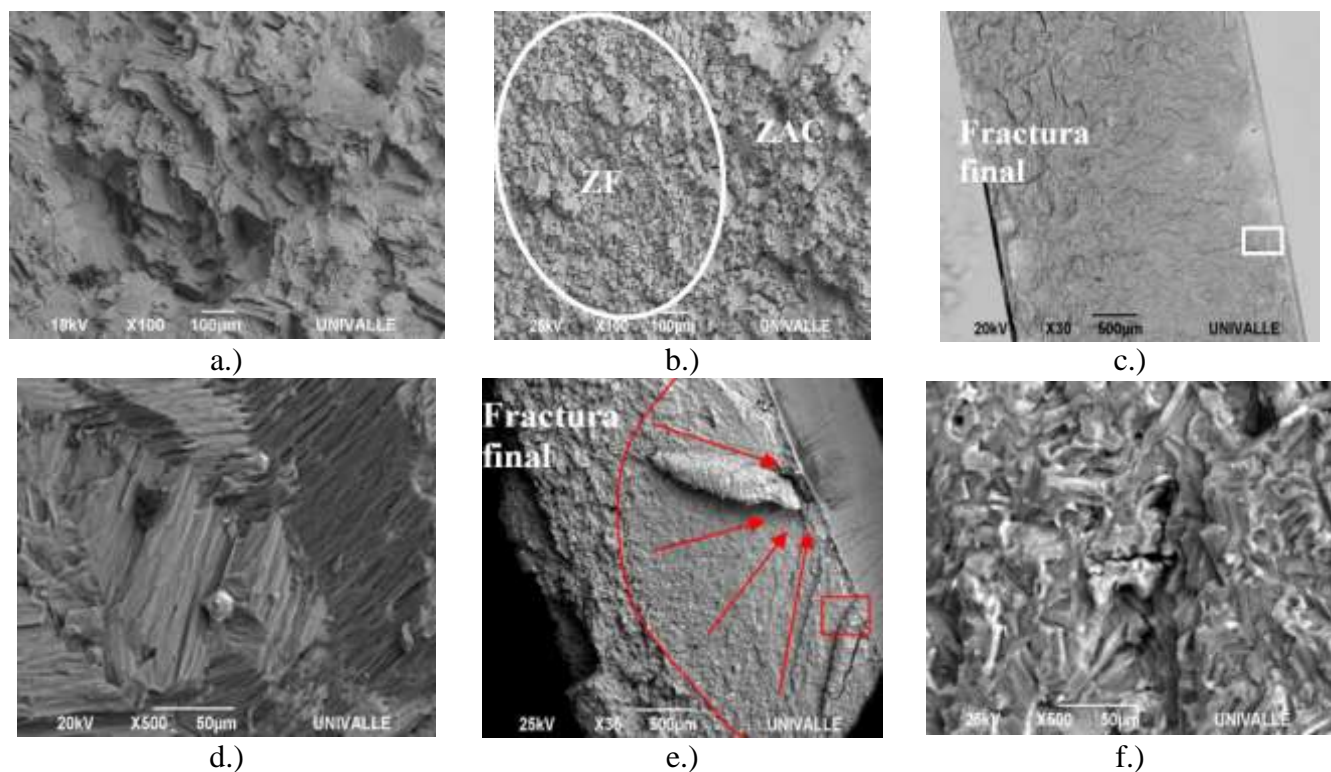


Figura 5. Fractografías de las muestras utilizadas en las pruebas a) Tensión suministro, b) Tensión GTAW, c.) Fatiga suministro, d.) Vista a 500x de probeta de material en suministro ensayada a fatiga , e.) Fatiga GTAW, f.) Detalle fatiga GTAW por 500x

3. CONCLUSIONES

Las uniones soldadas por GTAW sobre la aleación de magnesio AZ31B presentan refinamiento de grano en la zona fundida lo cual incrementa la resistencia mecánica de la unión permitiendo que la fractura en condición estática se presente en la zona de transición, sin embargo bajo cargas cíclicas, la fragilización de la unión soldada y la presencia de poros e inclusiones asociados al proceso de fusión, disminuyen drásticamente la resistencia a la fatiga del material, pasando de vida infinita bajo un esfuerzo de 107 MPa para el material en estado de suministro a vida finita hasta 260000 ciclos bajo un esfuerzo de 72 MPa para el material soldado, con su correspondiente pérdida de eficiencia mecánica a fatiga.

Las uniones soldadas por GTAW sobre la aleación de magnesio AZ31B presentan mayor dureza en la zona fundida, éste aumento de dureza, junto con los problemas de poros propician la nucleación de grietas en

presencia de cargas cíclicas, provocando la fractura a menores valores de esfuerzo, donde no se alcanza vida infinita, y se conserva una resistencia en bajo ciclaje frente al material en estado de suministro.

4. AGRADECIMIENTOS

Las soldaduras TIG se realizaron en la Reconstructora Alemana LTDA en la ciudad de Cali, a la Universidad Autónoma de Occidente por el uso de la máquina servohidráulica Instron 8872, 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 K.U. Kainer, "Magnesium Alloys and Technology"; 2003, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA.
- 2 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
- 3 F. Franco, H. Sánchez, D. Betancourt, O. Murillo; "Soldadura por fricción-agitación de aleaciones ligeras – una alternativa a nuestro alcance"; Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, S1 (3) (2009), p.1369-1375.
- 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 Shigley J. E., Mitchell L. D. "Diseño en ingeniería mecánica"; Col. Granjas Esmeralda: McGraw-Hill. 3 ed, 1985. p.289
- 8 Padmanaban G., Balasubramanian V. "Fatigue performance of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints"; Materials and Design, Vol. 31 (2010), p. 3724–3732.
- 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.
- ¹⁰, ASM Handbook. "Fractography"; 1987, ASM International, Vol. 12, Ninth Edition.