Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

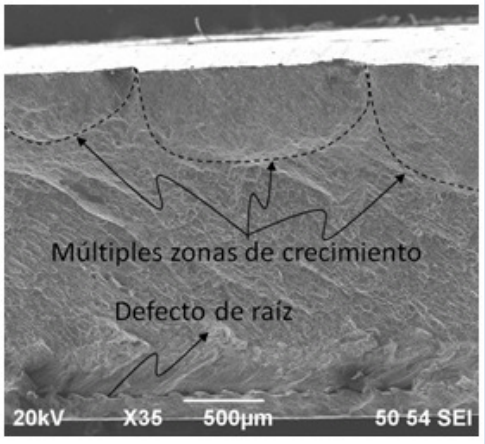
www.rlmm.org

EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TENSIÓN Y LA FATIGA DE UNIONES SOLDADAS POR FRICCIÓN AGITACIÓN DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ31B

Julian A. Ávila[1, 3], Fernando Franco[3, 4], Hector E. Jaramillo[1, 2]*

1: Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales. Cali, Colombia
2: Departamento de Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia
3: Escuela de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia
4: Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Cali, Colombia

** email: julianarnaldoavila@hotmail.com*



RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del estudio realizado sobre el efecto de las variables del proceso de soldadura por fricción agitación (SFA), velocidad de rotación y de soldadura sobre la microestructura, la resistencia a tensión y el comportamiento a fatiga de las uniones por SFA de la aleación de magnesio AZ31B producidas en una máquina fresadora convencional adaptada para el proceso. Las pruebas de fatiga de las uniones soldadas se hicieron determinando inicialmente la vida a fatiga para un rango de esfuerzos de 81 MPa, teniendo en cuenta el mejor resultado para luego construir la curva S-N. El mejor comportamiento ante cargas variables para las uniones de SFA se encontró para el tratamiento realizado con la relación de velocidades (V_R/V_A) más alta las cuales no presentaron defectos de raíz relevantes. Sin embargo, la resistencia a la fatiga se redujo en un 30% con respecto al metal base.

Palabras Claves: *Aleación de magnesio AZ31B, comportamiento a fatiga, resistencia a tensión, soldadura por fricción agitación*

TENSILE AND FATIGUE EVALUATION OF FRICTION STIR WELDS OF AZ31B MAGNESIUM ALLOY

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental study aimed at assessing the tensile strength and fatigue behaviour of friction stir welded (FSW) AZ31B magnesium alloy. The effect of rotational and linear welding velocities on the weld microstructure and performance are discussed. The FSW joints were made in a conventional milling machine adapted for the process. The fatigue tests of the welded joints were carried out under pulsating tension conditions to develop a S-N curve. The salient result from the tests was that the specimens welded with higher rotational to linear velocity ratio, (V_R/V_A), exhibited the best fatigue behaviour due to the absence of root defects. However, the fatigue strength was reduced by 30% with respect to the base metal.

Keywords: *Friction stir welding, Magnesium alloy AZ31B, fatigue behaviour, tensile strength*

Recibido: 08-03-2011 ; **Revisado:** 06-05-2011
Aceptado: 29-05-2011 ; **Publicado:** 31-05-2011

pISSN: 0255-6952 | eISSN: 2244-7113
Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2012; **32** (1): 71-78

1. INTRODUCCIÓN

Las aleaciones ligeras, especialmente el magnesio presenta bajo peso específico, alta relación resistencia-peso, buena maquinabilidad y es fácil para reciclar [1]. Estas aleaciones tienen el potencial de aplicarse en estructuras metálicas donde actualmente las aleaciones de aluminio son utilizadas, pero para ello se requiere determinar su soldabilidad y el comportamiento mecánico de las mismas sometidas a similares condiciones de servicio [2,3]. Las aleaciones de magnesio son producidas actualmente para diferentes aplicaciones industriales, especialmente utilizadas en la construcción de partes para vehículos automotores [4]. Independientemente del método de producción de las piezas, éstas pueden ser unidas por diversos métodos de soldadura, donde los procesos de fusión por arco, tal como GTAW y GMAW son los más utilizados. Estos procesos de soldadura por arco eléctrico pueden producir defectos tales como porosidades, impurezas y hasta fisuras dentro de la unión soldada [5], lo cual redunda en el detrimento de las propiedades mecánicas de la unión soldada. Como un método alternativo de soldadura existe desde hace aproximadamente dos décadas el método de SFA, el cual es realizado en estado sólido, presentando ventajas tecnológicas sobre los métodos convencionales de soldadura, tales como propiedades mecánicas similares ó superiores, bajo consumo energético debido a que solo se consume energía por parte del motor (4 HP) que impulsa el husillo y el motor del desplazamiento de la bancada (1/5 HP), no se requiere utilizar material de aporte ni atmósferas de protección [6].

Padmanaban et al. [7] investigaron la resistencia a la fatiga de uniones soldadas por fricción agitación sobre placas de la aleación de magnesio AZ31B, salvo esa referencia, la gran mayoría de estudios consultados se enfocan en la determinación de la resistencia a tensión, microestructura en la zona soldada, determinación de defectos de la aleación AZ31B, sin evaluar la resistencia a la fatiga [5,8,9]. Por lo tanto, uno de los principales objetivos de esta investigación es establecer el comportamiento a fatiga en uniones soldadas por SFA de la aleación de magnesio AZ31B.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Las unidades experimentales (UE) corresponden a placas de la aleación de Mg AZ31B cortadas de perfiles extruidos con dimensiones de 90 x 120 mm macizos y espesor de 3,2 mm, soldadas a tope por fricción agitación en dirección perpendicular a la dirección de extrusión de las placas. Se realizaron 3 UE para determinar los resultados de tensión, fatiga, perfil de microindentación Vickers, y microestructura para todos los tratamientos de SFA, mientras que para el metal base se utilizaron 8 placas con las dimensiones de las UE. En la Tabla 1 se presenta la composición química de la aleación de Mg AZ31B, obtenida por espectrometría de fluorescencia de Rayos X. Se utilizó una máquina fresadora corriente marca Nangtong X6125A, para dos niveles de las variables velocidad de rotación (VR) y la velocidad de avance (VA), como se muestra en la Tabla 2. Se conservaron constantes parámetros como la inclinación de la herramienta a 1º con respecto a la vertical, la rotación en sentido dextrógiro y la profundidad del pin a 3,1 mm de la superficie. Las dimensiones de la herramienta cilíndrica con rosca ordinaria, fueron 2,9; 4 y 12 mm para la altura de pin, diámetro de pin y diámetro del hombro respectivamente.

El análisis macro y microestructural se realizó sobre la sección transversal de la unión soldada de muestras ubicadas en las posición 2 de las unidades experimentales (Figura 1), preparada por técnicas de metalografía, atacada con el reactivo compuesto por 10 mL de ácido acético (99%); 4,2 g ácido pícrico, 10mL H2O, 70mL de etanol (95%) [10,11], y observada utilizando un microscopio óptico Olympus PMEU. La medición de tamaño de grano se realizó bajo la norma ASTM E112-96 usando el método de intercepción para todos los casos. El perfil de microindentación sobre la línea media de la misma sección transversal se realizó en un durómetro Wilson 401MVD, usando una carga de 100 gf con tiempo de aplicación de 10 s, con indentaciones separadas entre sí 0,5 mm. La prueba a tensión fue realizada en una máquina Instron 3366, con una tasa de deformación constante de 0,02 s^{-1} sobre muestras normalizadas por la ASTM E8. La prueba a fatiga se trabajó en modo de carga axial, en una máquina servo hidráulica Instron 8872, se utilizó una razón de esfuerzos de R=0,1 ($R=S_{mín}/S_{máx}$), con frecuencia de 10 Hz, temperatura ambiente de 23 ºC y aire como medio circundante; se utilizaron probetas normalizadas de acuerdo con la ASTM E 466. Inicialmente se realizó la prueba de fatiga bajo un esfuerzo máximo de 90 MPa y un rango de esfuerzos de 81 MPa, para obtener la vida

©2012 Universidad Simón Bolívar

útil de todos los tratamientos experimentales y así seleccionar el tratamiento con el mejor comportamiento a fatiga para realizar la curva (S_R-N) a la falla completa, para lo cual se realizaron 5 unidades experimentales más bajo las condiciones de este tratamiento experimental. Tanto el análisis metalográfico de la unión soldada como de las superficies de fractura se realizó en un microscopio electrónico SEM JEOL JSM 6490LV.

En la Figura 1 se muestra el esquema de corte de las probetas, el efecto de los extremos de la unión soldada se descartó mediante el corte de 12.5 mm del extremo final e inicial del cordón de soldadura.

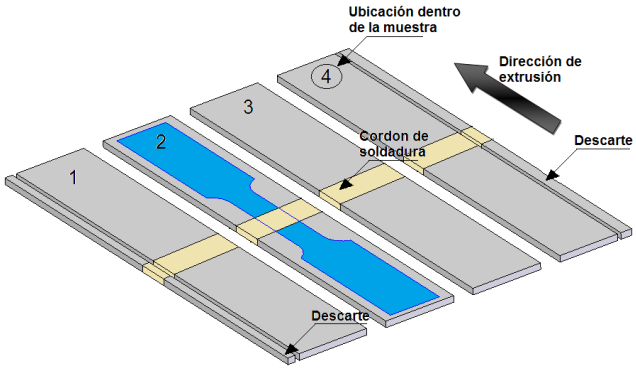


Figura 1. Esquema de la Unidad Experimental y el corte de las probetas

Tabla 1. Composición química (% peso) del metal base, aleación de Mg AZ31B.

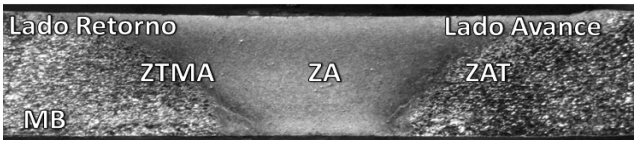
Aleación	*Al*	*Mg*	*Fe*	*Mn*	*Si*	*Zn*
AZ31B	2,8	Bal	0,007	0,52	0,09	1,0

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

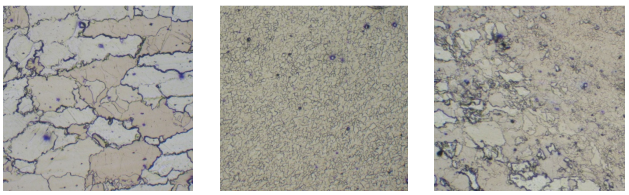
3.1 Microestructura

La forma trapezoidal del cordón por SFA en un corte transversal se presenta en la Figura 2.a) donde se muestra también, las tres zonas microestructurales diferentes: zona agitada (ZA), zona termo-mecánicamente afectada (ZTMA) y una zona afectada térmicamente (ZTA). La microestructura del metal base (MB) está compuesta por granos heterogéneos ligeramente alargados y orientados, además de las partículas intermetálicas del tipo Al_xMn_y dispersas y orientadas, como se muestra en la Figura 2.b). La microestructura en la ZA está compuesta por granos refinados y homogéneos debido a la recristalización dinámica [6], como se observa en la Figura 2.c). La ZTMA a los lados de la ZA presenta una mezcla de granos grandes y finos debido a fenómenos de recristalización parcial de los granos, como lo muestra la Figura 2.d), también se observan en los límites con la ZTA evidencias de "bandas de deformación" hacia las paredes del cordón de soldadura. La ZTA es muy pequeña y difícil de determinar sobre la aleación de magnesio AZ31B.

De acuerdo con la norma ASTM E112-96 y con ayuda de micrografías tomadas a 100 aumentos se determinó el tamaño de grano para el MB y la ZA de las uniones soldadas, como se muestra en la Tabla 2. Con referencia al metal base con un tamaño de grano promedio de 50 µm, la ZA mostró un fuerte refinamiento de grano, con tamaños entre 5 y 7 µm. Las soldaduras hechas con menor velocidad de rotación y las menores relaciones de velocidad (V_R/V_A) presentaron el menor tamaño de grano.



a.)



b.) c.) d.)

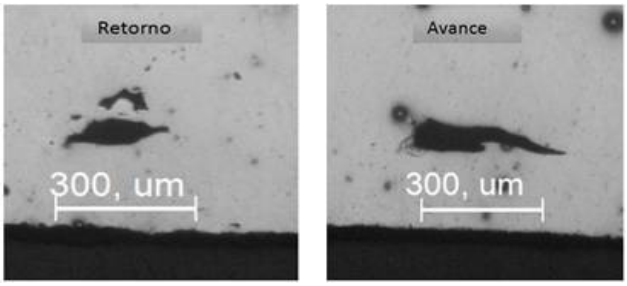
Figura 2. Detalle de la microestructura de la zona soldada, 100X. a.) Macrografía del corte transversal. b.) Metal Base. c.) Zona Fundida. d.) Zona Térmicamente Afectada.

Tabla 2. Tamaño de grano del metal base y la ZA en las diferentes uniones por SFA.

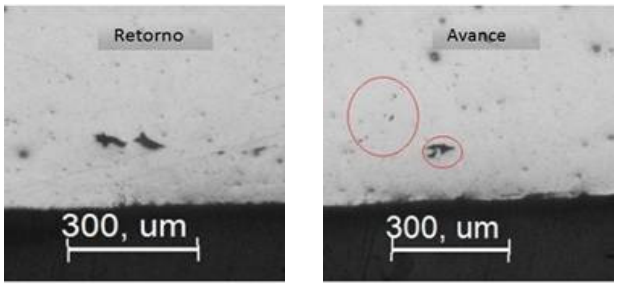
Muestra	V_R *rev/min*	V_A *mm/min*	V_R/V_A	*Tamaño Grano ASTM*	*Diámetro grano µm*
1615	1600	159	10,0	11,3	7,0
1621	1600	217	7,4	11,6	6,5
1115	1120	159	7,1	12,3	5,0
1121	1120	217	5,2	12,1	5,5
MB	---	---	---	5,7	50,0

©2012 Universidad Simón Bolívar

Las soldaduras 1121, hechas con la menor relación de velocidades, (V_R/V_A = 5,2), correspondiente al menor aporte de calor, presentaron defectos del tipo no-unión de aproximadamente 300 µm con vacíos en las esquinas de la raíz del cordón y orientados paralelamente a la superficie de la muestra (Figura 3). Las muestras 1115 y 1621, con relación V_R/V_A aproximada a 7 mostraron defectos tipo túnel de hasta 50 µm. Mientras que la muestra 1615, con la mayor relación de velocidad (V_R/V_A=10) y mayor aporte de calor, no presentó defectos relevantes.



a.)



b.)

Figura 3. Defectos típicos en las uniones soldadas por SFA. Muestras a.) 1121(V_R/V_A = 5,2) y (b.) 1621 (V_R/V_A = 7,4)

3.2 Microindentación

Los valores de dureza obtenidos no presentaron diferencias mayores entre las diferentes muestras, obteniendo un promedio general de 50 HV, igual al metal base, como lo reportado por Betancourt *et al.* [1]. Se presentó una menor dispersión de dureza en la ZA comparada con las otras zonas de la región soldada por SFA, debido especialmente a la microestructura más homogénea de granos equiaxiales refinados. En la Figura 4, se observan valores ligeramente superiores para la muestras 1121 (V_R /V_A=5,2); mientras que para la muestra 1615 (V_R/V_A=10,0) se observan valores apenas inferiores respecto al MB. Lo anterior indica que la dureza en la ZA tiende a aumentar con la disminución de la relación de velocidad y del aporte de calor de soldadura.

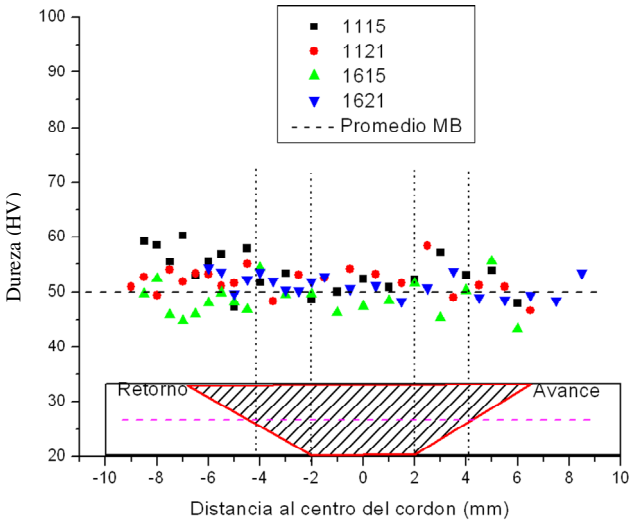


Figura 4. Perfiles de dureza obtenidos en las uniones por SFA.

3.3 Resistencia a la tensión

La resistencia a la tracción (S_u) promedio obtenida para el MB fue de 215 MPa y el porcentaje de elongación fue de 13%. Mientras que las muestras 1621 con V_R/V_A=7,4 presentaron los mejores resultados de tensión, con una eficiencia mecánica del 96%, como se observa en la Tabla 4. La deformación plástica total de las uniones soldadas fue muy inferior a la del metal base y la zona de falla estuvo ubicada por la zona de transición de la ZA a la ZTMA, por los lados avance y retorno.

Tabla 4. Propiedades mecánicas obtenidas de las uniones por SFA y el MB.

Muestra	V_R/V_A	ε *(%)*	S_u *(MPa)*	η *(%)*	*N (ciclos) S_R=81 MPa*
1615	10,0	3,2	194	90	1.164.792
1621	7,4	2,8	206	96	425.460
1115	7,1	3,0	196	91	77.300
1121	5,2	2,6	194	90	1.019.703
MB	---	13,0	215	100	N/A

3.4 Resistencia a Fatiga

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la vida a fatiga evaluada en un rango de esfuerzos de 81 MPa para todos los tratamientos experimentales, encontrándose el peor comportamiento en las muestras 1115, debido a los defectos tipo *Kissin Bond* o líneas de no unión en la raíz del cordón, transversales a la aplicación de la carga, los cuales favorecen el rápido crecimiento de la grieta, como lo planteó Zhou *et al*. [12]. De la Tabla 4 se puede resaltar que los tratamientos 1121 y 1615 presentaron resultados a fatiga similares, con relaciones V_R/V_A de 5,2 y 10,0 respectivamente. El tratamiento experimental 1121 se diferencia del 1615 en que presentó defectos de raíz paralelos a la aplicación de la carga, y pese a inhibir el efecto de la fatiga terminan favoreciendo el inicio de la falla y un comportamiento a fatiga menor. Mientras la muestras 1615 no presentaron defectos relevantes; razón por la cual se seleccionó para realizar la curva S-N completa.

Las uniones por SFA presentaron dos sitios de inicio de falla en fatiga. La Figura 5 muestra que el sitio de inicio 1 se encuentra en la zona donde se presentan los defectos de tipo túnel de la soldadura, producidos por deficiencias de flujo plástico y llenado en el borde inferior del pin, no por falta de penetración en la raíz del cordón [11]; mientras que el crecimiento posterior de la falla ocurre sobre la ZA. El sitio de inicio 2, se encuentra en la superficie del cordón entre la ZTMA y la ZTA y su crecimiento de falla se produce sobre el MB. Las probetas de fatiga fueron completamente pulidas hasta eliminar la rebaba. En esta zona de transición se presentan características microestructurales como la orientación cristalográfica preferencial y altos niveles de tensiones residuales que favorecen el inicio y la propagación de la grieta.

Respecto del lado de falla a fatiga, se encontró una mayor frecuencia de ocurrencia de la falla por el lado avance que por el lado retorno. De acuerdo con la Tabla 5 se puede decir que la mayoría de las muestras soldadas con 1120 rpm presentaron inicios de falla a fatiga por la zona 1, debido al mayor porcentaje de poros y defectos de no-unión en la raíz del cordón. Mientras que la mayor parte de las muestras soldadas con velocidad de rotación de 1600 rpm fallaron a fatiga por la zona 2. Esto parece indicar que al tener mejores condiciones de flujo plástico en el cordón y mejor calidad de las juntas, como resultado del mayor aporte de calor de fricción, el sitio de la falla de las uniones soldadas se traslada a la zona de transición de la ZTMA-ZTA.

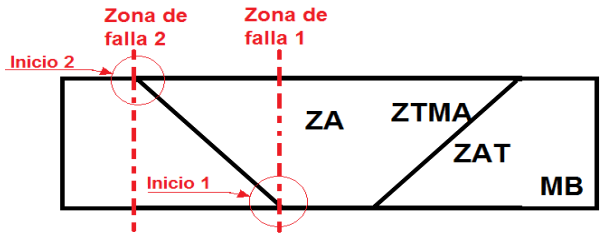


Figura 5. Ubicación de las fallas a fatiga en las uniones por SFA.

Tabla 5. Porcentajes de fallas a fatiga en las uniones por SFA.

Muestra	*Lado de la falla (%)*		*Zona de falla (%)*	
	Avance	*Retorno*	*1*	*2*
1115	88	12	75	25
1121	66	33	67	33
1615	57	43	36	64
1621	75	25	33	67

La resistencia a la fatiga de muestras por SFA se evaluaron desde un rango de esfuerzos de 81 a 129 MPa, y para el MB se evalúo desde 97 a 155 MPa. La Figura 6 muestra las gráficas S-N para el MB y la muestra 1615, las cuales presentan pendientes similares. La resistencia a la fatiga evaluada en $2x10^6$ ciclos a la falla ocurrió en 81 MPa para el MB y en 60 MPa para la muestra 1615. Esto indica que la resistencia a la fatiga de las uniones por SFA disminuyó un 26% con respecto al material base; una tendencia similar presentó Padmanaban *et al*. [7]. Las flechas en la Figura 6 representan muestras que no fallaron y se detuvo la prueba debido al tiempo excesivo de éstas.

Dado que las curvas S-N se realizaron en escala log-log, el ajuste de los datos se realizó por mínimos cuadrados, siguiendo la norma ASTM E739-91 [13], donde se relaciona la ecuación $\boldsymbol{log\,(N) = log\,(A)+m\,x\,log(S_R)}$ con la forma $\boldsymbol{N= C(S_R)^m}$ correspondiente a la ecuación de Basquin. Donde $\boldsymbol{S_R}$ corresponde al rango de esfuerzos, $\boldsymbol{N}$ es el número de ciclos a la falla. Morgado *et al*. [14] y Lee *et al*. [15] plantearon un método sencillo para el cálculo de las constantes $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{C}$ y $\boldsymbol{m}$.

©2012 Universidad Simón Bolívar

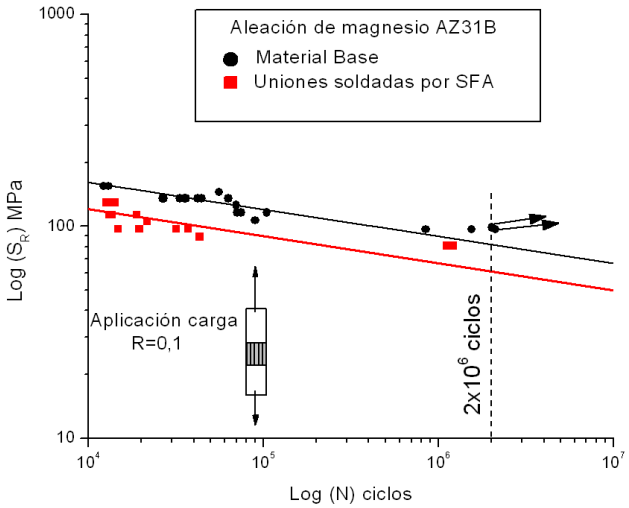


Figura 6. Curva S-N de la muestra 1615 y MB.

En la Tabla 6 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en la prueba a fatiga, se puede destacar que los resultados de las uniones soldadas son más dispersos, presentando por mayor valor de varianza (6%) que el material base, el cual influenció la generación de una región de confianza mucho menor, dado que el cálculo de la resistencia a la fatiga de una curva de diseño con probabilidad de falla de 2,5% (P=2,5), se desplaza más hacia la parte izquierda respecto al MB, de acuerdo al código BS 7608 [16].

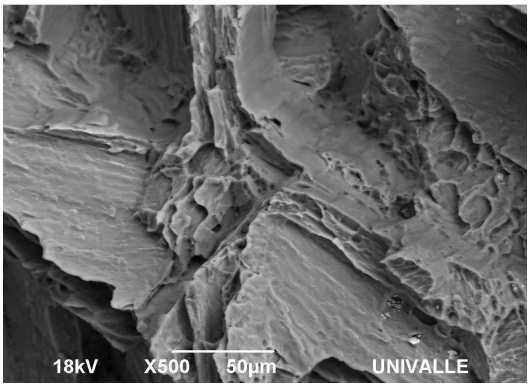
Tabla 6. Resistencia a la fatiga del material base, uniones por SFA y GTAW

Estado		*MB*	*Uniones por SFA*
M		-7,830	-7,790
Valores medios (P=50%)	Resistencia a fatiga (MPa)	81	60
Valores de diseño (P=2,5 %)	$2x10^6$ ciclos	61	43
Pruebas con falla		19	14
Pruebas sin falla		2	0
Varianza		0,266	0,321
Desviación estándar		0,516	0,567

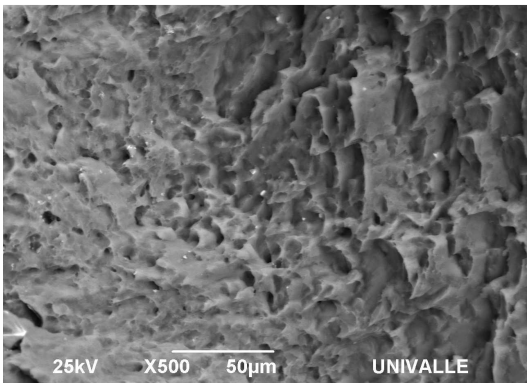
3.5 Superficies de fractura

Las muestras de metal base presentaron una ligera estricción antes de la falla en la prueba a tensión, con característica dúctil. Como lo presenta la Figura 7.a), se presentó una falla de tipo transcristalina, con pequeños hoyuelos en las fronteras de granos característica de los metales con estructura cristalina HCP.

Las fallas a tensión para las uniones por SFA se presentaron fuera del cordón de soldadura, con ligera estricción antes de la falla. La superficie de fractura presentó hoyuelos de tamaños menores de 10 µm, como lo presenta la Figura 7.b), confirmando que la falla ocurrió sobre la ZTMA, puesto que la inclinación de la falla coincide con el ángulo de inclinación (~45°) de la pared del cordón de soldadura. Superficies de fractura similares las han reportado Ren *et al*. [9], Chowdhury *et al*. [10] y Pérez *et al*.[17].



a.)



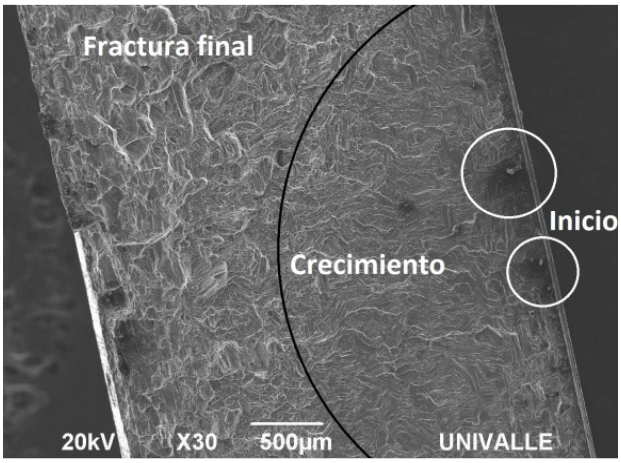
b.)

Figura 7. Micrografía SEM de la superficie de fractura en la prueba a tensión. a.) MB y b.) Uniones por SFA.

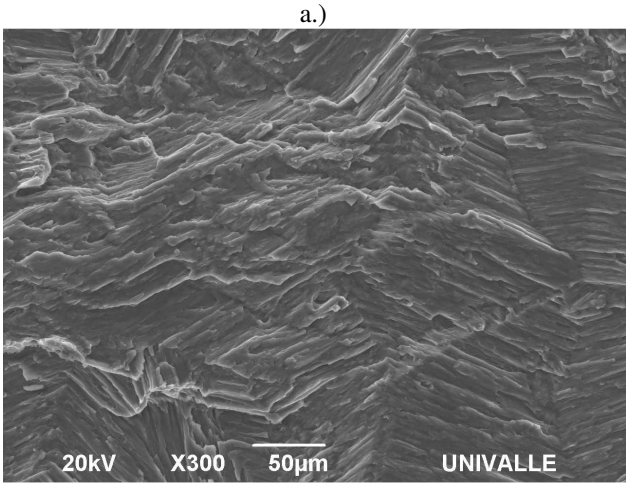
Las superficies de fractura de las muestras evaluadas a fatiga en general presentan una zona de inicio, una zona de crecimiento de falla y una zona de falla final. Para el MB la falla inicia a partir de partículas intermetálicas (Al_xMn_y) y/o marcas del acabado superficial, como se observa en la Figura 8.a). La

©2012 Universidad Simón Bolívar

zona de propagación revela las estrías características del fenómeno de fatiga, con orientaciones diferentes para granos vecinos y que la fractura creció de forma transcristalina, orientada sobre los planos cristalográficos [18] (Figura 8.b)).



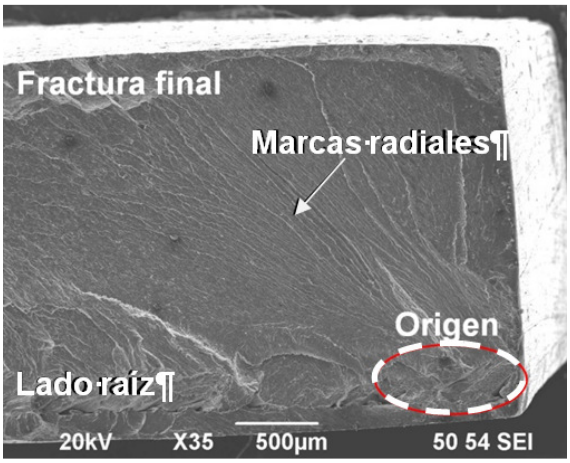
a.)



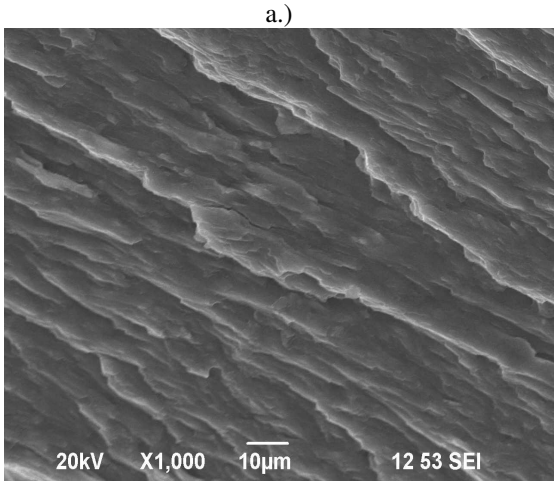
b.)

Figura 8. Micrografía SEM del MB, de la falla a fatiga: a.) 30X y b.) 300X

La Figura 9.a.) muestra el inicio 1 de falla en un defecto de raíz continuo y paralelo a la superficie inferior de la soldadura. En la Figura 9.b.) se presenta un detalle de la zona de propagación de la falla dentro de la ZA, con estrías paralelas y espaciadas cada 10 µm, valor que se relaciona directamente con el tamaño de los granos correspondientes a la ZA.



a.)



b.)

Figura 9. Micrografías SEM típica de superficies de fractura a fatiga de uniones por SFA con zona de falla 1. Muestra 1121. a.) Inicio de grieta a partir de un defecto de raíz; b.) Detalle de estriaciones paralelas en la zona de crecimiento debidas a fatiga

4. CONCLUSIONES

1. La eficiencia mecánica a tensión obtenida en las uniones por SFA fue del 90 al 96 % con referencia al material base.
2. La zona agitada de las uniones por SFA presentó una microestructura compuesta por granos equiaxiales homogéneos refinados por recristalización dinámica con una reducción hasta del 90% con respecto al material base.
3. En las muestras realizadas con velocidad de rotación de 1600 rpm se logró la suficiente coalescencia de los granos para producir una junta sin defectos.
4. Las uniones soldadas por SFA presentaron una reducción del ~30% de la resistencia a la fatiga evaluada en $2x10^6$ ciclos con referencia al MB.

©2012 Universidad Simón Bolívar

Sin embargo, la pendiente de la curva S-N fue similar a la del metal base.

5. Los resultados de la resistencia a fatiga de las uniones por SFA fueron dependientes de las propiedades mecánicas de la ZTMA y de la forma y ubicación de los defectos de raíz.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de Occidente. A la Escuelas de Ingeniería de Materiales y Mecánica de la Universidad del Valle. A la empresa Forsa por donar el material objeto de estudio. Al ingeniero Jaime Buitrago por el entendimiento propio del fenómeno de fatiga.

6. REFERENCIAS

[1]. Franco F, Sánchez H, Betancourt D, Murillo O. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 2009; S1: 1369-1375.

[2]. Kainer KU. Magnesium Alloys and Technology. Geesthacht (Alemania): WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA, 2003, p. 9-22.

[3]. Amú M, Franco F. Suplemento de la revista latinoamericana de metalurgia y materiales. 2009; S1 (2): 767-772,

[4]. Friedrich H, Mordike B. Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data Applications. Berlin (Alemania) : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, p. 1-10.

[5]. Afrin N, Chen DL, Cao X, Jahazi M. Materials Science and Engineering A. 2008; 472: 179–186.

[6]. Mishraa RS, Mab ZY. Mater. Sci. Eng. 2005, R 50: 1-78.

[7]. Padmanaban G, Balasubramanian V. Materials and Design. 2010, 31, p. 3724–3732

[8]. Pareek M, Polar A, Rumiche F, Indacochea J. JMEPEG. 2007, 16: 655–662

[9]. Ren SR, Ma ZY, Chen LQ, Scripta Materialia. 2007; 56: 69–72.

[10]. Chowdhury SM, Chen DL, Bhole SD, Cao X, Powidajko E, Weckman DC, Zhou Y. Materials Science and Engineering A. 2010; 527: 6054-6075.

[11]. Ávila JA, Jaramillo HE, Franco F. El hombre y la máquina. 2010; 35: 166-171.

[12]. Zhou C, Yang X, Luane G. J Mater SCI. 2006; 41: 2771–2777.

[13]. Norma ASTM E739-91, Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (E-N) Fatigue Data, West Conshohocken (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2004.

[14]. Morgado T, Branco M, Infante V. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, Mecânica Experimental. 2007; 14: 35-43.

[15]. Lee Y, Pan J, Hathaway R, Barkey M. Fatigue Testing and Analysis. Burlington: Elsevier Butterworth–Heinemann, 2005. 414 p.

[16]. Norma BS 7608, Fatigue Design and Assessment of Steel Structures, London (Reino Unido): British Standards Institution, 1993.

[17]. Pérez CR, Moglioni A, Vedia LA. CONAMET / SAM-Simposio Materia. 2002; 1-5.

[18]. Engel L, Klingele H, An atlas of metal damage: surface examination by SEM. London (Reino Unido): Wolf Science Books, 1981, p. 86-87.

©2012 Universidad Simón Bolívar