Rev. LatinAm. Metal. Mat.

Artículo Regular

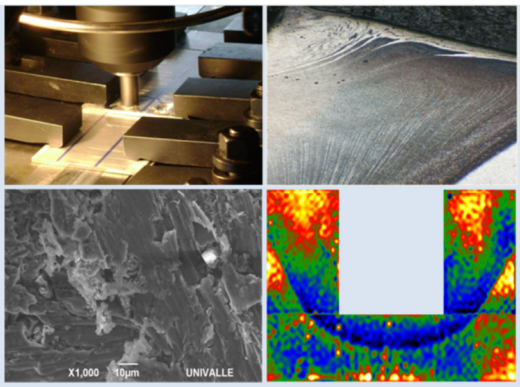
www.rlmm.org

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SOLDADURAS DE PUNTO POR FRICCIÓN-AGITACIÓN DE LA ALEACION DE ALUMINIO 6063-T5

Karen J. Quintana[1,2] Rolando Falla[2], Fernando Franco[1,3], Nelly A. de Sánchez[2], Johnnatan Rodriguez[4]*

1: Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
2: Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales, GCIM, Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali, Colombia.
3: Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia.
4: Laboratorio Nacional de Nanotecnologia (LNNano) – CNPEM/ABTLUS. Campinas, Brasil

* *e-mail: kjquintanac@gmail.com*



RESUMEN

Este artículo estudia el comportamiento mecánico de soldaduras por fricción-agitación de punto, SFAP, en láminas de aluminio AA6063-T5, realizadas en una fresadora universal y en una máquina para esta técnica de soldadura. El análisis de la microestructura de las uniones soldadas, permitió correlacionar los cambios microestructurales, ocasionados por el efecto térmico y de la deformación plástica del proceso de soldadura, con las propiedades mecánicas encontradas en las soldaduras. Adicionalmente se realizó la comparación del comportamiento a carga estática de las juntas por SFAP con uniones por remaches. Los resultados mostraron que las uniones soldadas superan en un 100 % el comportamiento a tensión/cortante de las juntas remachadas, presentando tipo de falla de fractura interfacial. Los valores de microdureza en la zona agitada son comparables con los del metal base y se evidencia una reducción drástica en la zona termo-mecánicamente afectada que facilita la falla en condición de carga estática. El análisis microestructural muestra un refinamiento de grano del 90 % en la zona agitada respecto del metal base, que explica los valores más altos de microdureza en esta zona. Se encontró una ligera superioridad en el comportamiento mecánico de las soldaduras realizadas en la máquina estándar frente a las realizadas en la fresadora universal atribuida al control de parámetros en el proceso.

Palabras Claves: Soldadura por fricción-agitación de punto, aleación de aluminio 6063-T5, análisis microestructural, comportamiento mecánico.

MECHANICAL BEHAVIOR OF FRICTION STIR SPOT WELDING OF ALUMINUM ALLOY 6063-T5

ABSTRACT

This article studies the mechanical behavior of Friction Stir Spot Welds, FSSW, in AA6063-T5 aluminum sheets, conducted on a universal milling machine and in a special machine for this welding technique. The microstructure analysis of the welded joints, allowed the correlation between the micro structural changes, caused by the thermal effects and the plastic deformation of the welding process, with the mechanical properties found in the welds. Additionally, the static behavior of the FSSW joints together with rivets was compared. The results showed that the tensile behavior of the welded joints exceeds in 100 % that of the riveted joints, showing an interfacial fracture type of failure. The values of microhardness in the heat affected zone are comparable with those of the base metal and show a drastic reduction in the thermo-mechanically affected zone that facilitates the fault condition under static load. Micro structural analysis shows a grain refinement of 90 % in the stirred zone related to the base metal, explaining the higher microhardness values in this zone. It was found a small increase in the mechanical behavior of welds made in the standard machine compared to those in the universal milling machine assigned to the better control of process parameters.

Keywords: Friction Stir Spot Welding, 6063-T5 Aluminum alloys, Micro structural analysis, Mechanical behavior.

Recibido: 14-03-2012 ; **Revisado:** 14-04-2012
Aceptado: 10-05-2012 ; **Publicado:** 29-05-2012

pISSN: 0255-6952 | eISSN: 2244-7113
Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2013; **33** (2): 192-199

1. INTRODUCCIÓN

El uso por parte de la industria de transporte, de las aleaciones de baja densidad, como las aleaciones de magnesio y aluminio, es una tendencia que crece a nivel mundial. Sin embargo, las juntas soldadas por fusión de estas aleaciones tienden a presentar inconvenientes de soldabilidad, debido a la necesidad de remoción de la capas de óxido de la superficie y a la susceptibilidad de generar defectos como poros. Un fenómeno crítico en la soldadura de las aleaciones de magnesio y aluminio es la fisuración de solidificación, durante el enfriamiento desde la fase líquida, en soldaduras sin material de aporte ó autógenas; y como consecuencia de esto se obtienen procesos de alto costo y baja calidad en las uniones soldadas. [1]

La soldadura por fricción-agitación de punto, SFAP, es una variación de la técnica de soldadura por fricción-agitación, SFA, desarrollada en 1991 por el Instituto Tecnológico de Soldadura, ITS, de Cambridge, Inglaterra; este proceso de soldadura ofrece ventajas frente a las técnicas convencionales, como la obtención de juntas soldadas sanas con buenas propiedades mecánicas, con menores esfuerzos residuales y distorsiones. [2-4]. Razones como las mencionadas anteriormente y un bajo costo de producción han favorecido la incursión de los procesos de SFA en la industria automotriz, para la unión de partes fabricadas en aleaciones de aluminio estructural; por ejemplo, en compañías como Mazda Motor Corporation y Kawasaki Heavy Industries, entre otras. [5-6].

En el proceso de soldadura por fricción-agitación de punto en laminas metálicas, una herramienta giratoria desciende penetrando la lámina superior y parte de la lámina inferior, manteniendo la fuerza descendente aplicada y la velocidad de rotación por un tiempo adecuado, hasta cuando el material adyacente a la herramienta, calentado por la fricción y ablandado es deformado plásticamente, y en estado sólido se adhieren las láminas superior e inferior, finalmente se retira la herramienta dejando las láminas soldadas [5, 7]. La Figura 1, muestra esquemáticamente, el proceso de SFAP.

Debido a la ausencia de máquinas estándar para realizar este tipo de soldadura en algunas partes del mundo, algunos autores [7-12] han realizado diferentes investigaciones en esta técnica de soldadura utilizando para el proceso una fresadora universal para producir las juntas a analizar. En este contexto surge la importancia de evaluar el comportamiento mecánico de las uniones soldadas mediante la técnica de fricción-agitación de punto, realizadas en una fresadora universal, comparadas con uniones similares realizadas en una máquina estándar para realizar la SFA.

Figura 1. Esquema del proceso de SFAP

2. PARTE EXPERIMENTAL

El desarrollo de este proyecto comprende en su fase experimental, la elaboración de juntas a traslapo, de láminas de aluminio AA6063-T5 mediante la técnica SFAP, empleando una máquina RM-1 *Transformation Tecnhnologies Inc.*, con capacidad de carga de 0 - 70 KN, velocidades de rotación de 0 - 3600 rpm y una precisión de 0,01 mm; y una fresadora universal Nangton, con velocidades del husillo de 35 a 1600 RPM, una potencia de 5 HP, velocidades de avance de 0,5 a 30 mm/min y avances automáticos en los ejes x, y, z. La caracterización de las juntas se realizó mediante análisis microestructural, ensayos de micro-dureza, tensión/cortante y análisis del tipo de falla mediante microscopia electrónica de barrido.

2.1 Procedimiento de soldadura.

Para el desarrollo de este estudio se emplearon láminas de aluminio AA6063-T5 de 2,8 mm de espesor, con anodizado superficial de un espesor entre 10 y 15 µm; obtenidas a partir de perfiles extruidos con forma de tubo rectangular; la composición química y las propiedades del material base, de acuerdo a lo establecido por el *Handbook* de Aluminio [13], se presentan en la Tabla 1. Las láminas se soldaron a traslapo, de acuerdo a lo establecido por la sociedad americana de soldadura, como se muestra en el esquema de la Figura 2, empleando una herramienta cilíndrica fabricada en acero AISI H13 con tratamiento térmico de temple y revenido, para una dureza mínima de 55HRC. La herramienta tiene hombro plano de 12 mm de

©2013 Universidad Simón Bolívar

diámetro y un extremo (*pin*) con rosca ordinaria de 4 mm de diámetro y 4,1 mm de longitud. De acuerdo con los resultados de ensayos preliminares, se seleccionó una velocidad de giro de la herramienta de 1600 rpm en sentido anti-horario, un tiempo de sostenimiento de 5 segundos y una profundidad de penetración del 75 % de los espesores combinados.
La Figura 3 muestra el montaje empleado en la fresadora universal Nangton para realizar las soldaduras de punto y el montaje en la máquina para esta técnica de soldadura.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de la aleación AA6063-T5

Composición química									
Componente	*Si*	*Fe*	*Cu*	*Mn*	*Mg*	*Cr*	*Zn*	*Ti*	*Otros*
% en peso	0,60	0,35	0,10	0,10	0,90	0,10	0,10	0,10	0,15

Propiedades mecánicas					
A tensión				*Esfuerzo de fatiga (MPa)*	*Dureza (Hv)*
Esfuerzo ultimo (MPa)	*Esfuerzo de fluencia (MPa)*	*Elongación a ruptura (%)*	*Módulo de elasticidad (MPa)*		
186	145	12	69	69	70

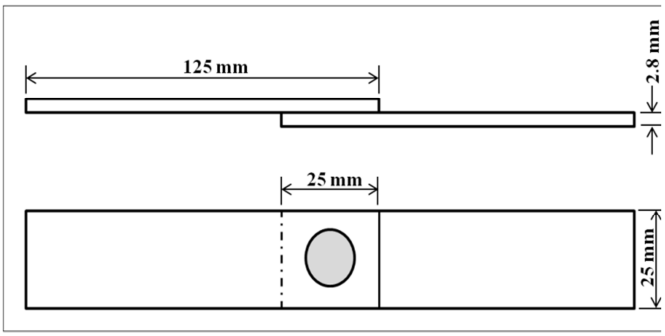


Figura 2. Esquema de las probetas soldadas a traslapo de láminas de aluminio AA6063-T5 mediante SFAP.

Con el objetivo de comparar la resistencia a tensión/cortante de la SFAP con una técnica de unión convencional para este tipo de aleaciones de aluminio, se realizaron uniones por remaches, manteniendo la configuración propuesta en la Figura 2. Para tal fin, se empleó una máquina remachadora Bellota SC 702 y un remache tipo *pop* referencia SNAD5140BS de 5 mm de diámetro por 15 mm de longitud.

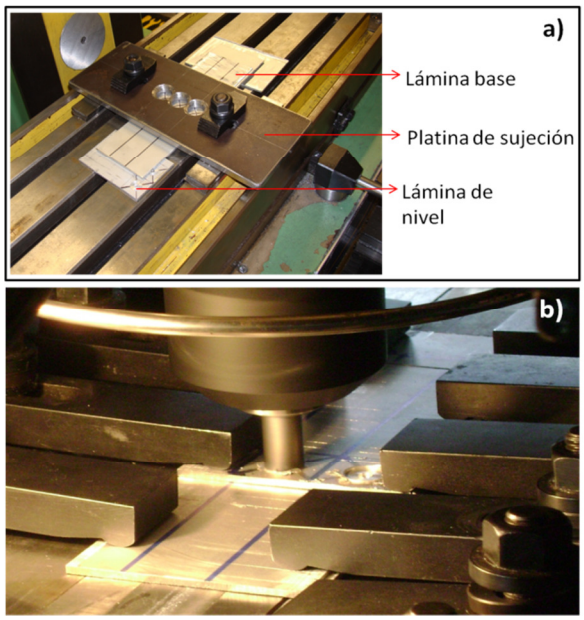


Figura 3. Montaje de la SFAP en, a) Fresadora Universal y b) Máquina para SFA.

2.2 Caracterización de las juntas soldadas.

Las uniones soldadas fueron caracterizadas mediante los ensayos mecánicos de tensión/cortante, dureza y análisis metalográfico para determinar el tamaño de grano y los cambios microestructurales causados por el efecto de la soldadura.

Muestras de la sección transversal del punto de soldadura, se cortaron y se montaron en baquelita, se realizó un desbaste inicial de la superficie con papel lija de SiC hasta la granulometría 2200 y posteriormente se pulieron utilizando paños con alúmina de hasta 0,05 µm de tamaño de grano, para dar un acabado tipo espejo, y finalmente las muestras se atacaron con un reactivo, compuesto por 50 ml de reactivo Poulton, 25 ml de HNO_3 y 40 ml de una solución de 3 g de ácido crómico por 50 ml de H_2O, para revelar la microestructura, [13]. El análisis metalográfico se realizó en un microscopio óptico marca Olympus PMEU. La medición de tamaño de grano se realizó bajo la norma ASTM E112 usando el método de intercepción.

Se realizaron mapas de microdureza en un Microdurómetro Automatizado AMH43 Leco en la sección transversal de las juntas, sobre las diferentes zonas de la soldadura, aplicando una carga de 100 g y un tiempo de sostenimiento de 15 s.

El ensayo de tensión/cortante se realizó en una máquina Instron 3366 a una velocidad de 1 mm/min

©2013 Universidad Simón Bolívar

y con la carga aplicada en la dirección del sentido de flujo de los granos en la extrusión de la lámina de aluminio AA6063-T5. Las probetas empleadas en el ensayo de tensión/cortante, para las SFAP y las uniones remachadas, corresponden al esquema mostrado en la Figura 2; se utilizaron láminas suplementarias para sujetar correctamente las probetas con las mordazas, y garantizar la correcta disposición de estás durante el ensayo.

El análisis de las superficies de fractura se efectuó en el microscopio electrónico de barrido, MEB, JEOL JSM 6490LV, acoplado con una EDS para análisis de composición química de las partículas no metálicas en las uniones soldadas

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis metalográfico.

La Figura 4a corresponde a una macrografía de la sección transversal del punto de soldadura, en la que se aprecian las zonas características de la soldadura por fricción-agitación; el metal base MB, la zona afectada térmicamente ZAT, la zona afectada termo-mecánicamente ZATM y la zona agitada ZA. Adicionalmente se encontró una grieta ascendente que se inicia en la línea de mezcla, o interface, de las láminas superior e inferior, y algunos problemas de adhesión de las láminas ocasionados por defectos en el corte previo a la realización de la soldadura.

En la Figura 4b, se muestra en detalle la dirección del flujo del material en la zona A, indicada en la Figura 4a en la que se identifica un sentido ascendente del material arrastrado por los hilos de la rosca del *pin*, hasta la parte superior del punto, en esta zona por la acción del hombro de la herramienta, el material es dirigido nuevamente hacia el interior de la zona agitada; esta orientación coincide con la dirección de propagación de la línea de mezcla de las láminas. El color claro en la superficie y la zona adyacente al *pin* de la herramienta, se atribuye a la capa superficial anodizada del material base, que por efectos del proceso es fracturada y arrastrada hacia el interior de la ZA.

En la micrografía mostrada en la Figura 4c se puede apreciar la microestructura típica del metal base, caracterizada por granos grandes equiaxiales y homogéneos, con un tamaño de grano variable entre 70 y 110 µm, resultante del proceso de extrusión y posterior tratamiento térmico de envejecimiento artificial.

La microestructura mostrada en la Figura 4d, revela la zona de transición entre la ZATM y la ZA; en la ZATM se encontraron granos alargados y orientados en la dirección del flujo del material y en la ZA granos finos. La Figura 4e muestra en detalle la ZA de la Figura 4d, en la cual se observan granos finos, equiaxiales y homogéneos característicos de la microestructura en la ZA.

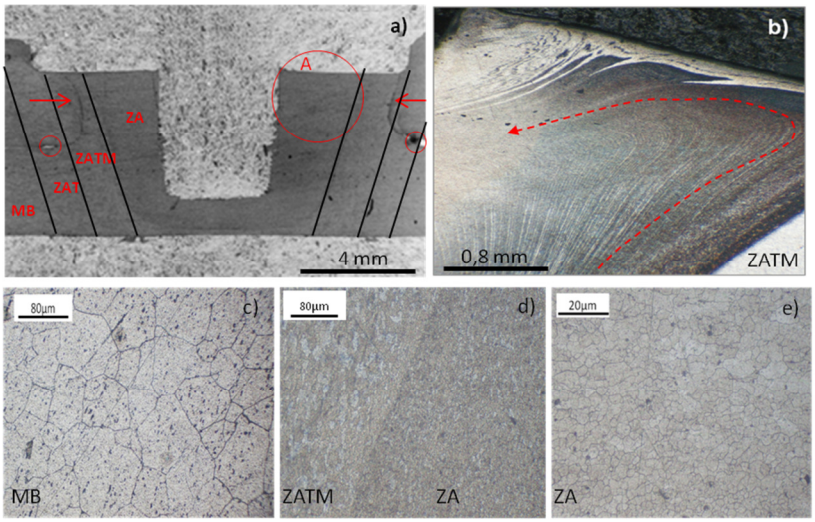


Figura 4. Macro y micrografías de la sección transversal del punto de soldadura, a) Macrografía, b) Detalle A de la Macrografía ligeramente inclinado, c) Metal base a 200x, d) Zona de transición entre la ZATM y la ZA a 200x, e) Zona agitada a 300x.

Es posible notar con claridad la tendencia al refinamiento del tamaño de grano, a medida que se avanza desde el metal base hasta la ZA, en la cual se encontró un tamaño de grano de 7,7 µm y/o ASTM 10,8 en las soldaduras realizadas en la fresadora universal y un tamaño de grano de 7,3 µm y/o ASTM 10,9 para las soldaduras realizadas en la máquina estándar, obteniendo una reducción media del 90 %. Sato *et al* [14] encontraron tamaños de grano similares en la ZA para la aleación de aluminio AA6063. Este comportamiento ha sido atribuido por diferentes autores [14-16] a la agitación y recristalización dinámica del material a causa de este tipo de soldadura. Las diferencias de los tamaños de grano entre las soldaduras realizadas en la fresadora y en la máquina para FSA son atribuidas al mejor control de parámetros que se tiene en la máquina estandarizada.

Por otra parte, diferentes autores [17-18] afirman que la secuencia de precipitación se ve alterada por efecto del calor de soldadura, de tal manera que en función de la distancia desde la ZA hacia el interior del material existirán variaciones en la secuencia de precipitación. Sato *et al.* [18] reportaron que para juntas realizadas mediante SFA en la aleación AA6063, en la ZA los precipitados son completamente disueltos en la matriz, ocasionando un efecto de sobre-envejecimiento que tiende a disminuir la micro-dureza del material en esta zona.

Las imágenes presentadas en el análisis metalográfico, corresponden a las soldaduras realizadas en la fresadora; no se encontraron diferencias significativas respecto de las soldaduras obtenidas en la máquina RM-1 de T.T. Inc,

3.2 Mapas de microdureza.

La Figura 5a muestra el mapa de dureza correspondiente a las soldaduras realizadas en la máquina para SFA. En este mapa se puede apreciar el incremento de la dureza en la ZA alcanzando valores entre 70 y 75 HV, y una caída drástica en la ZATM, con valores entre 50 y 60 HV.

Este comportamiento ha sido reportado por varios autores que han realizado perfiles de dureza a soldaduras por fricción-agitación en aleaciones de aluminio de la serie 6XXX [15, 19]. Los valores de dureza obtenidos en la zona agitada son comparables con los del metal base, el cual presenta una dureza promedio de 66 HV. De acuerdo a las mediciones de tamaño de grano realizadas en la ZA, se esperaría que esta zona presentara valores de micro-dureza superiores al metal base; sin embargo, este fenómeno puede ser contrarrestado por la eliminación del tratamiento de envejecimiento artificial del material base producto del proceso de soldadura, de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

La Figura 5b corresponde al mapa de micro-durezas de las soldaduras realizadas en la fresadora universal; debido a la simetría de los puntos de soldadura se evaluó únicamente la sección inferior y lateral izquierda de la soldadura, como se indica en los recuadros de la Figura 5a. Para estas uniones se obtiene un valor máximo de micro-durezas en la ZA entre 60 y 65 HV, y al igual que en las soldaduras realizadas en la máquina estándar se aprecia una disminución drástica en la ZATM alcanzando valores mínimos entre 40 y 50 HV.

La superioridad de 10 HV aproximadamente, correspondiente a un 13 %, de las soldaduras realizadas en el equipo especializado frente a las soldaduras realizadas en la fresadora universal son acordes con los valores de tamaños de grano encontrados en los dos tratamientos, obteniendo mejores propiedades mecánicas para la soldadura con menor tamaño de grano, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Correlación entre los tamaños de grano y los valores de micro-dureza de las SFAP

Equipo empleado para SFAP	*Tamaño de grano en la ZA (µm)*	*Micro-dureza en la ZA (Hv)*	*Micro-dureza en la ZATM (Hv)*
Fresadora Universal	7,7	60-65	40-50
Máquina para SFA	7,3	70-75	50-60

3.3 Ensayo de tensión/cortante.

La Figura 6 muestra resultados semejantes de carga máxima a tensión/cortante obtenidos de las SFAP realizadas en fresadora y en la máquina para SFA, y claramente superiores con los resultados de los remaches. La ligera tendencia de resistencia mecánica superior de las soldaduras realizadas en la máquina estándar, correspondiente a un 7 %, puede atribuirse al mejor control de las variables de soldadura que permite el proceso estandarizado. Varios autores [4,20] han reportado que existe una fuerte influencia del tiempo de sostenimiento en el comportamiento a tensión/cortante de las SFAP.

©2013 Universidad Simón Bolívar

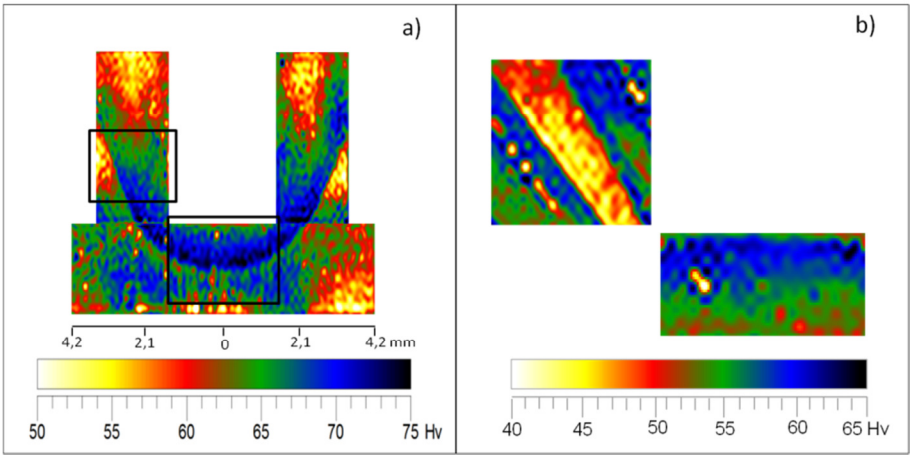


Figura 5. Mapas de micro-dureza de la sección transversal del punto de soldadura, a) soldaduras realizadas en la máquina para SFA, b) soldaduras realizadas en la fresadora universal.

La Figura 6 muestra con claridad la superioridad de resistencia mecánica del 100 % en las SFAP respecto de la técnica de remachado, empleada frecuentemente para realizar las uniones a traslapo en las aleaciones de aluminio. Estos resultados confirman la confiabilidad que esta técnica de soldadura da en aplicaciones estructurales de las uniones soldadas de aleaciones de aluminio, con bajo costo de operación y facilidad en el proceso, frente a las otras técnicas empleadas para realizar este tipo de unión.

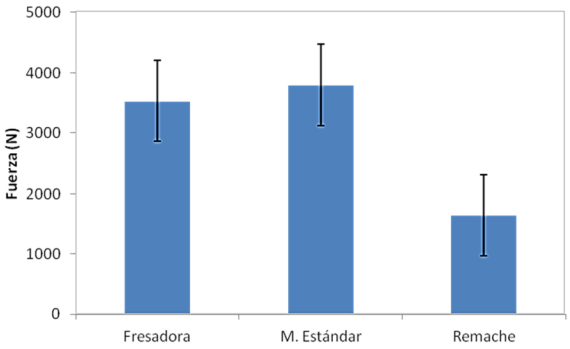


Figura 6. Carga máxima a tensión/cortante para los puntos de soldadura por SFAP y los remaches.

Fu y Mallick [21] estudiaron el comportamiento a tensión/cortante de uniones remachadas de la aleación de aluminio 6111, empleando remachado convencional bajo diferentes valores de presión; y encontraron valores de carga máxima entre 2161,7 y 2668,8 N. Por otra parte, Pereira *et al.* [22] estudiaron el comportamiento mecánico de soldadura de punto por resistencia eléctrica en la aleación de aluminio 6082-T6, y encontraron, que dependiendo de los valores de las variables del proceso la carga máxima a tensión/cortante varía entre 2500 y 3100 N. Da Silva *et al* [23] estudiaron el comportamiento mecánico de juntas de la aleación de aluminio 5754, realizadas mediante SFAP y soldadura de punto por resistencia eléctrica, encontrando que los valores de carga a tensión/cortante fueron de 4800 N para la SFAP y de 2800 N para las uniones por resistencia eléctrica. Estos resultados indican que existe una tendencia a la superioridad de la resistencia mecánica de las SFAP en las aleaciones de aluminio, frente a las técnicas de unión convencionales de remachado y soldadura de punto por resistencia eléctrica.

El tipo de falla a tensión/cortante fue el mismo para ambos tipos de soldaduras SFAP, caracterizado por un comportamiento de fractura interfacial, con desprendimiento total de una porción del botón de soldadura por la ZATM [20, 24]. En la Figura 7a se aprecia la fractura en la lámina superior, en la cual queda adherido parte del botón de soldadura, permitiendo identificar esta zona como la ZATM. La Figura 7b corresponde a la vista posterior de la lámina superior. En la Figura 7c se muestra la fractura en la lámina inferior, en la que se aprecia el desprendimiento de una porción del botón de soldadura. La flecha en la Figura 7 indica la dirección de aplicación de la carga.

La falla en el ensayo de tensión/cortante de las SFAP, se atribuye a la propagación de la línea de mezcla de las láminas superior e inferior; de acuerdo a la macrografía mostrada en la Figura 4, el

diámetro correspondiente al área de la fractura, además de estar ubicado en la ZATM, coincide con la línea de mezcla de las dos láminas. En este sentido, y de acuerdo a lo observado en el ensayo de tensión/cortante, la grieta se propaga inicialmente de forma transversal hasta alcanzar la superficie del punto de soldadura y posteriormente se propaga de forma circunferencial hasta lograr la ruptura total de la probeta. Los bajos valores de micro-dureza en la ZATM, podrían facilitar la propagación de la grieta hasta la superficie del punto de soldadura.

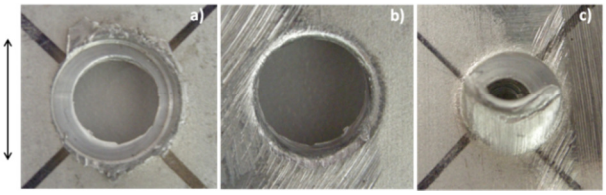


Figura 7. Fractura a tensión/cortante de la SFAP, a) vista superior de la lámina superior, b) vista posterior de la lámina superior, c) vista superior de la lámina inferior.

La imagen de microscopia electrónica de barrido, MEB, de la Figura 8a muestra la superficie de fractura correspondiente a la lámina superior de la junta, en la que se aprecia una considerable deformación, característica del tipo de falla que presentan los materiales dúctiles tales como la AA6063-T5.

La Figura 8b muestra un detalle de la región A, indicada en la Figura 8a. En esta imagen se evidencia el desgarramiento del material producto de la sobrecarga del ensayo de tensión/cortante, y adicionalmente se identificaron partículas no-metálicas dispersas, correspondientes a la película de óxido de aluminio del anodizado, que se encontraba presente en la superficie de las láminas previo al proceso de soldadura, y que fue fracturado, introducido y mezclado con el metal base en el área de adhesión de las láminas, tal como se confirmó con el análisis EDS realizado sobre estas partículas, mostrado en la Figura 8c.

La fractura en las uniones remachadas se presentó por cortante en la sección transversal del remache. La Figura 9a corresponde a la superficie de fractura del remache, la cual es característica de una fractura tipo dúctil, mostrando deformación plástica y fibrosidad en la superficie, la Figura 9b y 9c corresponden a la vista superior de la lámina superior y posterior de la lámina inferior. La flecha en la Figura 9 indica la dirección de aplicación de la carga. Sun *et al.* [25] atribuyen este tipo de falla a la variación en la distribución de esfuerzos en la región circundante del remache.

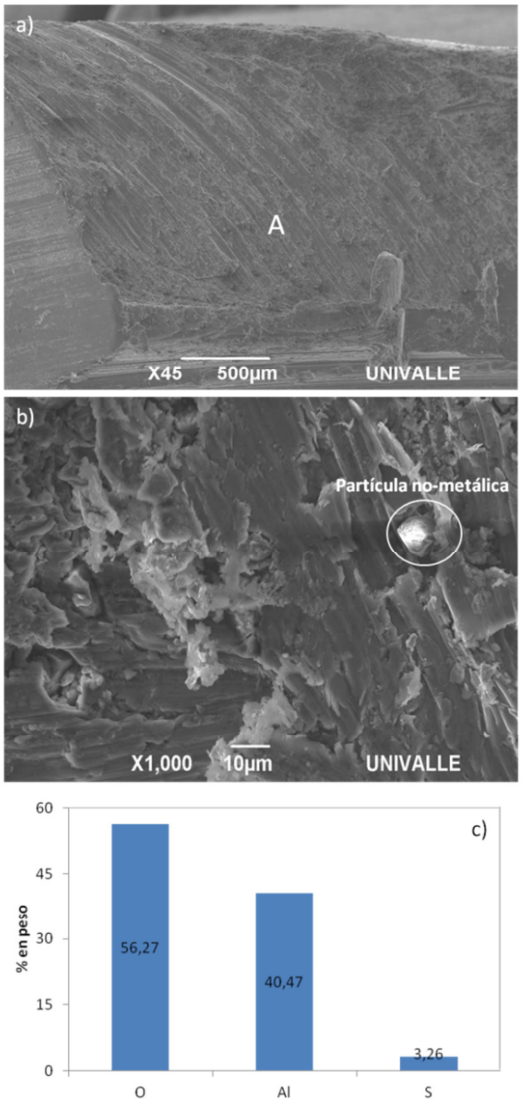


Figura 8. Imágenes MEB de la superficie de fractura a tensión/cortante de las SFAP, a) Superficie de fractura, b) Detalle de la superficie de fractura, c) Composición química de la partícula no metálica mostrada en la figura b.

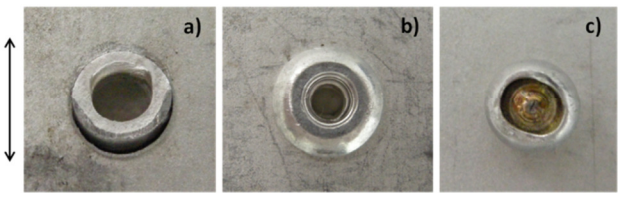


Figura 9. Fractura a tensión/cortante del remache a) Superficie de fractura, b) Vista superior de la lámina superior, c) Vista posterior de la lámina inferior.

4. CONCLUSIONES

La SFAP produce un refinamiento del grano en la ZA, debido a la recristalización dinámica sufrida en el proceso, que permite que las propiedades mecánicas de esta zona sean comparables con las del metal base.

La resistencia a tensión/cortante de las uniones por SFAP fue superior en un 100 % frente a las uniones remachadas.

La falla a tensión/cortante de las SFAP se atribuyó a la propagación interfacial de la fractura por la línea de mezcla en la ZATM, favorecida por una caída drástica de los valores de microdureza en la ZATM.

Las pequeñas variaciones de propiedades mecánicas observadas entre las uniones SFAP realizadas con las dos máquinas indican que las uniones obtenidas en la máquina fresadora ofrecen una buena confiabilidad.

5. AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de Microscopia Electrónica del Laboratorio Nacional de Nanotecnologia (LNNano) – CNPEM/ABTLUS, Campinas, Brasil por la realización de las SFAP en la máquina estándar y los mapas de dureza.

6. REFERENCIAS

[1]. Thornton P, Krause A, Davies R. Weld J. 1996; 75: 101-108.

[2]. Uematsu Y, Tokaji K, Tozaki Y, Kurita T, Murata S. Inter. J. Fatig. 2008; 30: 1956-1966

[3]. Uematsu Y, Tokaji K, Tozaky Y, Nakashima Y. Proc. Engin. 2010; 2: 193-201.

[4]. Tozaki Y, Uematsu Y, Tokaji K. J. Mater. Process. Technol. 2010; 210: 844-851.

[5]. Sakano R, Murakami K, Yamashita K, Hyoe T, Fujimoto M, Inuzuka M. Sakano R, Murakami K, Yamashita K, Hyoe T, Fujimoto M, Inuzuka, "Development of spot FSW robot system for automobile body members". En: Proceedings del 3rd International Symposium of Friction Stir Welding 2001. Kobe (Japon), 2001.

[6]. Fujimoto M, Inuzuka M, Koga S, Seta Y. "IIW Doc III". En: Proceedings del IIW Preassembly Meeting at Nagoya 2004. (Japon), 2004.

[7]. Zhang Z, Yang X, Zhang J, Zhou G, Xu X, Zou B. Mater. Des. 2011; 32: 4461-4470.

[8]. Ávila J. Comportamiento a la fatiga de las uniones soldadas por fricción-agitación de la aleación de magnesio AZ31B, Tesis Maestría. Cali (Colombia): Universidad del Valle, 2011.

[9]. Franco F, Sánchez H, Betancourt D, Murillo O. Rev. Latino. Metal. Mater. 2009; S1 (3): 1369-1375.

[10]. Amú M, Franco F. Rev. Latin. Metal. Mater. 2009; S1 (2): 767-772.

[11]. Merzoug M, Mazari M, Berrahal M, Imad A. Mater. Des. 2010; 31: 3023-3028

[12]. Shen J, Min D, Wang D. Mater. Des. 2011; 32: 5033-5037.

[13]. Handbook of Aluminum, Physical Metallurgy and Processes, Vol. 7: George E, Tot ten G. Totten & Associates , Scott D. MacKenzie, Inc, Editado por Marcel Dekker, Inc, 2003.

[14]. Sato Y, Urata M, Kokawa H. Metall. Mater. Trans. A. 33; 2002: 625-631.

[15]. Wang D, Lee S. Mater. Process. Technol. 186; 2007: 291-297.

[16]. Liu H, Fujii H, Maeda M, Nogi K. *J.* Mater. Process. Technol. 142; 2003: 692-696.

[17]. Mishra R.S, Ma Z.Y. Mater. Scien. Engin. R 50; 2005: 1–78.

[18]. Sato Y.S, Kokawa H, Enmoto M, Jogan S. Metall. Mater. Trans. A 30; 1999: 2429-2435.

[19]. Thoppul S, Gibson R. Mater. Charact. 60; 2009: 1342-1351.

[20]. Lathabai S, Painter M, Cantin G, Tyagi V. Scrip. Material. 55; 2006: 899-902.

[21]. Fu M, Mallick P. Inter. J. Fatig. 25; 2003: 183-189.

[22]. Pereira A. M, Ferreira J. M. Loureiro A, Costa, J. D. M, Bártolo P. J. Mater. Des. 31; 2010: 2454-2463.

[23]. Da silva A. A, Maldonado E, Echeverria A, "Effect of joining parameters on static strength and failure mechanisms of friction stir spot welded automotive aluminium alloys". En: Proceedings Del 8th International Symposium on Friction Stir Welding, Timmendorfer Strand 2010. (Alemania), 2010.

[24]. Mitlin D, Radmilovic V, Pan T, Chen J, Feng Z, Santella M. Mater. Scien. Engin. A. 441; 2006: 79 – 96.

[25]. Sun X, Stephens E, Khaleel M. Inter. J. Fatig. 29; 2007: 370-386.

©2013 Universidad Simón Bolívar