

Propiedades mecánicas de soldadura por fricción agitación de punto en aleación de aluminio AA6063-T5

Mechanical properties of friction stir spot welding in aluminum alloy AA6063-T5

R. Falla¹, K. J. Quintana¹, F. Franco² y N. A. de Sánchez^{1,3}

¹Grupo Ciencia e Ingeniería de Materiales, Programa Ingeniería Mecánica, Departamento Energética y Mecánica, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

² Grupo de Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez, Cali, Colombia.

³Centro de Excelencia en Nuevos Materiales-CENM, Cali, Colombia
Email: rolandofalla@yahoo.com

Recibido 28/11/11, Aceptado 21/06/2012

RESUMEN

En este trabajo se realizaron soldaduras de punto utilizando la técnica de fricción-agitación, SFAP, sobre láminas traslapadas de aleación de aluminio 6063-T5, de 2,8 mm de espesor y un área de traslape de 25,4 mm². El proceso de soldadura SFAP se realizó en una fresadora universal en variadas condiciones de velocidad de rotación y tiempo de sostenimiento; se mantuvieron constantes tanto la velocidad y la profundidad de la penetración; para determinar las propiedades mecánicas óptimas de dureza y resistencia mecánica; se caracterizaron los puntos de soldadura mediante ensayos de tensión, barridos de microdureza y análisis metalográfico. Los resultados permitieron concluir que mediante este proceso de soldadura se pueden obtener soldaduras de puntos con buena apariencia, sanidad en el área transversal de la unión, resistencia mecánica y además una adecuada homogeneidad, lo que las hace una alternativa ventajosa frente a los procesos de soldadura convencionales aplicados sobre aluminio.

Palabras clave: Soldadura por fricción - agitación de punto, resistencia a tensión, microdureza, aleación de aluminio.

ABSTRACT

In this work spot welds were made using the friction stir spot welding technique, FSSW, in overlapping aluminum alloy 6063-T5 sheets, with 2.8 mm thick and an overlap area of 25.4 mm². The FSSW process was performed on a universal milling machine under variable conditions of rotational speed and dwell time, the penetration rate and length were maintained constant, to determine the optimal mechanical properties of hardness and mechanical strength, welds were characterized by tension testing, microhardness scans, and metallographic analysis. The results let us to conclude that spot welds with good appearance in the cross-sectional area, very good mechanical resistance and excellent homogeneity, can be obtained by this welding process, which does it a favorable alternative compare with conventional welding processes applied on aluminum alloys.

Keys words: Friction stir spot welding, mechanical strength, microhardness, aluminum alloys.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la industria está exigiendo la selección de materiales de bajo peso específico, con miras a lograr mayores eficiencias y mejores comportamientos en las diferentes aplicaciones que así lo requieran, como el caso de la industria automotriz, aeronáutica y estructural, entre otras; este acelerado proceso se ha visto reflejado en el incremento del uso de aleaciones de aluminio y magnesio, y como consecuencia se genera la necesidad de unir por medio de procesos de manufactura, los componentes producidos con estas aleaciones.

En este contexto la soldadura de puntos por resistencia, SPR, es catalogada como la técnica más usada para la unión de partes hechas de láminas de acero, ya que ofrece grandes ventajas como la relativa baja inversión inicial, facilidad de mantenimiento, entre otras. Sin embargo, la SPR en láminas de aluminio presenta varios inconvenientes como la disminución de la vida del electrodo en comparación con la soldadura en acero, además esta soldadura produce más defectos en la calidad y confiabilidad [1].

Adicionalmente en las aleaciones de aluminio, se dificulta soldar por proceso de fusión, debido a los requerimientos de gas protector, a la remoción de las capas de óxido de la superficie y la generación de poros y de agrietamiento en la solidificación durante el enfriamiento desde la fase líquida. Ante esta situación surge como alternativa la soldadura por fricción agitación de puntos, SFAP, que ofrece grandes ventajas competitivas frente a los procesos de soldadura por fusión, dado que es un proceso de soldadura en estado sólido, que no requiere material de aporte o gas protector, la energía utilizada es menor y consecuentemente la zona térmicamente afectada ZTA y los esfuerzos residuales asociados con la soldadura son relativamente pequeños, con microestructura fina en la zona de la unión y la ausencia de fisuras y porosidad.

Esta técnica utilizada para realizar puntos de soldadura en las aleaciones de aluminio estructural; permite hacer juntas con buenas propiedades mecánicas, en condiciones de carga estática y dinámica, sin defectos de calidad y una reducción de costo por el bajo consumo de energía, operación y mantenimiento [2]. Basado en el análisis del comportamiento mecánico y evaluación de los costos, la SFAP se considera un proceso de soldadura muy viable para la industria automotriz.

Este trabajo estudia el comportamiento mecánico de soldadura por fricción-agitación de punto de la aleación de aluminio 6063-T5, bajo diferentes parámetros del proceso, mediante análisis de macrografías y ensayos de microdureza y tensión, para encontrar las condiciones óptimas de velocidad de rotación y tiempo de sostenimiento que

favorezcan el desempeño mecánico de las uniones soldadas [3-4].

2. METODOLOGÍA

Las pruebas de soldadura y los análisis se realizaron en láminas extruidas de aleación de aluminio magnesio – silicio 6063 – T5 de 7.2 mm de ancho por 125 mm de longitud y de 2.8 mm de espesor, obtenidas de perfiles extruidos, se unieron a traslape con tres puntos de soldadura separados a 25.4mm, como se presenta en la figura 1a; luego estas se cortaron en tiras individuales para tener una probeta por cada punto.

Los puntos de soldadura se ejecutaron con velocidades de rotación de 1600 y 1120 rpm en sentido antihorario, tiempo de sostenimiento de 2, 5 y 10 segundos, velocidad de penetración constante de 6.25 mm/min, con una profundidad de penetración constante del 75 % del espesor combinado de las láminas traslapadas [5].

El proceso SFAP se implementó en la fresadora universal N° 5 X6125A, modelo Y112M – 4/B5, disponible en el laboratorio de manufactura de la Universidad Autónoma de Occidente, con potencia de 5 HP, velocidades del husillo de 35 a 1600 rpm, velocidades de avance de 0.5 hasta 30 mm/min, avances automáticos en los ejes X, Y, Z. Sobre la bancada de la fresadora se le adaptó un dispositivo de sujeción con una lámina de respaldo, para asegurar las láminas traslapadas durante la ejecución de los tres puntos de soldadura, adicionalmente se utilizó un comparador de carátula para controlar la profundidad de penetración de la herramienta, y un nivel para verificar la perpendicularidad del plano de la mesa y la herramienta, como se muestra en la figura 1b.

El material de la herramienta utilizada es acero AISI/SAE H13, con tratamiento térmico de bonificado (temple y revenido) con dureza de 48 HRC, la herramienta tiene pin cilíndrico roscado de 4mm de diámetro, con un hombro recto de 12 mm de diámetro [6].

Se realizó un corte transversal en el punto de soldadura a cada probeta, y se prepararon metalográficamente, para verificar la calidad o sanidad del punto de soldadura mediante análisis macrográfico, y determinar los perfiles de microdureza mediante un ensayo de microdureza Vickers, con carga de 100 g y tiempo de 15 s en la sección transversal de los puntos de soldadura. Las probetas también fueron sometidas a ensayo de tensión bajo carga estática con velocidad de mordaza de 1mm/min.

Las dimensiones de las probetas se muestran en la figura 2, basadas en trabajos experimentales previos de soldadura por punto SFAP, para aleaciones de aluminio, realizadas por otros investigadores [7,8].

Figura 1. (a) Lámina a traslape unida con tres puntos de SFAP, (b) Esquema del dispositivo de montaje y ejecución del proceso SFAP

Figure 1. (a) Sheet to overlap together with three points FSSW, (b) Schematic of device assembly and process execution FSSW

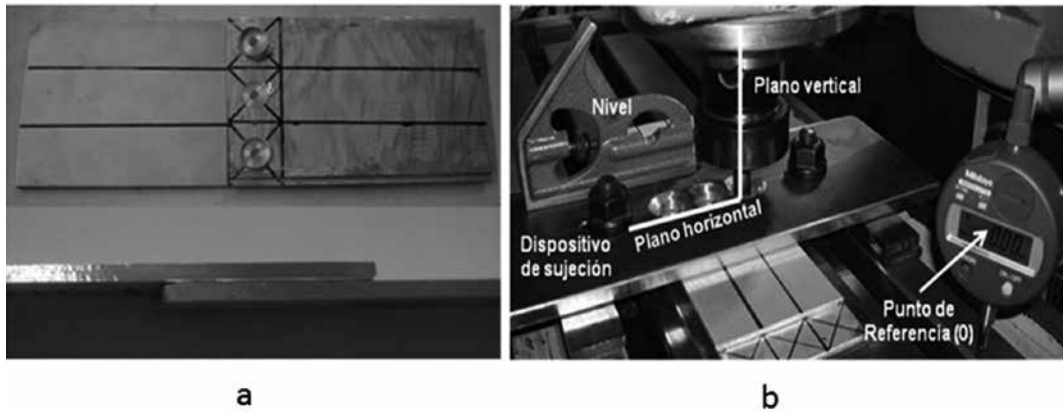
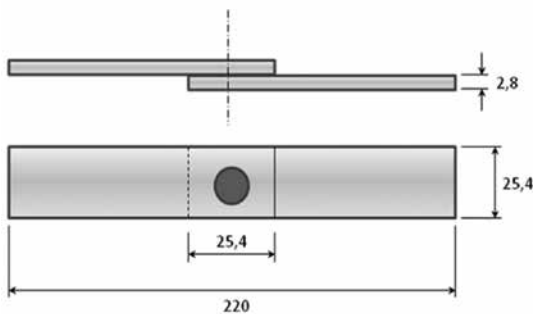


Figura 2. Geometría de las probetas soldadas en mm

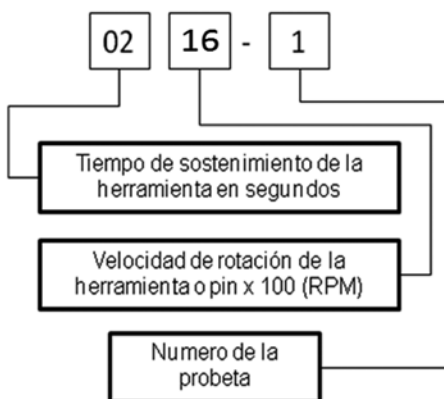
Figure 2. Geometry of the welded specimens in mm



Las probetas se identificaron de acuerdo a los parámetros variables que se utilizaron en el proceso de soldadura, los dos primeros dígitos corresponden al tiempo de sostenimiento en segundos, los dos siguientes dígitos indican la velocidad de rotación en rpm y el último dígito la repetición de la probeta; en la figura 3 se describe la identificación de las probetas.

Figura 3. Identificación de las probetas de la aleación AA6063-T5.

Figure 3. Identification of specimens of the alloy AA6063-T5.



3. RESULTADOS

Con el objetivo de analizar la influencia de la velocidad de rotación de la herramienta y el tiempo de sostenimiento sobre la calidad y las propiedades mecánicas de las uniones de punto, se seleccionaron las probetas para realizar cada uno de los ensayos propuestos en este proyecto.

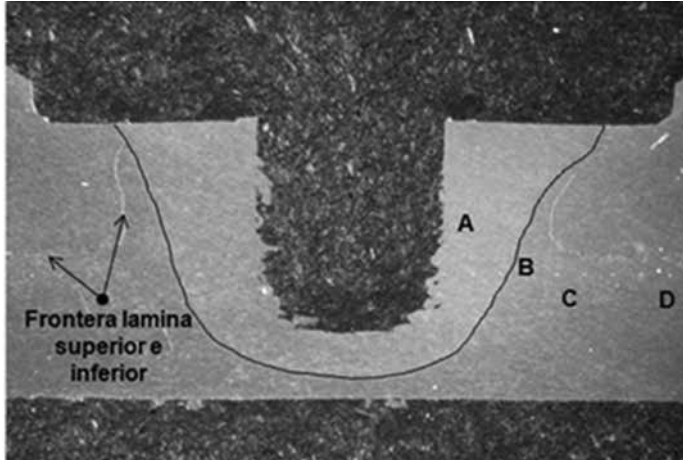
3.1 Análisis macrográfico de las probetas

En la figura 4, se observa la macrografía de la sección transversal de la región soldada de la probeta 0511-7, que muestra una zona de agitación, ó *stir zone*, SZ, marcada como A; se revela la frontera de la zona de transición o zona termo-mecánicamente afectada ó *thermal-mechanical affected zone*, TMAZ, denominada B, la cual es afectada por el cambio térmico y una deformación plástica con menos intensidad que en la zona de agitación [9]. Después de la zona TMAZ se encuentra la zona térmicamente afectada o *heat affected zone*, HAZ, marcada como C, esta zona experimenta un cambio térmico; hacia la parte exterior se encuentra finalmente el material base marcado como D.

En la figura 4, se identifica una línea de frontera que corresponde al traslape de las láminas superior e inferior que fueron soldadas, esta línea cuando se acerca a la TMAZ cambia su dirección, como consecuencia de la deformación plástica del material y el movimiento del flujo del material en la zona de mezcla de forma ascendente; este comportamiento es típico en una unión soldada por punto a través de fricción – agitación en aleaciones de aluminio magnesio-silicio, estas características físicas son propias de una buena soldadura, libre de defectos y con una zona del *nugget* bien definida [10].

Figura 4. Macrografía de sección transversal del punto de soldadura probeta 0511-7

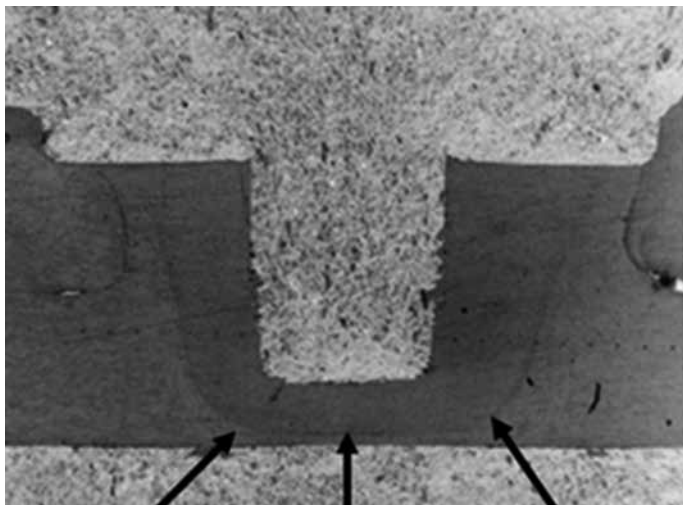
Figure 4. Macrography cross section of the welding point probe 0511-7.



La zona de agitación SZ en la sección macro de la probeta 0516-7 se observa en forma trapezoidal en la figura 5, con aristas más planas en la base del agujero del pin, con respecto a la forma de la SZ de la probeta 0511-7 que presenta forma redondeada; esta diferencia es típica cuando se incrementa la velocidad de la herramienta, porque genera un mayor aporte de calor debido a la fricción y un movimiento mayor de agitación al material deformado plásticamente; aumentando el área del nugget o SZ hacia la superficie exterior de la lámina inferior por debajo de la base del agujero del pin, como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Sección transversal probeta 0516-7

Figure 5. Specimen cross section 0516-7



3.2 Microdureza

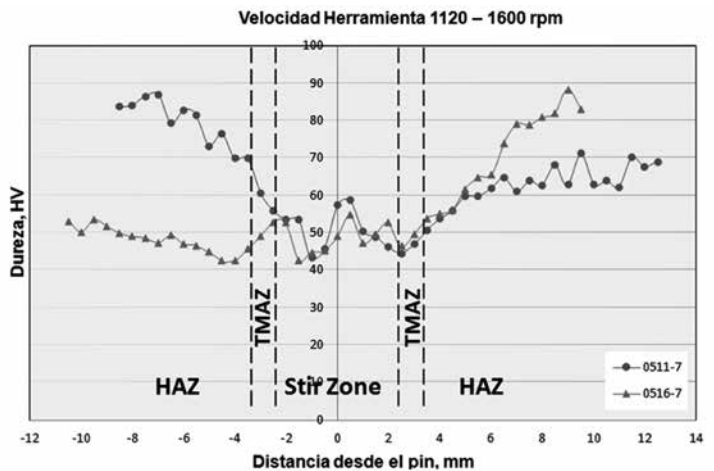
En la figura 6, se observa la variación de la dureza que experimentan las uniones soldadas de las probetas 0511-

7, 0516-7 con velocidad de rotación de 1120 y 1620 rpm, respectivamente. Partiendo desde el metal base, la dureza se reduce a medida que pasa la HAZ, disminuyendo drásticamente cuando pasa la TMAZ, hasta la zona de agitación en la cual presenta un ligero incremento cerca de la periferia del pin. En este punto la probeta 0511-7 registró 59 HV y la 0516-7 55 HV, indicando una ligera tendencia a la disminución de la microdureza por el incremento en la velocidad de rotación.

La reducción gradual de la dureza a lo largo de las diferentes zonas de la soldadura está relacionada con el efecto del mayor aporte de calor sobre el tratamiento térmico de envejecimiento artificial al que fue sometido el material. Cuando la temperatura aumenta, debido a la fricción, y sobrepasa la temperatura de la precipitación óptima, ocurre un sobre-envejecimiento causando una coalescencia de los precipitados finos en la estructura de la aleación reduciendo la dureza en esta zona [11].

Figura 6. Perfil de Microdureza probetas 0511-7, 0516-7.

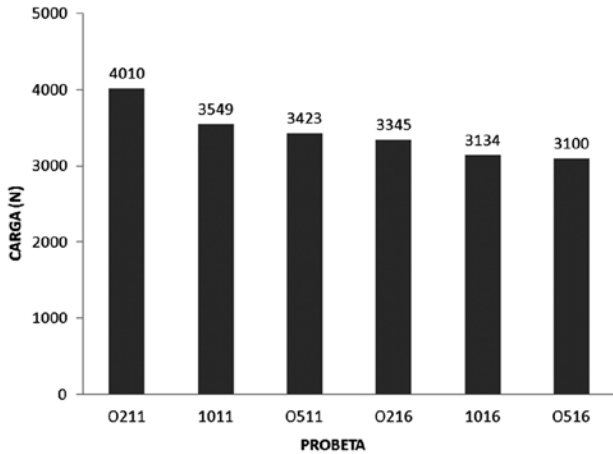
Figure 6. Microhardness profile specimens 0511-7, 0516-7.



3.3 Ensayo de tensión

En la grafica de la figura 7 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de tensión para las probetas soldadas, la máxima resistencia a la tracción se presentó en la probeta 0211-1 con un valor de carga de 4151 N, la menor resistencia se presentó en la probeta 0516-3 con un valor de carga de 2388 N; es de notar que los valores de resistencia mecánica obtenidos para las diferentes combinaciones de parámetros, disminuyen cuando se aumentan la velocidad de rotación de la herramienta y el tiempo de sostenimiento. Estos resultados, posiblemente se relacionan, con la disminución de la resistencia mecánica en las aleaciones de aluminio tratadas térmicamente por precipitación, por causa del incremento de la temperatura en el proceso cuando se aumenta tanto la velocidad, como el tiempo de sostenimiento [12].

Figura 7. Resultados ensayo de tracción de las probetas.
Figure 7. Results of tensile test specimens.

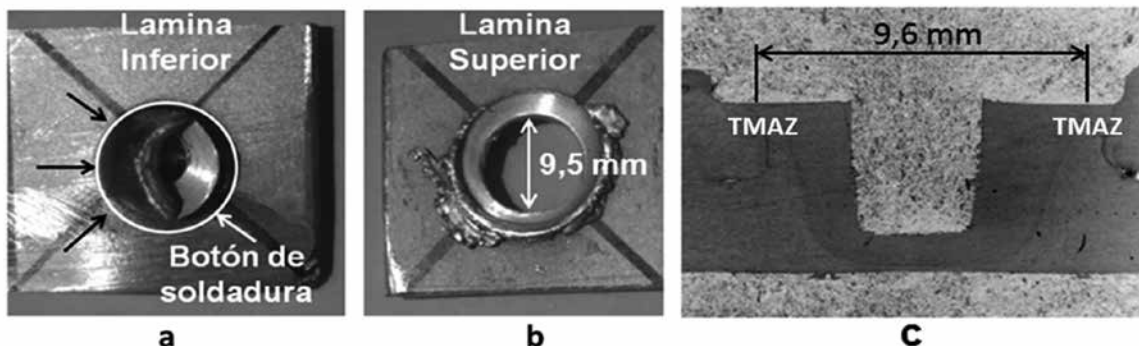


3.4 Modos de falla por tensión

Las probetas soldadas con una velocidad de herramienta de 1600 rpm, presentaron un modo de falla de forma circunferencial *nugget pull-out* o falla por desprendimiento de la zona agitada, En la figura 8a, se muestra la lámina inferior de la probeta, donde una pequeña parte de material es deformado cerca del lado izquierdo del botón de soldadura, posiblemente debido a la fractura y el rozamiento con la lámina superior, en el momento de la falla en el ensayo de tracción. En la figura 8b, se observa la falla circunferencial en la lámina superior, en la cual se evidencia un desprendimiento total del botón de soldadura. Además de que el diámetro de la falla circunferencial, coincide con el diámetro de la zona termo-mecánicamente afectada TMAZ, en el análisis macrográfico del área seccional del punto de soldadura de la probeta; como se observa en la figura 8c; en este caso la falla se presenta en la zona termo-mecánica afectada.

Figura 8. Modo de falla *nugget pull-out* probeta 0516-1, a) lámina inferior, b) lámina superior, c) macrografía probeta 0516-1

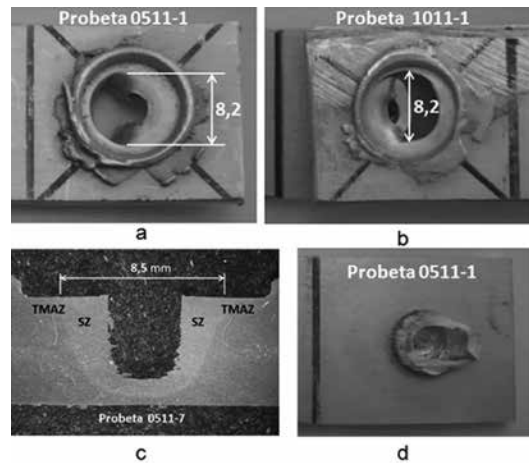
Figure 8. Failure mode *nugget pull-out* specimen 0516-1, a) lower sheet, b) upper sheet c) macrography specimen 0516-1



Las probetas que se realizaron con una velocidad de rotación de 1120 rpm, presentaron un modo de falla tipo *pull-out*, con un desprendimiento de media circunferencia en la lámina superior, como se muestra en las figuras 9a y 9b; comparando el diámetro de falla presentado en las uniones soldadas, con un valor de 8,2 mm, con la macrografía correspondiente, mostrada en la figura 9c, se observa que este se encuentra también por la zona termo-mecánica afectada [13].

Debido a que en estas probetas la grieta se propaga únicamente en la mitad del botón de soldadura, formando una semicircunferencia, en el momento de la falla la porción de la lámina inferior que aún se encuentra adherida, ofrece resistencia a la carga aplicada, lo que se evidencia en la deformación del punto de soldadura en la fractura final, como se muestra en la figura 9d.

Figura 9. Modo de falla tipo *pull-out*, a) lámina superior probeta 0511-1, b) lámina superior probeta 1011-1, c) macrografía probeta 0511-7, d) lámina inferior probeta 0511-1
Figure 9. Failure mode *pull-out*, a) upper sheet specimen 0511-1, b) top sheet specimen 1011-1, c) specimen macrography 0511-7, d) lower sheet specimen 0511-1



4. CONCLUSIONES

- Las juntas soldadas con la combinación de velocidad de rotación de 1120 rpm y el tiempo de sostenimiento entre 2 y 5 segundos presentaron las mejores propiedades mecánicas, en los ensayos de microdureza y tensión.
- La falla en el ensayo de tensión se presentó por la zona termo-mecánicamente afectada, TMAZ, atribuida a la propagación de la grieta proveniente de la interface entre las láminas superior e inferior, con un tipo de fractura circunferencial, descartando la participación del concentrador de esfuerzos del agujero que deja el pin en la salida de la herramienta, durante el proceso de soldadura.
- Con el análisis de las macrográficas se constató la calidad de las soldaduras, la cual se caracterizó por estar libre de poros y agrietamientos.
- El perfil de microdureza mostró una disminución de la dureza desde la zona termo-mecánicamente afectada hacia la zona de agitación, haciéndose más crítica en esta última, debido al cambio de los precipitados en aleaciones tratadas térmicamente.

REFERENCIAS

- [1] ESMERIO, J. A, ROSENDO, T. de Souza, PETRY, Cintia C, RAMOS, F. D, DURLO, M. A, STROHAECKER, T. R, DOS SANTOS, J. F. Preliminary Study on the Mechanical Behavior of Friction Spot Welds. En: Soldagem Insp. Sao Paulo. July 2009, vol. 14, no. 3, p. 238-247.
- [2] FUJIMOTO, M, HYOE, T, INUZUKA, M, KASHIKI, H, NAGAO, U, SAKANO, R, YAMASHITA, K. Development of spot FSW robot system for automobile body members. En: Proceedings of the Third International Symposium of Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 2001.
- [3] P. THORNTON, A. KRAUSE, R. DAVIES. Aluminum spot weld. En: Weld. J. Vol. 75, 1996, p. 101-108.
- [4] DAVIES, R, KRAUSE, A and THORNTON, P. Aluminum spot weld. In: Welding Journal. 2009, vol. 75, p. 101-108.
- [5] CHEN, G, LI, Y, LIN, Z, ZHANG, Y. Study on real-time measurement of nugget diameter for resistance spot welding using a neuro-fuzzy algorithm. En: Proceedings of the Instrumentation and Measurement Technology Conference. Italy. May 18–20, 2004, p. 2230-2233.
- [6] MISHRA, RAJIV S, and MAHONEY, MURRAY W. Friction stir welding and processing. United States: ASM international, 2007, 300 p.
- [7] TOKAJI, K., and UEMATSU, Y. Comparison of fatigue behavior between resistance spot and friction stir spot welded aluminum alloy sheets. En: Science and Technology of Welding and Joining, 2009, vol. 14, no. 1, p. 62-68.
- [8] LANG, B, LI, J.B, SUN, D.Q, SUN, D.X. Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joints. En: Materials Science and Engineering. November 14, 2006, p. 494-498.
- [9] LEE, S.C., and WANG, D.A. Microstructures and failure mechanisms of friction stir spot welds of aluminum 6061-T6 sheets. En: Journal of Materials Processing Technology. June 5, 2006, vol. 186, p. 291-297.
- [10] MISHRA, RAJIV S., and MA, Z.Y. Friction stir welding and processing. En: Materials Science and Engineering. August 18 2005, vol. 50, p. 1-78.
- [11] Estructura organizacional de la Universidad Politécnica de Valencia [en línea]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2011 [consultado 10 de Julio de 2011]. Disponible en Internet: <http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/Imagenes/Fig13-25.jpg>
- [12] GERLICH, A., NORTH, T.H., SHINOZAKI, K., YAMAMOTO, M. Textures in Single-Crystal Aluminum Friction Stir Spot Welds. En: Welding Journal. April, 2009, vol. 40A, p. 920-931.
- [13] CANTIN, G., LATHABAI, S., PAINTER, M., TYAGI, V. Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy. En: Scripta Materiala, 2006, vol. 55, p. 899-902.