

Evaluación de la resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio 6261-T5 por el proceso de soldadura por fricción-agitación

Evaluation of tensile strength on welds of 6261-T5 aluminum alloy via friction-stir welding process

Recibido: 14-08-2011 Aceptado: 07-11-2011

LUCAS URBANO BEDOYA¹,
JULIÁN ARNALDO ÁVILA²,

Resumen

Se reportan los resultados de la evaluación de la resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio 6261-T5. El procedimiento de soldadura seleccionado fue el de fricción-agitación. Para las uniones soldadas se utilizó una máquina fresadora convencional DECKEL, con capacidad de 3 HP. Las uniones soldadas se realizaron variando la geometría del pin, la velocidad de rotación y la velocidad de avance de la herramienta, con el fin de analizar el efecto de estos parámetros sobre la resistencia de las juntas.

Palabras clave: Aleación de aluminio, soldadura por fricción-agitación, resistencia a la tensión, velocidad de rotación, velocidad de soldadura

Abstract

This paper reports the results of the evaluation of tensile strength on welds of 6261-T5 aluminum alloy. The friction-stir welding (FSW) procedure was selected. The welded joints were carried out by using a conventional DECKEL milling machine, with 3-HP capacity. Welding of the joints was carried out by varying the pin geometry, rotation velocity, and tool advancement velocity to analyze the effect of these parameters on joint tensile strength.

Keywords: Aluminum alloy, friction stir welding, tensile strength, rotational velocity, linear velocity.

Introducción

El aluminio es una de las materias primas utilizadas en la industria por sus propiedades físicas, mecánicas y metalúrgicas que lo convierten en un material atractivo (Cabibbo *et al.* 2007). Específicamente, la aleación de aluminio de alta resistencia AA 6261-T5, es utilizada intensivamente en la fabricación de paneles armados con perfiles extruidos mediante el proceso de soldadura GMAW para ser usados en la industria de la construcción (Amu y Franco, 2009).

La soldabilidad es uno de los principales problemas de las aleaciones de aluminio, y por eso es de vital importancia encontrar métodos de soldadura sustitutos a los ya conocidos métodos de arco eléctrico, pues estos pueden llegar a ser costosos, perjudiciales para la salud y el medio ambiente, además pueden generar un gran número de defectos en la estructura del material si no se aplica correctamente.

¹: Colombiano. Ingeniero de Materiales, Escuela de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
lucurban85@yahoo.com

²: Colombiano. Msc en Ingeniería de Materiales, Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Cali, Colombia
julianarnaldoavila@hotmail.com

El proceso Fricción Stir Welding (FSW) o soldadura por fricción-agitación (SFA), en español, desarrollado por el Technological Welding Institute de Inglaterra (TWI) desde 1991 (Mishraa *et al.* 2005) es un nuevo concepto de soldadura en fase sólida, especialmente apto para la soldadura del aluminio y sus aleaciones, por su baja temperatura de fusión y gran capacidad para deformarse. Este proceso ofrece aspectos interesantes ya que en muchos casos puede reemplazar con ventaja, los procesos usuales de arco eléctrico.

SFA es un proceso que involucra la unión de metales sin fusión o materiales de relleno. En la Figura 1 se muestran las características básicas del proceso, en el cual una herramienta con un hombro y un pin al final, gira y se mueve hacia delante entre dos placas fijas a una placa de respaldo, el calor generado por la fricción entre el hombro, la pieza de trabajo y en menor proporción por el pin, ablanda las placas y el giro de la herramienta provoca deformaciones plásticas severas (Franco *et al.* 2009). El flujo de este material plastificado, trasladándose la herramienta a lo largo de la dirección de soldadura, transporta material del frente de la herramienta hacia atrás donde es forjado dentro de junta (Nandan *et al.* 2008). En la Figura 2 se muestra un esquema de las zonas microestructurales generadas en el proceso, donde se distinguen cuatro zonas: el nugget o zona agitada (ZA) que es donde se presenta la mayor cantidad de deformación plástica a altas temperaturas y se generan granos finos y equiaxiales producto de la recrystalización dinámica, en la zona termomecánicamente afectada (ZTMA) se conservan los granos del material base pero en estado deformado y la zona afectada por el calor (ZAC) también conserva los granos del metal base pero se encuentran afectados por el ciclo térmico ocurrido durante el proceso.

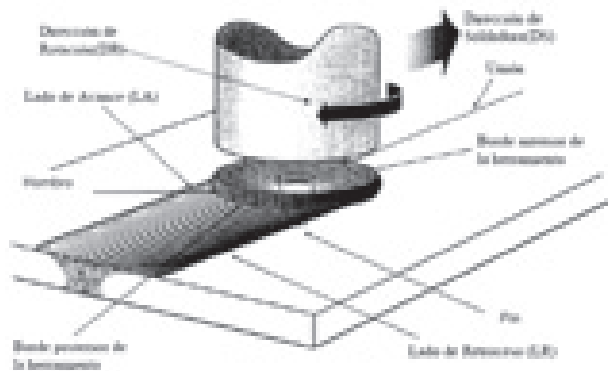


Figura 1. Representación esquemática del proceso SFA.



Figura 2. Zonas microestructurales generadas por el proceso.

El efecto de la velocidad de soldadura sobre la resistencia mecánica de las juntas SFA se debe principalmente a la cantidad de calor generado por unidad de longitud, dado que cuanto mayor sea la velocidad de soldadura menor será la cantidad de calor que se genere en los alrededores de la herramienta. S.R. Ren, 2007, reveló las macroestructuras de la sección transversal de la junta de Al6061-T651 y encontró que la inclinación de la ZAC con respecto a la superficie aumenta con el incremento en la velocidad de soldadura, de tal manera que se reduce el tamaño de la ZAC cuando es mayor la velocidad de soldadura. Generalmente las juntas soldadas a velocidades de soldadura por encima de 400mm/min exhiben altos valores de dureza, comparada con aquellas que se realizan a velocidades por debajo de 100mm/min. Por otro lado, la velocidad de rotación de la herramienta está estrechamente ligada con las temperaturas del proceso debido al calentamiento generado por la fricción entre el hombro de la herramienta y el material de trabajo, así que el incremento en la velocidad de rotación produce mayores temperaturas en el material de la junta durante la soldadura y facilita el flujo plástico bajo el hombro y en los alrededores del pin, mejorando la capacidad de forja que se lleva a cabo durante el proceso. Nandan, 2008, observó un incremento en las temperaturas pico del proceso a mayores velocidades de rotación de la herramienta sobre las uniones soldadas de la aleación de aluminio AA 6063 mediante SFA.

Elangovan, 2008, estudió diferentes perfiles del pin y observó que las mejores propiedades a tensión se obtienen cuando se utilizan pines con geometrías de cara plana. Esto se debe a una excentricidad asociada a este tipo de perfiles; esta excentricidad se debe a la órbita dinámica que hace parte del proceso SFA y es la relación entre el volumen dinámico y el volumen estático del pin durante la rotación de la herramienta. Además, estas geometrías producen una pulsación

durante el proceso de agitación en el flujo del material, debido a sus caras planas lo que no ocurre en el caso de los perfiles circulares.

Se presentan los resultados de tensión obtenidos al probar las juntas soldadas por el proceso SFA, sobre la aleación AA6261-T5, para analizar el efecto sobre las propiedades mecánicas de la geometría del pin y las velocidades de avance y rotación de la herramienta.

Materiales y Métodos

El procedimiento experimental se realizó teniendo en cuenta los parámetros de velocidad de rotación y velocidad de soldadura de la herramienta presentada en la Tabla 1, donde también se nombran los parámetros para cada junta. Las juntas se realizaron a una profundidad del pin de 2,7 mm, utilizando una herramienta de pin cuadrado y una de pin cilíndrico roscado con una inclinación de 1,5° con respecto al eje axial de la herramienta. En ambos casos el diseño de la herramienta incluyó un hombro liso y recto, sus dimensiones se presentan en la Figura 3. La herramienta se fabricó en acero rápido AISI H13 y se le realizó un tratamiento térmico de temple y revenido para proporcionarle una dureza de 50 HRC. La unidad experimental se obtuvo a partir de 2 láminas de aluminio AA 6261-T5 con dimensiones 127 X 102 X 3 mm en sentido transversal a la dirección de extrusión utilizando una máquina fresadora convencional DECKEL FP4M con capacidad de 3 HP. La composición química del material, se presenta en la Tabla 2 (Alúmina, 1999), en la Figura 5 se presenta un esquema de la junta. El montaje sobre la máquina fresadora para realizar las juntas se muestra en la Figura 4, el montaje conserva las características básicas del proceso SFA presentado en la Figura 1. No se realizaron mediciones de temperatura en las proximidades de la herramienta. Una vez obtenidas las juntas se seccionaron, como se muestra en la Figura 5, y se fabricaron muestras de tipo hueso, siguiendo el procedimiento de la Figura 6. Una vez obtenido el modelo en la herramienta CAD, Figura 6(a), se generaron los planos y la trayectoria de la herramienta, Figuras 6(b) y 6(c) respectivamente, para maquinar las preformas y obtener las piezas definitivas en una máquina CNC (emcoConcept MILL 155, Figura 6(d)), Figuras 6(e) y 6(f) respectivamente. Las preformas se obtuvieron al seccionar la unidad experimental, como se observa en la Figura 5, la composición química del metal base se presenta en la Tabla 2. A pesar de que no se normalizaron las muestras, se conservaron sus características necesarias para obtener la resistencia de la unión soldada, como se había reportado en otras investigaciones (Ren, 2007), (Amu, 2009), (Cabibbo, 2007).

Tabla 1. Parámetros de soldadura e identificación de las condiciones experimentales

ω (rpm) \ v (mm/min)	125	250	315
1000	A1	B1	C1
1250	A2	B2	C2
1600	A3	B3	C3

Tabla 2. Composición química de la aleación AA6261-T5 (%)

Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti	Otros
97,7	0,69	0,27	0,83	0,17	0,25	0,018	0,003	0,018	0,05

Tomado de Alúmina, 1999

Una vez obtenidas las muestras de tensión, Figura 5(f), se llevaron a la máquina universal INSTRON 3368, con una celda de carga de 50 kN, donde se sometieron al ensayo de tensión.

Para efectuar observaciones macroscópicas de los posibles defectos a las juntas:

- Se les realizó un corte transversal a la cara de la soldadura.
- Las muestras se encapsularon en resina fenólica
- Se sometieron a un pulido mecánico utilizando lijas de grano 180, 250, 360, 400, 600, 1000 y 1200 inicialmente
- Para el pulido final se utilizó paños metalográficos con alúmina de 1 μm y 0,3 μm de diámetro promedio de grano
- Las muestras se sometieron a un ataque ácido con uso del reactivo keller (1ml HF, 1.5ml HCl, 2.5ml HNO₃, 95ml H₂O) durante 3 min.

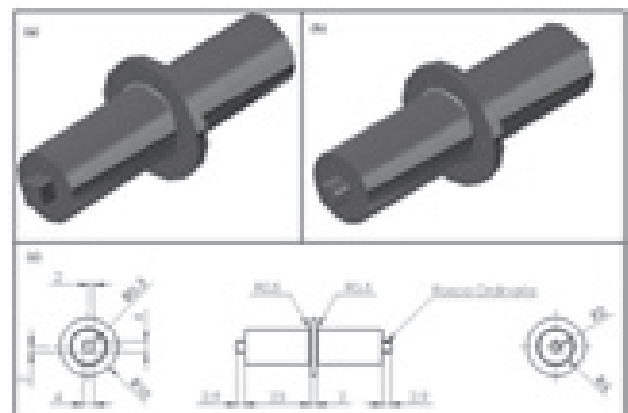


Figura 3. Diseño de la herramienta. (a) Herramienta cuadrada; (b) herramienta cilíndrica; (c) plano de la herramienta (dimensiones en mm).

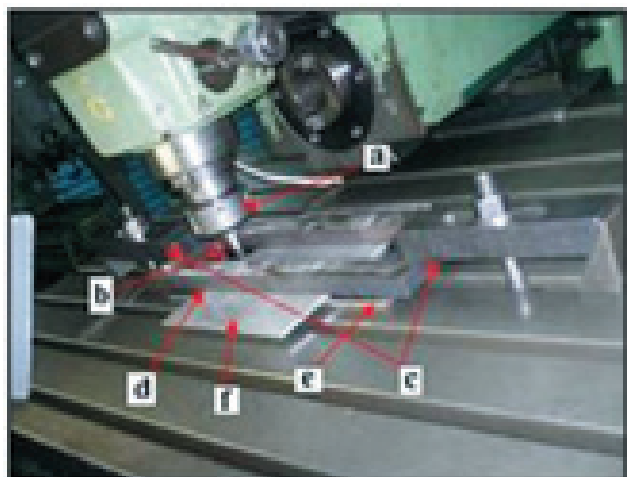


Figura 4. Montaje sobre la fresadora. (a) Pinza de la fresadora; (b) herramienta de SFA; (c) bridas de sujeción; (d) elemento de sujeción; (e) platina de respaldo; (f) unidad experimental.

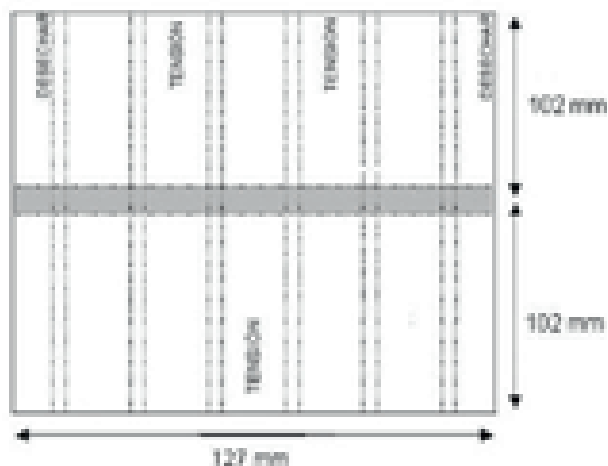


Figura 5. Unión de ranura sin preparación de borde.

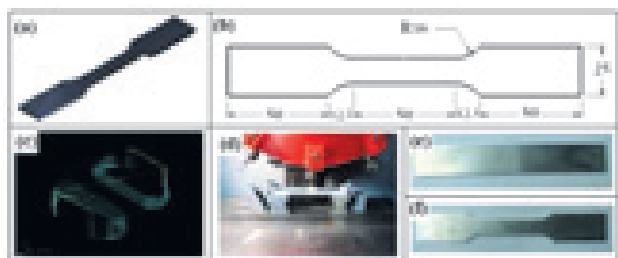


Figura 6. Fabricación de las muestras de tensión. (a) Modelo de la muestra desarrollado en software CAD CATIA; (b) Dimensiones de la muestra (unidades en mm); (c) Ruta de la herramienta desarrollado en master CAM; (d) Sujeción de las preformas en la máquina CNC; (e) Preforma; (f) Muestra terminada.

Resultados y discusión

En la Tabla 3 se presentan los resultados del ensayo de tensión obtenidos para cada condición y el material

base. La resistencia a la tensión de las juntas con el pin cilíndrico roscado fue mayor que el de las juntas realizadas con el pin cuadrado comparadas con la misma condición, en sentido opuesto a lo publicado por Elangovan y Balasubramanian, 2008. Por otro lado, se observó un aumento de la resistencia promedio a la tensión desde la condición A1 hasta la condición C3 en ambas geometrías de pin.

Tabla 3. Resultados del ensayo de tensión. LA= lado de avance; C= cordón; LR= lado de retroceso.

Geometría del pin	Condición	Lado de Rotura			Esfuerzo Máximo (MPa)
		LA	C	LR	
Cuadrado	A1		x		115,36
	A2		x		128,39
	A3		x		138,47
	B1		x		123,56
	B2		x		130,28
	B3		x		147,3
	C1			x	143,2
	C2			x	158,65
	C3		x		171,96
Cilíndrico roscado	A1	x			162
	A2			x	170,06
	A3	x			184,34
	B1			x	169,63
	B2			x	174,56
	B3			x	183,47
	C1	x			174,19
	C2			x	182,54
	C3	x			191,63
Material Base					254,43

Las juntas fabricadas con el pin cuadrado presentaron defectos de gran tamaño en la raíz de la soldadura cuando se realizaron a 125 mm/min y 250 mm/min, Figura 7, mientras que las juntas que se realizaron con el pin cilíndrico roscado no presentaron defectos, excepto para la condición A2 donde se apreció un pequeño agujero en la ZA hacia el lado de avance, Figura 8, estos defectos actúan como promotores de la falla en la prueba de tensión y debilitan la junta. Los defectos producidos durante SFA se deben principalmente al flujo inapropiado y la insuficiente consolidación del metal bajo la herramienta, Balasubramanian, 2008, indicó que las juntas realizadas con pines de caras planas exhiben resistencias superiores a la tensión comparados con las juntas realizadas con perfiles circulares, sin importar el diámetro del hombro,

porque estos producen pulsaciones durante la agitación del material en el flujo plástico, cuando se realicen bajo la relación adecuada de V_r/V_a :

- Si la velocidad de avance es demasiado rápida, el material debajo de la herramienta no se expone el suficiente tiempo a la agitación producida por la geometría del pin, se interrumpe el flujo de material y
- Si la velocidad de soldadura es demasiado lenta, el flujo se ve interrumpido por las caras planas del pin.

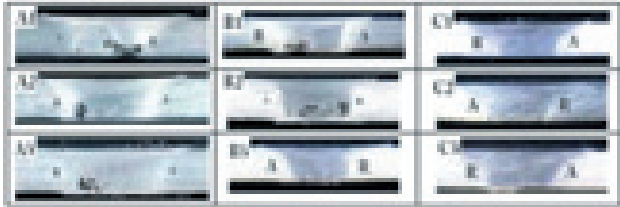


Figura 7. Macroestructuras de las juntas realizadas con el pin cuadrado.



Figura 8. Macroestructuras de las juntas realizadas con el pin cilíndrico.

Varios investigadores coinciden (Liu *et al.* 2003; Balasubramanian, 2008; Cabibbo *et al.* 2007; Franco *et al.* 2009; Elangovan and Balasubramanian, 2009) en que a mayores velocidades de rotación, es mayor la cantidad de calor localizado alrededor de la herramienta lo cual facilita el flujo del material plástico, además el aumento en la velocidad de soldadura reduce el ingreso de calor por unidad de longitud y afectan en menor medida el material alrededor de la junta. Esta condición se traduce en mejores propiedades mecánicas de la junta debido a una mejor mezcla o agitación del material bajo el hombro de la herramienta y una reducción del tamaño de la zona afectada por el calor -ZAC y la zona termomecánicamente afectada - ZTMA. Este comportamiento se observa en las Figuras 9 y 10, donde se relacionan el esfuerzo máximo que soporta la muestra antes de romperse con la velocidad de rotación y la velocidad de avance.

Las muestras fabricadas con el pin cuadrado presentan un aumento abrupto en la resistencia a la tensión, cuando la velocidad de avance es superior a 250 mm/min y se mantiene constante la velocidad de rotación de la herramienta, mientras que el incremento en la resistencia a tensión de

las juntas fabricadas con el pin cilíndrico roscado no es tan repentino, esto se debe a la presencia de los defectos que se presentaron en las juntas realizadas a bajas velocidades de rotación y avance, lo cual revela el uso de relaciones de V_a/V_r no indicadas. Elangovan y Balasubramanian, 2008, sostienen que el comportamiento de proporcionalidad directa de la resistencia mecánica de las juntas con las velocidades de rotación y avance de la herramienta es típico de las soldaduras realizadas por el proceso SFA, cuando se hacen a bajas velocidades de avance y rotación, hasta un valor crítico donde es máxima la resistencia mecánica de la junta, y se reduce a partir de este punto debido a la aparición de defectos de vacío en la junta que inician o promueven la fractura; estos defectos se deben principalmente a altas velocidades de flujo del material que está debajo de la herramienta y no favorecen el proceso de forja que se lleva a cabo en la junta. Por otro lado, la resistencia a la tensión siempre fue más alta que el mínimo requerido por el código AWS D 1,2 como criterio de aceptación para las juntas soldadas de la aleación AA6061 (11,55 kg/mm² - 113,19 MPa), tomada como referencia.

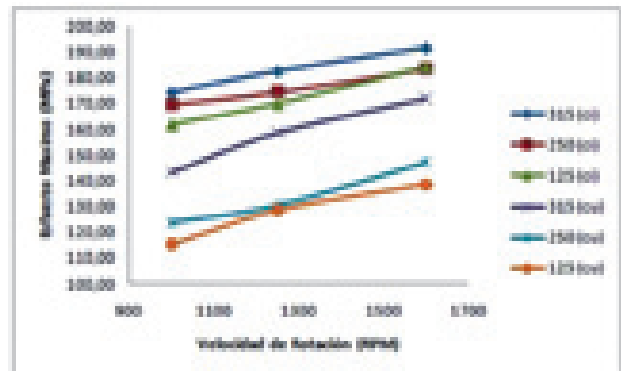


Figura 9. Relación entre el esfuerzo máximo y la velocidad de rotación. ci = cilíndrico roscado; cu = cuadrado.

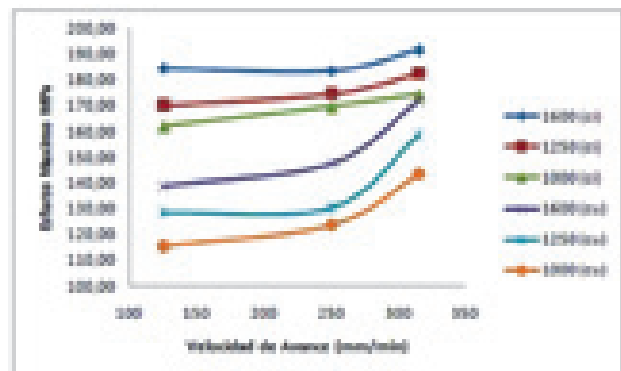


Figura 10. Relación entre el esfuerzo máximo y la velocidad de avance. ci = cilíndrico roscado; cu = cuadrado

En la Tabla 3 se aprecia el lado de la falla durante la prueba de tensión, y en la Figura 1 se observa esquemáticamente los lados de avance (LA) y de retroceso (LR) en el proceso SFA, en el caso de las juntas realizadas con el pin cuadrado la falla ocurrió generalmente en el centro del cordón de soldadura, debido a los defectos presentes. Las juntas realizadas con el pin cilíndrico roscado fallaron fuera del cordón de soldadura, específicamente en la ZAC, algunas en el lado de avance y otra en el lado de retorno, sin una tendencia aparente. Esta es la zona típica de falla para las uniones soldadas de aleaciones de aluminio envejecibles debido al ciclo térmico que sufre durante el proceso y la subsecuente generación de precipitados no coherentes.

Conclusiones

La velocidad de rotación, la velocidad de avance de la herramienta y la geometría del pin juegan un papel importante en la resistencia mecánica de la junta, se encontró una mayor resistencia a la tensión cuando se utilizó el pin cilíndrico roscado.

La velocidad de rotación y la velocidad de avance tienen una relación directamente proporcional con la resistencia a la tensión de las juntas. A un menor ingreso de calor por unidad de longitud mejor capacidad de flujo del material debajo del hombro durante el proceso de soldadura, a favor de una menor longitud de la zona afectada por el calor.

La soldadura por fricción-agitación aparece como una solución factible a los problemas asociados con la soldabilidad de las aleaciones de aluminio de alta resistencia o aleaciones envejecibles dado que es posible obtener juntas sanas libres de defectos, si se aplican adecuadamente las variables del proceso.

La SFA se ha utilizado con éxito en la industria naval en la construcción de paneles para cubiertas, tanques, suelos, cascos y superestructuras y en la industria aeroespacial en reemplazo del remachado manual en la estructura del avión y el fuselaje.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle y al Servicio Na-

cional de Aprendizaje - SENA, en especial a sus Centros de Formación ASTIN y CDTI por su apoyo al proyecto. Al ingeniero José Dámaso Ortiz B. por su aporte en la traducción del resumen.

Referencias

- ALUMINA Productos Extruidos – Perfiles Estandar; Aluminio Nacional – ALUMINA; 1999
- AMERICAN WELDING SOCIETY. Structural Welding Code-Aluminium. Miami, florida. LeJeune Road. 2003. Pag 21(AWS D1.2).
- AMU B, Maribel; FRANCO A, Fernando. Microestructura y propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de la unión soldada de la aleación 6261-T5. En: Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. S1 (2) (2009); p. 767-772.
- BALASUBRAMANIAN, V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters. En: Materials Science and Engineering A. No. 480 (2008); p. 397-403.
- CABIBBO, M; McQUEEN, H.J.; EVANGELISTA, E.; SPIGARELLI, S. DI PAOLA, M; FALCHERO, A. Microstructure and mechanical property studies of AA6056 friction stir welded plate. En: Materials Science and Engineering A. No. 460-461 (2007); p. 86-94.
- ELANGO VAN, K; BALASUBRAMANIAN, V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. En: Materials and Design. No. 29 (2008); p. 362-373.
- ELANGO VAN, K.; BALASUBRAMANIAN, V.; BABU, S. Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model. En: Materials and Design. No. 30 (2009); p. 188-193.
- FRANCO A. Fernando; SÁNCHEZ, Hugo; BETANCOURT, Diana; MURILLO, Orlanis. Soldadura por Friccion-Agitacion de Aleaciones Ligeras – una Alternativa a Nuestro Alcance. En: Suplemento de la Revista latinoamericana de Metalurgia y Materiales. S1 (3) (2009); p. 1369-1375.
- LIU, H.J.; FUJI, H.; MAEDA, M.; NOGI, K. Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy. En: Journal of Materials Processing Technology. No. 142 (2003); p. 692-696.
- MISHRAA, J.; MAB ZY, RS. Mater; Sci. Eng. 2005, **R 50**: 1-78.
- NANDAN, R; DEBROY, T; BHADESHIA, H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. En: Progress in Materials Science. No. 53 (2008); p. 980-1023.
- S.R. Ren, Z.Y. Ma, L.Q. Chen. Effect of welding parameters on tensile properties and fracture behavior of friction stir welded Al-Mg-Si alloy. En: Scripta Materialia 56 (2007) 69–72.