

OPTIMIZACIÓN DE SOLDADURA POR FRICCIÓN-AGITACIÓN DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA 6261-T5 MEDIANTE APLICACIÓN DE METODOLOGÍA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

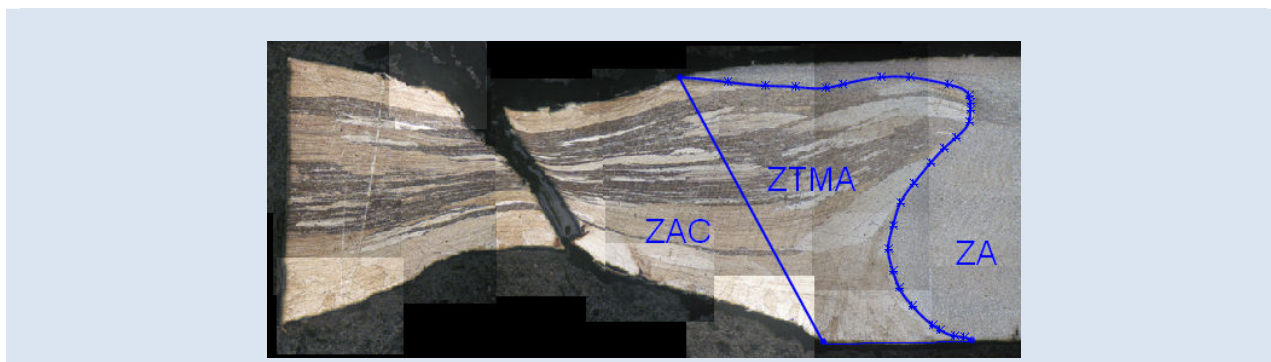
Lucas O. Urbano¹, Marisol Gordillo^{2,3,*}, Fernando Franco^{1,2}

1: Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

2: Grupo de Materiales Compuestos, Universidad del Valle. Cali, Colombia

3. Grupo de Modelación y Simulación. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia.

*e-mail: mgordillo@uao.edu.co



RESUMEN

En este artículo se reportan los resultados de la aplicación de la metodología de superficie de respuestas para evaluar la resistencia a la tensión en juntas obtenidas por el proceso de soldadura por fricción-agitación (SFA), en función de la velocidad de rotación de la herramienta y la velocidad de soldadura. Las uniones fueron soldadas con una máquina fresadora convencional DECKEL FP4M con capacidad de 3 HP y un pin cilíndrico roscado. Las uniones soldadas se realizaron variando la velocidad de rotación y la velocidad soldadura de la herramienta con el fin de analizar el efecto de estos parámetros sobre la microestructura y la resistencia a tensión de las juntas. En las imágenes microscópicas se aprecia claramente el efecto de la recristalización dinámica en la Zona Agitada (ZA). Los perfiles de microdureza presentan la típica forma de W y revelan junto con la metalografía realizada a las muestras ensayadas a tensión que la Zona Afectado por el Calor (ZAC) es la más débil de las zonas microestructurales de la junta. La mayor resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio AA 6261-T5 por SFA fue obtenida utilizando el pin cilíndrico roscado, (191,63 MPa) a una velocidad de soldadura 315 mm/min y una velocidad de rotación de 1600 rpm.

Palabras Claves: Aluminio 6261-T5, SFA, Microestructura de la junta, Velocidad de rotación, velocidad de soldadura.

OPTIMIZATION OF FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM ALLOY AA 6261-T5 THROUGH APPLICATION OF RESPONSE SURFACE METHODOLOGY

ABSTRACT

This article reports the results of applying the response surface methodology to evaluate the tensile strength in joints obtained by the process of friction-stir welding (SFA), depending on the speed of rotation of the tool and welding speed. The joints were welded with a conventional milling machine capable DECKEL FP4M 3 HP and a threaded cylindrical pin. In the microscopic images clearly shows the effect of the dynamic recrystallization in the stirred zone (ZA). Microhardness profiles show the typical shape of W and with metallography performed on samples tested at tension that Heat Affected Zone (HAZ) is the weakest microstructural areas of the join. The greater tensile strength of the welded joints of the aluminum alloy AA 6261-T5 by SFA (191.63 MPa) was obtained using the threaded cylindrical pin, a welding speed 315 mm / min and a rotation speed of 1600 rpm.

Keywords: 6261-T5 aluminum, SFA, rotational speed, welding speed.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la amplia variedad de aplicaciones estructurales que han alcanzado las aleaciones de aluminio y las dificultades que se presentan al unir las diferentes piezas mediante los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico, la industria moderna se ve abocada a buscar nuevas alternativas para realizar las uniones de las diferentes partes que conforman una estructura dada. Las aleaciones de Al-Mg-Si son tratables térmicamente o envejecibles y poseen buena soldabilidad en comparación con otras aleaciones [1]. Por eso son ampliamente usadas en el campo estructural, en la fabricación de tanques de almacenamiento y aplicaciones aeronáuticas. No obstante sufren de ablandamiento severo en la Zona Afectada por el Calor (ZAC), debido al fenómeno propio de los procesos a elevadas temperaturas de disolución de precipitados durante el ciclo térmico, Mg_2Si específicamente para el caso de las aleaciones Al-Mg-Si [2].

La Soldadura por Fricción-Agitación (SFA) es un novedoso proceso de estado sólido que supera los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico debido a que permite obtener soldaduras sanas sin producir la fusión del material base, a temperaturas mucho menores que las producidas en los procesos convencionales. Se espera que las propiedades mecánicas de la junta mejoren con respecto a los procesos convencionales, ya que al soportar un ciclo térmico menos severo se reduce el deterioro de las propiedades mecánicas en la zona afectada por el calor de dichas aleaciones.

En varias aleaciones de aluminio se han logrado juntas libres de defectos con buenas propiedades mecánicas, incluso en aquellas consideradas de baja soldabilidad [3]. Cuando se realizan juntas por SFA, las transformaciones de fase se producen durante el ciclo de enfriamiento y debido a la ausencia de metal fundido se puede observar que el proceso SFA ofrece varias ventajas frente a los procesos convencionales de arco eléctrico [4].

El paso de la herramienta rotando y avanzando a través del material de la junta produce varias zonas microestructurales, el Metal Base (MB) que no sufre cambios, la Zona Afectada por el Calor (ZAC) donde la microestructura cambia únicamente debido al ciclo térmico ocurrido en el proceso, la Zona Termomecánicamente Afectada (ZTMA) donde la

microestructura del material cambia debido al ciclo térmico y la deformación plástica provocada por la herramienta y la Zona Agitada (ZA) donde el material sufre deformaciones plásticas severas a elevadas temperaturas que promueven la recristalización dinámica en esta zona debido a la acción del pin.

El objetivo del presente estudio es determinar la relación entre las transformaciones de fases ocurridas durante el proceso SFA en la microestructura con las propiedades mecánicas de las juntas soldadas de la aleación de aluminio AA 6261-T5, por medio de la aplicación de técnicas estadísticas tales como la metodología de superficie de respuesta (M.S.R). Esta metodología estadística permita hacer predicciones en el área de experimental definida por los factores de estudio. En este caso hacer predicciones en función de parámetros como la velocidad de soldadura, velocidad de rotación, en la búsqueda de optimizar la resistencia a la tensión a través de la identificación de las regiones que conducen a un valor mínimo ó máximo de resistencia a la tensión.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y Equipos

Se utilizaron placas de la aleación de Al AA-6261-T5 cortadas de perfiles extruidos con dimensiones de 90 x 147 mm macizos y espesor de 3 mm, soldadas a tope por fricción agitación en dirección perpendicular a la dirección de extrusión de las placas. Se realizaron 9 placas para determinar los resultados de resistencia a la tensión para todos los tratamientos de SFA, mientras que para el metal base se utilizaron 3 placas. En la Tabla 1, se presenta la composición química de la aleación de Al AA-6261-T5, obtenida del fabricante.

Se utilizó una máquina fresadora convencional marca DECKEL FP4M de 3 HP, para tres niveles de las variables velocidad de rotación (V_r) y la velocidad de soldadura (V_s), se conservaron constantes parámetros como la inclinación de la herramienta al $1,5^\circ$ con respecto al eje vertical, la rotación en el sentido dextrógiro y la profundidad del pin a 2,8 mm de la superficie, obteniéndose diámetros promedios de 7,9, 7,9 y 9,4 para las muestras con V_r / V_s de 8, 10 y 12,8 respectivamente; y diámetros pequeños para el resto (Tabla 2). Para realizar las juntas se utilizó una herramienta cilíndrica de rosca ordinaria, con

dimensiones 2.9, 4 y 12 mm para la altura de pin, diámetro de pin y diámetro del hombro respectivamente.

Tabla 1. Composición química del material base.

Componente	Composición
Al	97,70%
Si	0,69%
Cu	0,27%
Mg	0,83%
Fe	0,17%
Mn	0,25%
Cr	0,02%
Zn	0,00%
Ti	0,02%
Otros	0,05%

Tabla 2. Medición de tamaño de grano para las condiciones experimentales.

$w(rpm):V_r$	$n(mm/min):V_s$	V_r/V_s	Diámetro promedio de grano
1000	125	8	7,9
1250	125	10	7,9
1600	125	12,8	9,4
1000	250	4	2,8
1250	250	5	3,3
1600	250	6,4	3,3
1000	315	3,2	2,8
1250	315	3,9	2,8
1600	315	5,1	2,8

El análisis macro y microestructural se realizó sobre la sección transversal de la unión soldada a las que se les realizó una preparación metalografica de pulido mecánico hasta la lija de grano 1200 y alúmina de 1 μm de diámetro promedio de grano en los paños metalograficos, el pulido final de las muestras se realizó utilizando abrasivo de pasta de diamante de 1 μm de diámetro promedio de grano para evitar relieves en la superficie de la muestra. 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 microdurezas sobre la línea media de la misma sección transversal se realizó en un durómetro Wilson 401 MVD, usando una carga de 200 gf con tiempo de aplicación de 10 segundos, con indentaciones separadas entre sí 1 mm.

Durante el ensayo de tensión es necesario concentrar los esfuerzos generados por la maquina en la zona del cordón de soldadura para conocer la resistencia a tracción de esta zona. En consecuencia se fabricaron muestras tipo hueso. Una vez obtenido el modelo en la herramienta CAD, figura 1(a), se generaron los planos y la trayectoria de la herramienta, figuras 1(b y c) respectivamente, para maquinar las preformas y obtener las piezas definitivas, figuras 1(e y f) respectivamente. La prueba a la tensión fue realizada en una máquina Instron 3368, con una tasa de deformación constante de 0,02 s-1 y una celda de carga de 50kN sobre muestras normalizadas por la ASTM E8.

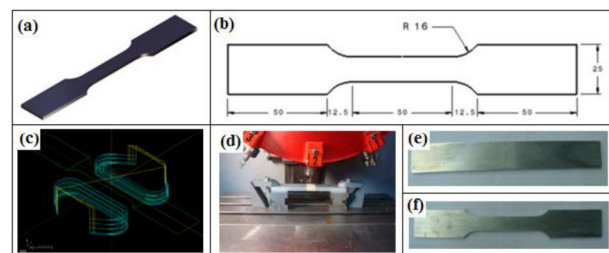


Figura 1. Fabricación de las muestras de tensión. (a) Modelo de la muestra desarrollado en CATIA; (b) Dimensiones de la muestra; (c) Ruta de la herramienta desarrollado en masterCAM; (d) Sujeción de las preformas en la maquina CNC; (e) Preforma; (f) Muestra terminada.

2.2 Diseño experimental para ajustar superficies de respuesta.

Para el análisis de los resultados cuantitativos se plantea la metodología de superficie de respuesta (MSR), debido a que este es un método estadístico práctico y útil, con el cual es posible a través de modelos matemáticos predecir propiedades importantes, en este caso la resistencia a la tensión.

El ajuste y análisis de superficies de respuesta se facilitan en gran medida con la elección apropiada de un diseño experimental, con el cual se pueda identificar las características de interés, por lo tanto la superficie de respuesta es la metodología indicada, puesto que aquí, se pretende identificar el comportamiento óptimo de la resistencia a la tensión, y lo más apropiado es utilizar el diseño de experimentos como medio para realizar las

observaciones bajo condiciones dadas, que permitan conocer su comportamiento.

El enfoque general comienza con diseños de tratamientos factoriales de 2^f para identificar factores que influyan en el proceso, experimentos subsecuentes usan las combinaciones de tratamientos para localizar un área en el espacio del factor que tenga oportunidad de producir respuestas optimas, y por lo tanto en esta región se añade un arreglo factorial de 2^f con combinaciones de tratamientos para determinar la superficie de respuesta con polinomios cuadráticos. La superficie de respuesta tiene algunas características deseables tales como proporcionar una distribución razonable de puntos de datos en todas las regiones de interés, permite investigar la idoneidad del modelo, incluyendo la falta de ajuste, proporciona la estimación del error de error interno y no requiere un número grande de corridas [5]. Esta metodología ha sido utilizada para predecir en diversas aplicaciones en ingeniería [6, 7].

En la tabla 3, se presentan los factores, niveles tratados bajo un diseño factorial 2×2 , estos se designan como (-) nivel bajo y (+) nivel alto, más puntos centrados.

Tabla 3. Factores y niveles

Factores	niveles	Puntos centrados
X1:Velocidad de rotación (RPM)	(-)1000	1250
	(+) 1600	
X2:Velocidad de soldadura(mm/min)	(-)125	250
	(+) 315	

2.3 Metodología para el análisis de la metodología de superficie de respuesta

Se planteara un diseño central compuesto para predecir la resistencia a la tensión (Y), en función de la velocidad de rotación de la herramienta (X_1) y la velocidad de soldadura (X_2), con el fin de maximizar la resistencia a la tensión.

La optimización de la resistencia a la tensión, fue planeada en un experimento único bajo la MSR. La idoneidad de este modelo fue demostrado por medio de pruebas de hipótesis, tales como la falta de ajuste, linealidad y de efectos cuadráticos. La

ecuación de predicción (1), inicialmente es analizada por medio de una tabla de análisis de varianza (ANOVA), donde se analizan las hipótesis asociadas al análisis MRS.

$$\hat{y} = \hat{b}_o + \hat{b}_1x_1 + \hat{b}_2x_2 + \hat{b}_{11}x_1^2 + \hat{b}_{22}x_2^2 + \hat{b}_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

Las hipótesis asociadas al modelo de regresión ajustado son.

- Ho: La falta de ajuste no es significativa (modelo adecuado). Ha: La falta de ajuste es significativa (modelo no adecuado)
- Hipótesis de no linealidad. Ho: $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$ Ha: $\beta_i \neq 0 \forall i = 1, 2, \dots, k$
- Hipótesis de efectos cuadráticos. Ho: $\beta_{11} = \beta_{22} = \dots = \beta_{kk} = 0$ Ha: $\beta_{ii} \neq 0 \forall i = 1, 2, \dots, k$

Los resultados se obtuvieron utilizando el paquete estadístico Minitab 14, tanto para el ajuste del modelo como la optimización, específicamente por el proceso DOE – *Superficie de respuesta*.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Cordón de soldadura

En general el aspecto del cordón de soldadura para las condiciones dadas es homogéneo con marcas de soldadura parejas y niveles de rebaba poco profundos en las condiciones Vs-Vr: 125-1600; 250-1250 y 315-1520, en el lado de avance, Figura 2. Estos niveles de rebaba poco profundos se atribuyen generalmente a una menor área de contacto entre el hombro de la herramienta y el material de la junta, además de relaciones no adecuadas entre la velocidad de rotación y la velocidad de avance de la herramienta, de tal manera que el material de la junta no logra ser confinado eficientemente bajo el hombro [8]. Por otro lado este defecto puede ser controlado a través de la carga axial o profundidad del pin en el material de la junta, aumentando así el área de contacto para mejorar la eficiencia de confinamiento del material de la junta bajo la herramienta, pero se corre el riesgo de socavar el cordón de soldadura y/o chocar el pin de la herramienta con la placa de soporte.

3.2 Microestructura

El resultado de la influencia de la herramienta sobre el material base de las juntas producidas por el proceso SFA se caracterizan por presentar diferentes

zonas microestructurales según como se muestra en la figura 3, esta es la macroestructura obtenida de micrografías realizadas a la muestra metalográfica tomada de la condición Vs-Vr: 125-1000, donde se pueden apreciar claramente la ZAC, la ZTMA-LR (lado de retorno) y la ZTMA-LA (lado de avance), la zona agitada (ZA) y aunque no se aprecie en la imagen el metal base sin afectar se muestra generalmente como otra zona microestructural de este tipo de juntas.

v (mm/min)	125	250	315
ω (rpm)			
1000			
1250			
1600			

Figura 2. Condiciones y Apariencia del cordón de soldadura.



Figura 3. Zonas microestructurales, condición Vs-Vr: 125, 1000

Uno de los grandes beneficios obtenidos por el uso de la SFA es la recrystalización completa y la microestructura de grano fino y equiaxial generada en la ZA debido a la intensa deformación plástica a elevadas temperaturas, figura 4. La ZA también se caracteriza por presentar anillos semejantes a las ondas producidas en el agua cuando se le arroja una piedra. Para el análisis de este resultado se utilizó un modelo cinético de flujo de metal basado en el proceso de fricción-agitación [9]. En este modelo un campo impuesto por la rotación del pin es modificado por la superposición de los anillos del vórtice que circulan alrededor del pin. Estos flujos limitados por una zona cerrada son trasladados uniformemente bajo la longitud del pin. El metal que no entra en los anillos del vórtice simplemente

pasa alrededor del pin en una corriente directa, pero cuando el material entra en los anillos del vórtice sufre un alto grado de procesamiento termomecánico ya que puede pasar alrededor del pin de la herramienta.

En la ZTMA la herramienta deforma plásticamente el material y el calor propio del proceso ejerce alguna influencia sobre el material. En el caso del aluminio es posible obtener deformación plástica significativa con recrystalización y existe generalmente un borde que distingue entre la ZA y la ZTMA, figura 5.



Figura 4. Microestructura de la zona agitada, condición Vs-Vr: 125-1000 a 200X.



Figura 5. Transición entre la ZA y ZTMA en el lado de avance, condición Vs-Vr: 125-1250.

La microestructura resultante de pequeños granos equiaxiales rodeando a otros granos un poco más grandes característica de la recrystalización dinámica ocurrida en la ZA se observa en la figura 4. Esta zona exhibe un proceso complejo de evolución microestructural. En la región del pin el material sufre deformaciones plásticas severas a elevadas temperaturas, que favorecen la recrystalización dinámica continua en la ZA. Aunque es difícil

describir cuantitativamente la deformación, la velocidad de deformación y el descenso gradual de la temperatura durante el ciclo térmico subsecuente.

El tamaño de grano conserva una relación directa con el aporte de calor por unidad de longitud, siendo que entre mayor sea el aporte de calor se proporcionara más energía a los granos para favorecer su crecimiento. Padmanaban, Balatsubramanian y Sarin [10] utilizaron la ecuación 2 para calcular el aporte de calor por unidad de longitud, siendo que la velocidad de avance V_s está dada en mm/s, la velocidad de rotación V_r está dada en rev/min, μ es el coeficiente de fricción, P es la fuerza axial aplicada a la soldadura y η es una constante dada como 0,97. Para efecto de los cálculos los valores de μ y P serán 0,12 y 3 kN respectivamente como lo han hecho otros investigadores [11, 12]. Los resultados de aplicar esta ecuación a las condiciones experimentales dadas en este experimento se resumen en la figura 6, esto se correlaciona muy bien con las mediciones de los tamaños de grano presentadas en la tabla 2, siendo que cuando mayor fue el ingreso de calor más grande fue el tamaño de grano alcanzado en la ZA.

$$Q = \frac{2\pi}{3V_s} \times \mu \times P \times V_r \times \eta \quad (2)$$

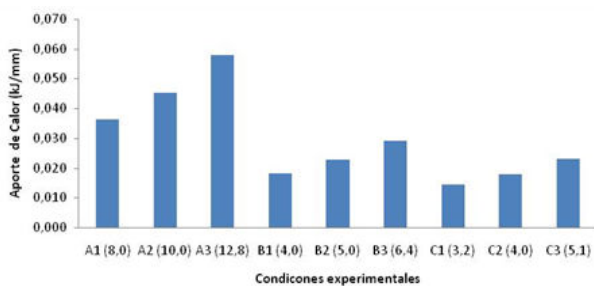


Figura 6. Aporte de calor por unidad de longitud para las condiciones experimentales. Notación: A1 (V_s - V_r : 125-1000), A2 (V_s - V_r : 125-1250), A3 (V_s - V_r : 125-1600), B1 (V_s - V_r : 250-1000), B2 (V_s - V_r : 2505-1250), B3 (V_s - V_r : 250-1600), C1 (V_s - V_r : 315-1000), C2 (V_s - V_r : 315-1250), C3 (V_s - V_r : 315-1600). Entre paréntesis V_r/V_s .

3.3 Microdureza

Las figuras 7 y 8 muestran la relación del perfil de microdurezas con la velocidad de soldadura y la velocidad de rotación respectivamente, estas presentan los típicos perfiles en W de las juntas unidas por SFA sobre aleaciones endurecibles por precipitación o envejecibles [13]. Cuando se

comparan los resultados obtenidos a diferentes velocidades de rotación, figura 8, se observa que no hay gran variación en los perfiles de dureza, sin embargo el perfil obtenido para la condición B1 (V_s - V_r : 250-1000) es un poco mayor que el de las condiciones B2 (V_s - V_r : 250-1250) y B3 (V_s - V_r : 250-1600), este resultado se puede relacionar con los resultados de aporte de calor, siendo que la condición B1 (V_s - V_r : 250-1000) presento la menor relación V_r/V_s lo que indica una menor cantidad de aporte de calor por el proceso, esto genera una menor perdida de propiedades mecánicas con respecto al metal base (20% menos) debido a la presencia de precipitados endurecedores.

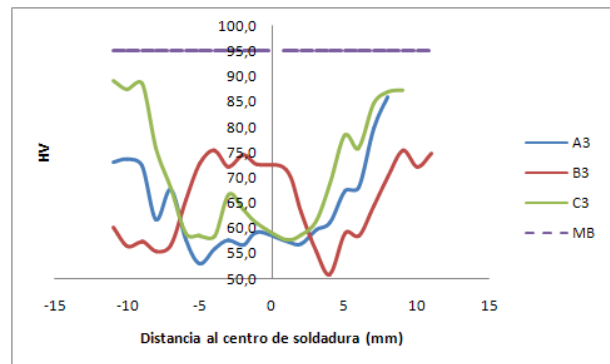


Figura 7. Relación del perfil de microdurezas de la junta con la velocidad de soldadura.

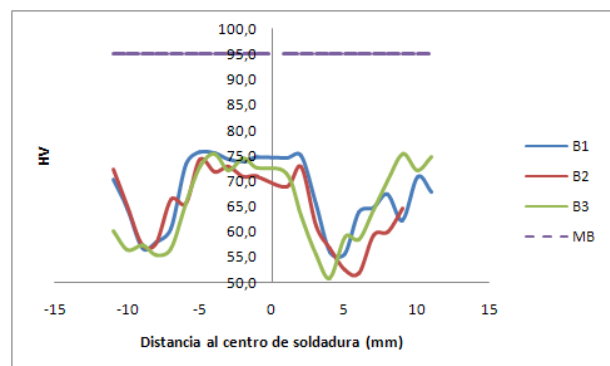


Figura 8. Relación del perfil de microdurezas de la junta con la velocidad de rotación.

De la misma manera cuando se comparan las curvas con respecto a la velocidad de soldadura, figura 7, la menor dureza en la ZA se obtuvo para la condición A3 (V_s - V_r : 125-1600), siendo esta la que recibió los más altos aportes de calor (mayor V_r/V_s), en general el aumento en la velocidad de soldadura tiene un efecto positivo sobre las propiedades de la junta ya

que esto disminuye la cantidad de calor por unidad de longitud que ingresa a la junta. Por otro lado las menores durezas se presentaron en la ZTMA del lado de avance, este es un resultado de la presencia de precipitados no coherentes que empobrecen las propiedades mecánicas de esta zona.

3.4 Resistencia a la tensión

En la figura 9, se presentan las distintas condiciones, y se puede apreciar que estas están por debajo del material base, la mejor de las condiciones planteadas es la velocidad de rotación de la herramienta (1600 rpm) y la velocidad de soldadura (315 mm/min) con una resistencia a la tensión de 191,63 MPa.

Por otro lado, es apreciable un aumento de la resistencia promedio a la tensión en cada una de las condiciones, es decir que dentro de cada una de ellas, la resistencia a la tensión tiende a incrementarse, esto sugiere que hay un efecto distintivo de la velocidad de la herramienta dentro de cada velocidad de la soldadura, este resultado coincide con varias investigaciones en las cuales han hallado que a mayores velocidades de rotación es mayor la cantidad de calor localizado alrededor de la herramienta facilitando el flujo del material plástico [11,14, 15, 16, 17, 18], además el aumento en la velocidad de soldadura reduce el ingreso de calor por unidad de longitud, afectando 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 ZAC.

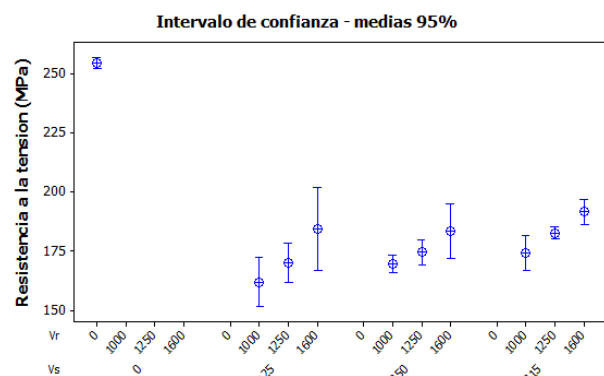


Figura 9. Resistencia a la tensión de cada combinación de velocidad de la soldadura y de rotación.

Las eficiencias mecánicas en general estuvieron

entre 62,73 % y 75,6 % (figura 10). Dado los resultados de la resistencia a la tensión, sus eficiencias la conservan siendo la condición de velocidad de rotación de la herramienta (1600 rpm) y la velocidad de soldadura (315 mm/min) la más eficiente con un 75,32%, y Vr/Vs de 5,1, esta condición igualmente presentó la elongación máxima 7,58 %, sin que hubiese mucha diferencia entre las elongaciones.

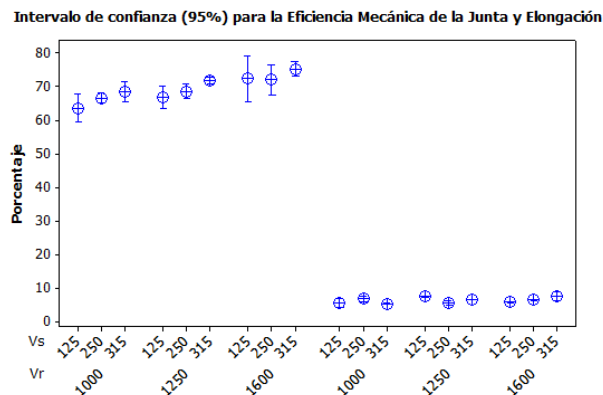


Figura 10. Eficiencia mecánica de la junta y elongación de las muestras a tensión.

La falla característica de las juntas realizadas es la que se muestre en la figura 11, ocurrida en la ZAC de la junta, algunas en el lado de avance y otras en el lado de retorno sin presentarse alguna tendencia como se puede apreciar en la figura 12. Esta falla presenta un comportamiento dúctil iniciada en el plano de máximo esfuerzo cortante a 45° de la superficie de la raíz de la junta como puede apreciarse en las figuras 11.

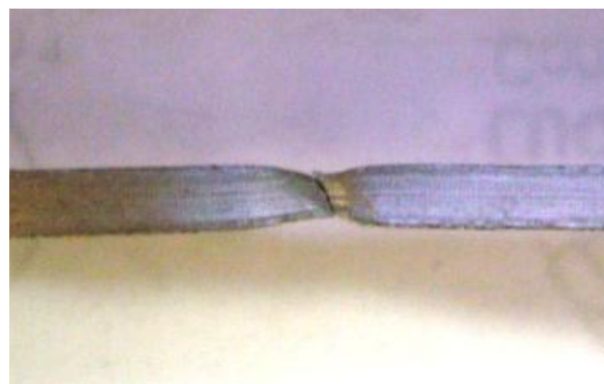


Figura 11. Falla característica de las uniones soldadas con el pin cilíndrico roscado.

Esta zona de falla se relaciona directamente con los

perfiles de microdureza presentados en las figuras 7 y 8 donde se aprecia que la zona más débil es la ZAC debido al ciclo térmico que esta sufre y la subsecuente generación de precipitados no coherentes. La figura 13 muestra la superficie de fractura de típica de una falla dúctil con múltiples dimples asociados a los bordes de grano.

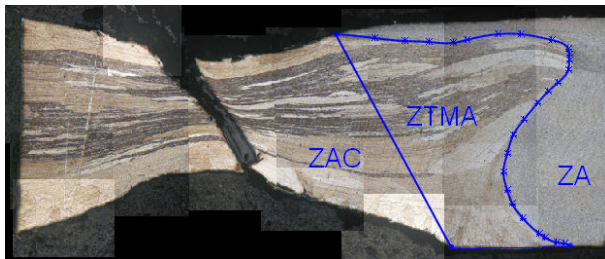


Figura 12. Micrografía de falla.

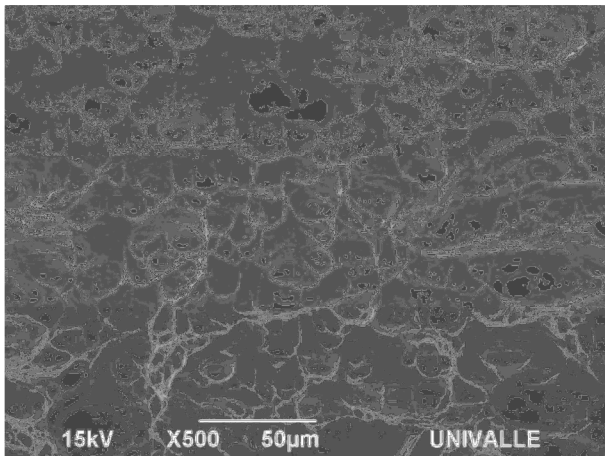


Figura 13. Imagen SEM de la superficie de fractura.

3.5 Análisis de la información por medio de Metodología de Superficie de Respuesta

Inicialmente se prueba la validez estadística del modelo, verificando los supuestos sobre el error del modelo los cuales se cumplieron a satisfacción, es decir $\epsilon \sim N(0, \sigma^2)$, con varianza constante e independientes.

Planteado un modelo cuadrático para la resistencia la tensión de los efectos que se consideraron lineales y cuadráticos e interacción (ecuación 3). Con este modelo se obtuvieron las estimaciones de los parámetros por medio del método de mínimos cuadrados, en el cual fueron significativos los efectos lineales y cuadráticos de la velocidad de soldadura a un nivel de significancia de 0.004.

$$\hat{y} = 149.78 + 0.02x_1 - 0.113x_2 + 0.000453x_2^2 + \epsilon \quad (3)$$

La bondad del ajuste del modelo obtenido fue de 92% (r^2), el cual fue el mejor obtenido, para la resistencia a la tensión (Y) relacionado con las variables velocidad de rotación (x_1) y velocidad de soldadura (x_2).

En la tabla 4, se presenta el análisis de la varianza (ANOVA) para verificar la idoneidad del modelo, en esta se observa claramente que el efecto de las variables velocidad de rotación y velocidad de avance tiene un efecto mayor (1876,28) que el efecto de los errores (162,89). Con respecto a las hipótesis que se evalúan para cada una de las variables donde se halló que: La hipótesis nula, para la prueba falta de ajuste no es significativa (una aproximación adecuada) indica que no hay suficiente evidencia para rechazar esta hipótesis (p-valor 81,7%), igualmente se obtuvo que el efecto cuadrático es significativo a un nivel de significancia de 0,004 como también los efectos lineales a un nivel de significancia de 0,000.

Tabla 4. Análisis de varianza para el modelo lineal.

Fuente	g.l	Suma de cuadrados	F	P-valor
Regresión	3	1876,28	84,47	0,000
Lineal	2	1800,28	44,86	0,000
Cuadrado	1	76,00	10,26	0,004
Error residual	22	162,89		
Falta de ajuste	5	18,52	0,44	0,817
Error puro	17	144,37		
Total	25	2039,17		

Una vez se obtuvo que el modelo cuadrático es adecuado, este es utilizado para realizar la optimización (máximo) de la resistencia a la tensión a partir de las variables Velocidad de rotación y Velocidad de soldadura.

Las condiciones bajo las cuales se realizó la optimización para el caso entre más grande mejor de la resistencia a la tensión son: Un mínimo de 170 MPa, y un valor objetivo de 180 MPa.

Los resultados obtenidos son:

Velocidad de rotación: $X_1 = 1600$ RPM

Velocidad de soldadura: $X_2 = 315$ mm/min

Bajo estos valores de X_1 y X_2 se predice la resistencia a la tensión de 191,405 MPa, con una predicibilidad de 1. (Figura 14.)

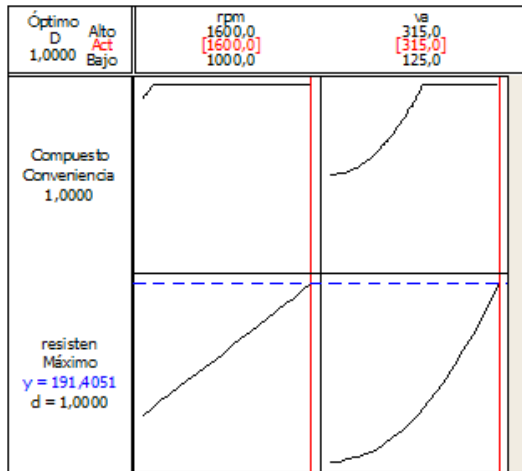
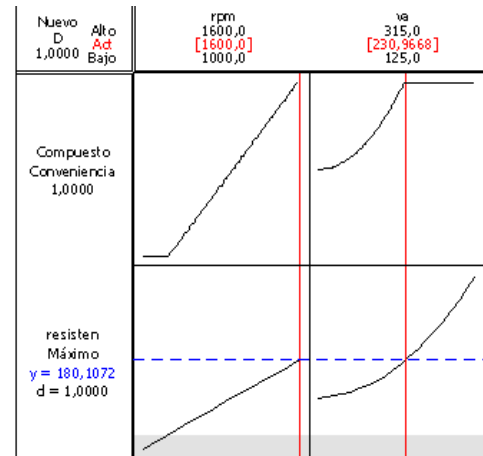


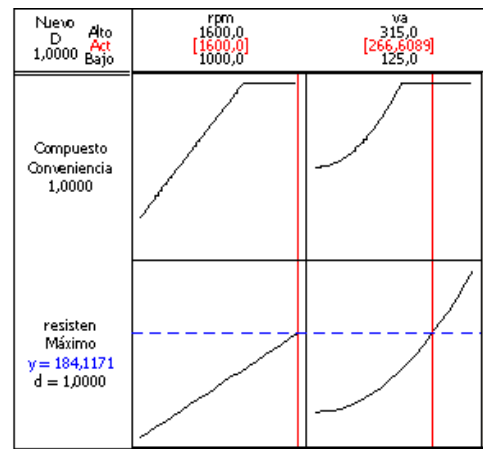
Figura 14. Optimización de la resistencia a la tensión.

Otros valores conseguidos mediante la optimización de la resistencia a la tensión, ya que es evidente que los valores máximos se logran con la misma predictibilidad para varias condiciones de velocidad de rotación y velocidad de avance, se ilustran en las figuras 15 a, b, c, en las cuales se producen resistencias a la tensión de aproximadamente 180 MPa. Así mismo se observa que con los valores máximos de velocidad de rotación (1600 RPM) y velocidad de soldadura (315 mm/min), se produce una resistencia a la tensión de aproximadamente 191 MPa, este valor es muy cercano a los valores obtenidos experimentalmente. Los valores obtenidos son:

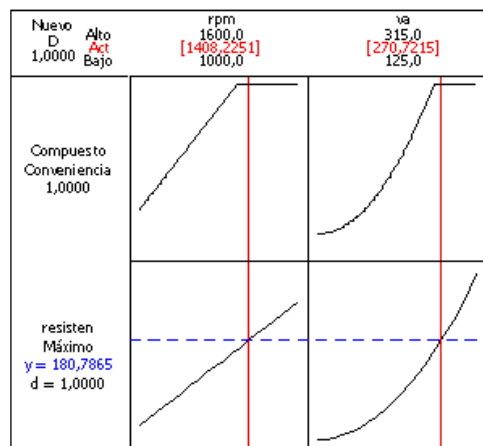
- Para $X_1= 1600$ y $X_2=230,96$ se predice una Resistencia a la tensión de 180,11 MPa.
- Para $X_1= 1600$ y $X_2=266,60$ se predice una Resistencia a la tensión de 184,12 MPa.
- Para $X_1= 1408,22$ y $X_2=270,72$ se predice una Resistencia a la tensión de 180,78 MPa.



(a)



(b)



(c)

Figura 15. Otras optimizaciones de la resistencia a la tensión.

4. CONCLUSIONES

Las transformaciones microestructurales ocurridos durante la SFA y las propiedades mecánicas resultantes en las juntas soldadas de la aleación de aluminio AA 6261-T5, dependen esencialmente del aporte de calor sobre la junta y de la excesiva deformación plástica a altas velocidades que promueve la recristalización dinámica sobre la ZA de la junta.

El aumento de la velocidad de rotación, que genera una mejor capacidad de flujo plástico por efecto de la rotación del pin, y el aumento de la velocidad de soldadura, que produce un menor aporte de calor por unidad de longitud tienen una relación directamente proporcional con la resistencia mecánica de la junta, para el rango de las condiciones estudiadas.

El análisis estadístico de la metodología de superficie de respuesta para los resultados de tensión determinó que la resistencia a la tensión está relacionada con la velocidad de soldadura que con la velocidad de rotación, (R^2 : 92%).

La mayor resistencia a la tensión de las juntas soldadas de la aleación de aluminio AA 6261-T5 por SFA (191,63 MPa) fue obtenida utilizando el pin cilíndrico roscado, una velocidad de soldadura 315 mm/min y una velocidad de rotación de 1600 rpm.

Los resultados de este estudio indican que las características de las juntas soldadas de la aleación de aluminio AA 6261-T5 por SFA, son una buena alternativa para realizar uniones en aplicaciones estructurales debido a que durante el proceso se genera un menor aporte de calor que en los procesos convencionales de soldadura por arco eléctrico, disminuyendo en gran medida el ancho de la ZAC.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad del Valle (Colombia), al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias y al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) por el soporte para el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS

- [1]. Thomas WM. Friction stir welding. International Patent Application No. PCT/GB92/02203 and GB

Patent Application No. 9125978.8.U.S. Patent No. 5,460, 317; 1991.

- [2]. Dawes CJ. An introduction to friction stir welding and its development. *Weld Met Fabrication* 1995; 12–6.
- [3]. Zeng WM, Wu HL, Zhang J. Effect of tool wear on microstructure, mechanical properties and acoustic emission of friction stir welded 6061 Al alloys. *Acta Metall Sinica* 2006; 19(1):9–19.
- [4]. Olga Valerio Flores. Micro structural issues in a friction stir welded aluminium alloy. *Scripts Mater* 1998; 38(5):703–8.
- [5]. Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons, 5th edition: 427-466; 2001.
- [6]. Eguia V. M., E.J. Martínez-Conesa, Segura F., M.C. Manjabacas y E. Abellán. Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación AA 6063-T5 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura. *Revista de metalurgia*, 2012; 48 (5) 333-350, 2012. Issn: 0034-8570
- [7]. Martínez-Conesa E.J.; Segura F. Quiles; Eguia V. M.; Valcuende Paya M. Optimización de la Zona Afectada Térmicamente con la Aplicación de la Metodología De Superficie De Respuesta. XVI congreso de ingeniería de proyectos. 2012 .Valencia – España. CSIC - Revista de Metalurgia, 48-5 (2012): 333-350.
- [8]. Velandia, J. A; Determinación del Efecto de la Fuerza Axial en la Resistencia Mecánica de Soldaduras por Fricción Agitación (SFA); Tesis de Grado; Universidad del Valle; 2009.
- [9]. J.A. Schneider; A.C. Nunes, Jr. Characterization of Plastic Flow and Resulting Microtextures in a Friction Stir Weld, *Metall. Mater. Trans. B*, Vol 35, 2004, p 777–783.
- [10]. Padmanaban, G.; Balasubramanian, V. y Sarin J.K. Influences of welding processes on microstructure, hardness and tensile properties of AZ31B magnesium alloy. *J Mater Eng Perform.* 2009, Vol 19, 2, p. 155-165.
- [11]. Elangovan K., Balasubramanian V; Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy. *Journal of materials processing technology* 2008; 163–175.
- [12]. Balasubramanian V. Relationship between base metal properties and friction stir welding process parameters. *Materials Science and Engineering A* 2008; 480 397–403.
- [13]. 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. *Materials Science and Engineering A*. 2007; 460–461 86–94.
- [14]. 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. *Scripta Materialia* 56 (2007) 69–72.
- [15]. Liu HJ, Fuji H, Maeda M, Nogi K. Mechanical properties of friction stir welded joints of 1050-H 24 aluminium alloy. *Sci Technol Weld Join* 2003; 8:450–4.
- [16]. Elangovan, K. Balasubramanian V. Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Materials and Design* 29 2008; 362–373.
- [17]. Arenas F. F., Sánchez H, Betancourt D, Murillo O; Soldadura por Friccion-Agitacion de Aleaciones Ligeras – una Alternativa a Nuestro Alcance; *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*; 2009.
- [18]. Elangovan K.; Balasubramanian V, Babu S; Predicting tensile strength of friction stir welded AA6061 aluminium alloy joints by a mathematical model; *Materials and Design*; 2009.