

Señales vibroacústicas para evaluar geometrías de herramienta en la soldadura por fricción agitación



Mario César Sánchez-Orozco*

Julio Blanco-Fernández **

Emilio Jiménez-Macias ***

Mercedes Pérez-de-laParte **

MSc. Ing. Mecánico

Dr. Ingeniero Industrial Mecánico

Dr. Ingeniero Industrial Eléctrico

Dra. Ingeniera de Telecomunicaciones

* Universidad de Oriente. Facultad de Ing. Mecánica. Ave. Las Américas s/n. Santiago de Cuba. Cuba. Tfn. 53 22 644453. mario sanz@gmail.com

** Universidad de La Rioja. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. ** Dpto. de Ingeniería Mecánica y *** Eléctrica. C/Luis de Ulloa 20, 26004 Logroño (La Rioja) España. julio.blanco@unirioja.es, emilio.jimenez@unirioja.es, mercedes.perez@unirioja.es

Recibido: 18/09/2012 • Aceptado: 22/02/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5326>

VIBROACOUSTICAL SIGNALS TO EVALUATE TOOL PROFILES ON FRICTION STIR WELDING PROCESS

ABSTRACT

- This paper presents a study to evaluate the relationship between the tool design and vibroacoustical signals of friction stir welding process in the aluminum AA1050. The characterization in time and frequency domains of vibroacoustical signal and the statistical analysis have been carried out in order to correlate them with the design of two different tools. Vibroacoustical signals have been filtered in order to eliminate the noise of the friction stir welding machine. Additionally, the wavelet transform has been used as an efficient tool for filtering vibration signal waveforms. The statistical analysis has confirmed that the vibroacoustical signals were significantly affected by the tool design. It was found that in the frequency range of 0 to 100Hz there exists valid information to evaluate changes in the tool profile. Analysis techniques based on wavelet transform constitute a tool that can be efficiently employed in the evaluation of changes in the tool profile.
- **Keywords:** Friction stir welding, vibration, signal processing, aluminium, tool design, wavelet transform.

RESUMEN

Este artículo presenta la investigación realizada para evaluar la relación existente entre el diseño de herramientas y las señales vibroacústicas emitidas durante el proceso de soldadura por fricción-agitación del aluminio AA1050. Se ha realizado la caracterización de la señal vibroacústica en el dominio del tiempo y la frecuencia, así como su análisis estadístico, para correlacionarlas con dos diseños de herramienta diferentes. Las señales vibroacústicas han sido filtradas con el objetivo de eliminar el ruido generado por la máquina empleada, y se ha empleado la transformada *wavelet* como una eficiente herramienta para el filtrado de la señal. El análisis estadístico confirma que las señales vibroacústicas se ven afectadas significativamente por el diseño de la herramienta. Se comprobó que en el rango de frecuencias de 0-100Hz existe información

válida para evaluar cambios en la geometría de la herramienta. Las técnicas de análisis basadas en la transformada *wavelet* constituyen una herramienta que puede ser empleada eficientemente en la evaluación de cambios en la geometría de la herramienta.

Palabras clave: Soldadura por fricción-agitación, vibraciones, procesamiento de señales, aluminio, diseño de herramientas, transformada *wavelet*.

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por fricción-agitación, conocida en inglés como *friction stir welding* (FSW), es un proceso de soldadura en estado sólido que entre sus principales ventajas presenta: bajo consumo de energía, poco tiempo de soldadura y bajas temperaturas del proceso; además es una técnica de unión versátil, energéticamente eficiente y de

bajo impacto ambiental. El proceso es relativamente simple: la presión, fricción y agitación generada por una herramienta compuesta por un pin y un hombro que se introduce y avanza a lo largo de la junta, plastifica y forja el material circundante logrando la unión soldada. El material deformado plásticamente es transferido desde el lado de avance de la herramienta hacia el lado de retroceso permitiendo la unión en fase sólida de las dos piezas [1].

Este proceso está considerado como el desarrollo más significativo en la unión de metales en las dos últimas décadas. Es ampliamente empleado en aplicaciones de la industria automotriz y aeroespacial con resultados satisfactorios [2,3].

Existen diversos estudios sobre uniones realizadas con FSW en aleaciones de aluminio [4-7]. Hassan *et al.* [4], reportan el efecto de las velocidades de rotación y el avance sobre la microestructura y las características mecánicas de la unión soldada de chapas disimilares de las aleaciones A319 y A356 laminado, mediante soldadura por fricción-agitación. Los autores demostraron que el incremento de la velocidad de rotación de la herramienta reduce la resistencia a la tracción, pero incrementa la ductilidad de la unión.

Szkodo *et al.* [5], evaluaron los parámetros del proceso de soldadura por fricción-agitación de la aleación de aluminio AW7075-T651, mediante el empleo de una técnica no destructiva, a fin de analizar y demostrar la relación entre la deformación en la zona mezclada y la zona termo-mecánicamente afectada con los parámetros del proceso.

Varios estudios han tratado la influencia de los parámetros de soldadura y la geometría de la herramienta en la microestructura y las propiedades de uniones soldadas de aluminio [8-12]. Mahmoud *et al.* [9], analizaron los efectos de tres diámetros diferentes y cuatro formas del pin de la herramienta en la fabricación de superficies de aluminio reforzadas con partículas de SiC.

Hattingh *et al.* [10], desarrollaron una caracterización de la influencia de la geometría de la herramienta de FSW en las fuerzas durante el proceso y la resistencia a la tracción de la soldadura. Consideraron la influencia de los factores geométricos, así como la información visual de la interacción entre la geometría de la herramienta y la zona de agitación plástica.

Valdameri y Esmerio [13], llevaron a cabo una experimentación en la cual analizaron la influencia de la geometría de la herramienta y los parámetros del proceso en la soldadura por FSW del aluminio AA5052, y compararon los resultados con la soldadura obtenida de estas mismas chapas mediante el proceso MIG. Para ello emplearon tres herramientas de diseños diferentes y distintos regímenes de soldadura, llegando a la conclusión a través del análisis macrográfico y ensayos de las propiedades mecánicas, que las chapas de AA5052 soldadas mediante FSW con la herramienta y parámetros adecuados tienen mejores propiedades mecánicas que las obtenidas mediante MIG [14].

La geometría de la herramienta es considerada uno de los principales parámetros en el control del flujo de material, la

generación de calor y la calidad de la unión. Rai *et al.* [15] concluyeron que, dentro de la geometría de la herramienta, factores tales como el diámetro del hombro, el ángulo de la superficie del hombro, el diseño del pin, y la naturaleza de la superficie de la herramienta, juegan un rol importante dentro del proceso.

La factibilidad de la aplicación del análisis de la emisión vibroacústica generada por el proceso FSW, para su monitorización continua y su caracterización es un tema de gran interés en Ingeniería, y se justifica por la necesidad del uso de técnicas no invasivas para la caracterización y control de este tipo de procesos. En la actualidad, no existen demasiados estudios disponibles que traten acerca de este tema [16-18].

Soundararajan [18] evaluó la posibilidad de aplicación de técnicas de análisis de emisión acústica (EA) para la monitorización del proceso FSW. El autor determinó, basada en la señal de EA generada, la correlación entre la pérdida de contacto de la herramienta con la pieza y el estado de la soldadura. Las características de la señal correspondiente a la interacción con la pieza y el estado de la soldadura fueron estudiadas empleando la *Transformada Rápida de Fourier* (FFT) y la *Transformada Discreta Wavelet* (DWT). El autor mostró que mediante la identificación de las frecuencias durante el proceso y el análisis de la señal descompuesta a partir de la transformada wavelet, es posible monitorizar efectivamente el contacto o no de la herramienta, o estado transitorio de la soldadura, e identificar rápidamente los cambios del proceso.

Otros trabajos de Chen *et al.* [19] muestran la aplicación de las señales de EA en los procesos FSW. Los autores plantean que los métodos FFT no son los apropiados para estos casos. Su investigación se enfoca en el procesamiento de las señales de EA para concluir la validez de su empleo en la determinación de cambios abruptos de la geometría de la pieza.

Toda la literatura consultada está enfocada en la soldadura por fricción-agitación de aleaciones de aluminio, sus parámetros, y la influencia en los cambios microestructurales y las propiedades mecánicas de la unión. No obstante, no existe información disponible de la incidencia de la geometría de la herramienta analizada mediante técnicas de EA. El principal objetivo de este trabajo es la evaluación de la incidencia de la geometría de la herramienta en las señales vibroacústicas a fin de demostrar la posibilidad de la aplicación de esta técnica para caracterizar el proceso de FSW.

2. MATERIALES Y METODOS

Las chapas empleadas para el desarrollo de la investigación fueron de aluminio AA1050 H24 con las siguientes dimensiones: 200 mm (L), 100 mm (A) y 3 mm (E). Esta aleación es conocida por su conductividad eléctrica y es comúnmente empleada en la industria automotriz, en equipamiento de la industria química y alimentaria, reflectores de luz, y en intercambiadores de calor. Esta aleación también ha sido empleada en otras investigaciones acerca del proceso FSW [15].

La composición química (wt%) del AA1050 H24 empleado fue la siguiente: Si = 0,25; Fe = 0,40; Cu = 0,05; Mn = 0,05; Mg = 0,05; Zn = 0,07; Ti = 0,05, Al = 99,5 y 0,03 correspondiente a otros elementos. El proceso FSW se realizó empleando una máquina CNC convencional dotada de control de posición en los tres ejes.

Las chapas fueron fijadas en su posición mediante bridas y la dirección de la soldadura fue normal a la dirección de laminado. Los experimentos fueron ejecutados de acuerdo a la instalación experimental mostrada en la Figura 1.

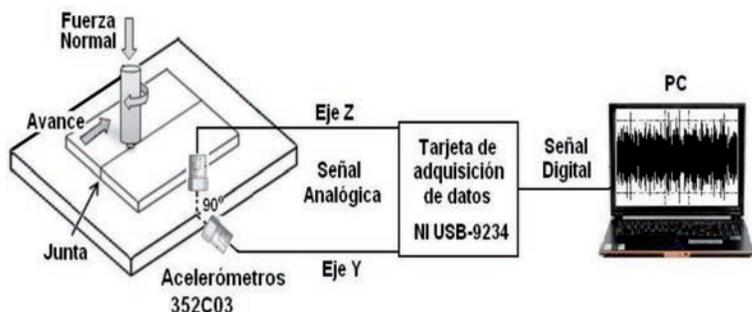


Figura 1: Esquema de la instalación experimental

Fue implementado un sistema de monitorización *on-line* para detectar la incidencia del cambio de la geometría de las herramientas en la señal vibroacústica (Figura 1). Dos sensores de emisión vibroacústica (acelerómetros piezoeléctricos) fueron situados perpendicularmente en las superficies superior (eje Z) y lateral (eje Y) de la placa de soporte. Los sensores fueron fijados a la placa de soporte con la finalidad de aproximar los ensayos a las condiciones industriales. Se usó un acoplamiento roscado con el objetivo de garantizar una buena transducción vibroacústica entre la placa soporte y el sensor.

Se tomaron los valores de la aceleración en las direcciones Z y Y de la señal vibroacústica usando el instrumento NI USB-9234 conectado a una PC. Todas las señales fueron muestreadas a 51,2 KS/s y procesadas empleando un software diseñado específicamente para este propósito. Inicialmente fue adquirida la señal vibroacústica generada por la máquina funcionando en vacío, con el objetivo de caracterizar los ruidos contenidos en la señal.

Los diámetros del pin y el hombro fueron 3 y 10 mm respectivamente. Se consideraron dos diseños de pin diferentes: un pin cilíndrico convencional con estrías (Herramienta 1) y un pin cilíndrico con ranuras horizontales (Herramienta 2). El perfil del hombro para estas herramientas fue cóncavo y similar para los dos diseños de herramienta.

Durante los ensayos, se usaron tres niveles (dos límites y un nivel central) de velocidad de rotación (ω) y traslación (v). Se utilizó un diseño experimental de tipo factorial. Para reducir el error experimental, la soldadura fue ejecutada tres veces bajo las mismas condiciones. Los parámetros del proceso de FSW empleados para unir el material se muestran en la Tabla 1.

Variables	Nivel inferior (-1)	Nivel central (0)	Nivel superior (+1)
ω , rpm	450	710	1120
v , m.min ⁻¹	40	63	100
Herramienta	Herramienta 1	-	Herramienta 2

Tabla 1: Parámetros de la soldadura por fricción-agitación

2.1. METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA INCIDENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA HERRAMIENTA EN LAS SEÑALES VIBROACÚSTICAS

Inicialmente se realizó una comparación de las señales vibroacústicas en el dominio temporal, para cada geometría de herramienta analizada. Unido a esto se realizó una caracterización del rango de frecuencia del ruido de fondo con la finalidad de extraerlo de las señales vibroacústicas.

El análisis de tiempo-frecuencia (espectrograma) de las señales se caracteriza por ser un método poderoso para el estudio de muchas señales en el campo de la ingeniería, incluyendo la señales de EA [20]. El mismo se obtiene como una secuencia de FFT del segmento de datos muestreado y permite, en este caso, observar la distribución de energía de la señal vibroacústica para determinar qué bandas brindan información útil y cuáles no contribuyen al estudio. Con el objetivo de evaluar el proceso, fueron obtenidos los diagramas tiempo-frecuencia correspondientes a las dos geometrías de herramienta.

Teniendo en cuenta que las señales analizadas son no estacionarias se evaluó el empleo de la *Transformada Wavelet* como herramienta eficiente para el tratamiento de señales de este tipo [19], que permite obtener una mayor resolución en las bajas frecuencias, lo que resulta de interés en el proceso analizado, teniendo en cuenta el rango de velocidades de rotación evaluado en la investigación. En este artículo, para la descomposición de las señales vibroacústicas en los rangos de frecuencia de interés, se empleó una wavelet de nivel 8 y una wavelet madre *Daubechies* (Db5).

Finalmente se llevó a cabo el análisis estadístico para la validación de los resultados experimentales obtenidos. El resultado de las pruebas estadísticas fue utilizado para demostrar la relación entre el diseño de la herramienta y las señales vibroacústicas generadas por el proceso FSW.

2.2. CARACTERIZACIÓN DEL RUIDO

El análisis y caracterización del ruido se llevó a cabo en ambos ejes (Y y Z). En la Figura 2 se muestra una comparación entre los espectros de potencia correspondientes a las señales de ruido y durante el proceso en el eje Y, para la condición de $\omega = 450$ rpm, $v = 100$ mm·min⁻¹ y la herramienta con pin cilíndrico convencional con estrías (Herramienta 1).

Comparando la Figura 2b correspondiente a la señal vibroacústica durante el proceso en el eje Y con la Figura 2a (señal de ruido), se puede afirmar que ocurre un incremento

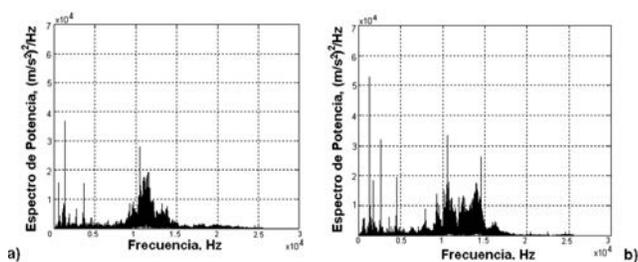


Figura 2: Espectros de potencia de la señal para $\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y Herramienta 1. a) Señal de Ruido; b) Señal durante el Proceso

significativo en los niveles de la señal para frecuencias inferiores a los 5 kHz; esta banda se corresponde con las frecuencias a las que fue realizado el proceso y a partir de las cuales se extraerá la información útil para el análisis. También se registraron aumentos en los niveles espectrales entre los 10 y 15kHz. En el caso del eje Z los niveles de las señales temporales del ruido y la señal vibroacústica adquirida durante la realización del proceso no presentaron diferencias significativas. El nivel bajo de la señal para el eje Z puede estar asociado a la fuerza constante aplicada a la pieza durante la realización de los ensayos. En base a este resultado preliminar, sólo se tuvieron en cuenta las señales vibroacústicas en el eje Y.

3. RESULTADOS

Durante la soldadura por fricción-agitación, la geometría de la herramienta es una de las fundamentales causas de la mezcla y flujo del material. El diseño del pin y el hombro, y las dimensiones relativas de la geometría de éstos, son determinantes [21]. Teniendo en cuenta lo anteriormente planteado, fue verificado que la geometría de la herramienta puede influenciar en el flujo de material durante el proceso de FSW, así como en la señal vibroacústica generada como resultado de los fenómenos físicos que ocurren. Los resultados obtenidos para las condiciones seleccionadas se muestran a continuación.

3.1. DOMINIO DEL TIEMPO DE LA SEÑALES VIBROACÚSTICAS

En la Figura 3 se muestran las señales vibroacústicas correspondientes a condiciones con igual parámetros del proceso ($\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$) y las dos geometrías evaluadas. La Figura 3a se corresponde con los resultados

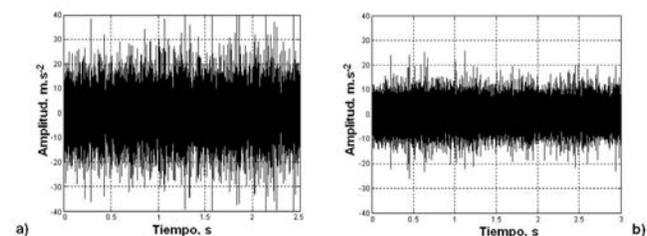


Figura 3: Señales vibroacústicas para las dos geometrías de herramienta ($\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). a) Herramienta 1 y; b) Herramienta 2

del empleo de la herramienta con pin cilíndrico convencional con estrías (Herramienta 1) y la Figura 2b corresponde a la herramienta de pin cilíndrico con ranuras horizontales (Herramienta 2).

Como se aprecia en la Figura 3, el nivel de la señal vibroacústica es mayor para $\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y la Herramienta 1. Las señales vibroacústicas son generadas principalmente por la fricción entre la herramienta y el material y por las deformaciones que sufre el material. Este incremento de los niveles de vibración puede estar asociado a una mayor superficie de contacto entre la herramienta y el material. La Tabla 2 muestra los valores de los parámetros estadísticos de las señales analizadas, y permite observar la incidencia de los cambios de la geometría de la herramienta en los parámetros de las señales vibroacústicas obtenidas durante el proceso.

Condición	RMS	Varianza
Herramienta 1	6.35	40.34
Herramienta 2	4.01	16.11

Tabla 2: Caracterización estadística de las señales vibroacústicas para $\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

En el caso de la herramienta con pin cilíndrico con ranuras horizontales, gran parte del flujo de material tiene lugar por simple extrusión, y al parecer el material no tiene movimiento vertical, que es aparentemente necesario para estabilizar la zona rotacional y brindar la deformación del material suficiente para obtener una soldadura de alta calidad. La presencia de las estrías en la Herramienta 1, mejora el flujo vertical y el mezclado, provocando un incremento en los niveles de la señal vibroacústica, como se aprecia en la Figura 3.

3.2. ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA

Considerando la naturaleza compleja de las señales vibroacústicas generadas por el proceso de soldadura, el uso únicamente de parámetros temporales y de amplitud de estas señales puede ser en ocasiones insuficiente para distinguir la estabilidad del proceso [20]. El presente estudio considera la incorporación del diagrama tiempo-frecuencia a fin de obtener la información suplementaria del comportamiento estable o no del proceso en el dominio de la frecuencia.

La Figura 4 muestra el diagrama tiempo-frecuencia obtenido para las dos condiciones representativas evaluadas a lo largo del estudio ($\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y las dos geometrías de herramienta). Como se muestra en las Figuras 4a y 4b, las señales generadas presentaron un espectro de potencia uniforme durante todo el proceso de soldadura. Las regiones oscuras en la Figura indican mayor intensidad del espectro de potencia. La región existente entre las bandas de frecuencia de 9-15 kHz, denotan una mayor intensidad de la señal vibroacústica en este rango de frecuencias.

Los diagramas tiempo-frecuencia mostrados en la Figura 4 son además válidos para evaluar la estabilidad del

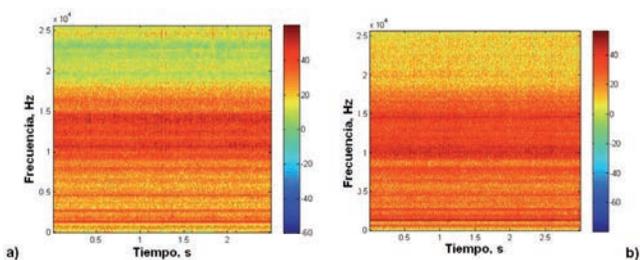


Figura 4: Diagrama Tiempo-frecuencia para $\omega = 450$ rpm y $v = 100$ mm·min⁻¹. a) Herramienta 1; b) Herramienta 2

proceso en situaciones en las que aparecen irregularidades y/o discontinuidades.

3.3. ANÁLISIS MACROESTRUCTURAL DE LA UNIÓN

Las Figuras 5a y 5b muestran la sección transversal perpendicular a la dirección de soldadura y las uniones soldadas obtenidas para las condiciones mostradas en las Figuras 3 y 4 con $\omega = 450$ rpm, $v = 100$ mm·min⁻¹ y diferentes geometrías de la herramienta: pin cilíndrico con estrías (Figura 5a) y pin cilíndrico con ranuras horizontales (Figura 5b).

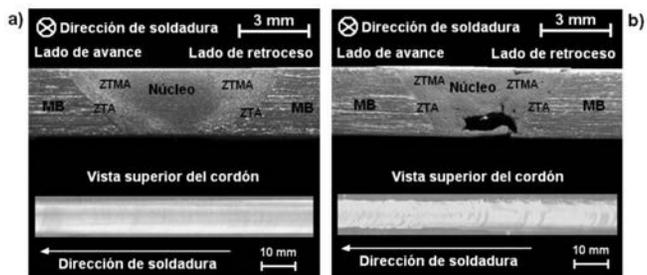


Figura 5: Macrografía para dos geometrías de herramienta ($\omega = 450$ rpm y $v = 100$ mm·min⁻¹). a) Herramienta 1 y b) Herramienta 2

En las Figuras 5a y 5b pueden apreciarse varias zonas de la soldadura, tales como: el núcleo, la zona termo-mecánicamente afectada (ZTMA) y la zona térmicamente afectada (ZTA). Como se observa en la Figura 5, la geometría de la herramienta juega un papel importante y define la calidad de las uniones. La imagen macro de la zona de soldadura presentada en la Figura 5a muestra una soldadura libre de defectos y con continuidad macroestructural.

Para las herramientas utilizadas, el flujo de metal mezclado alrededor del pin está caracterizado por la extrusión de la mezcla, arrastrada desde el frente del pin, y movido a través del espacio entre la superficie del pin y el metal base hacia la parte posterior de la herramienta. La Figura 5a muestra cómo la unión obtenida empleando el pin cilíndrico con estrías se encuentra libre de defectos. Por otra parte, la junta obtenida empleando el pin cilíndrico con ranuras horizontales (Figura 5b) contiene defectos tipo túnel y una superficie de la unión irregular, causados éstos por un inadecuado flujo de metal y esencialmente por insuficiente generación de calor. Estos

factores conducen a una reducción del volumen de material que la herramienta puede remover durante el ciclo de rotación y traslación, y por tanto la imposibilidad de llenar la cavidad de soldadura detrás de la herramienta, deteriorando la calidad de la soldadura y las propiedades mecánicas de la unión soldada.

Mediciones de temperatura realizadas durante la realización de los ensayos han permitido observar una menor temperatura para la condición $\omega = 450$ rpm y $v = 100$ mm·min⁻¹ y Herramienta 2, en comparación con la condición de $\omega = 450$ rpm, $v = 100$ mm·min⁻¹ y Herramienta 1. La aparición del defecto túnel en la condición mostrada en la Figura 5b puede ser explicada teniendo en cuenta que la temperatura del material tiene una relación estrecha con la resistencia y flujo del mismo alrededor del pin. En esta condición, el precalentamiento o el uso de una fuente de calor externa puede ayudar al flujo de material e incrementar la calidad del proceso.

3.4. ANÁLISIS DE FRECUENCIA

La Figura 6 muestra los espectros de frecuencia correspondientes a las señales vibroacústicas obtenidas para las condiciones analizadas y las señales temporales mostradas en la Figura 3.

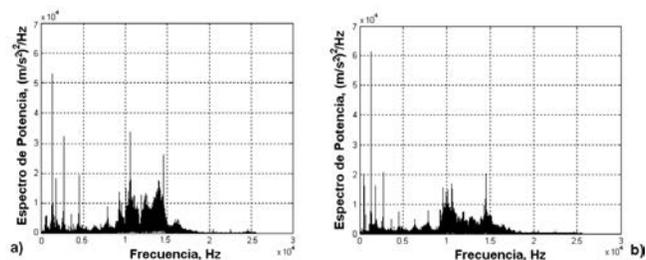


Figura 6: Espectro para dos geometrías de herramienta. ($\omega = 450$ rpm y $v = 100$ mm·min⁻¹) a) Herramienta 1; b) Herramienta 2

En la Figura 6, se muestra el espectro de frecuencia para las dos geometrías de herramienta. En el rango de frecuencia de los espectros entre 12 – 16 kHz (Figuras 6a y 6b), se comprueba que existe información importante relacionada con los parámetros del proceso. Se verifica también que la amplitud en esta banda de frecuencia para $\omega = 450$ rpm, $v = 100$ mm·min⁻¹ y herramienta con pin cilíndrico convencional con estrías (Figura 6a) es mayor que la obtenida para la condición con la herramienta convencional con el diseño de pin con ranuras horizontales, (Figura 6b). Este resultado puede estar asociado a un incremento en la superficie de contacto entre la herramienta y el material, lo que causa mayor fricción entre el material y la herramienta durante el flujo de material deformado.

La observación anterior coincide con los estudios realizados por Suresha *et al.* [16], donde afirman que en el rango de frecuencias de 1 kHz a 2 MHz o frecuencias superiores de las señales de EA, es posible extraer información relativa al proceso. Los autores establecen que el límite inferior de

frecuencia (1 kHz) se impone por el ruido de fondo debido a la fricción, impactos externos o procesos generadores de señales que tienden a enmascarar los datos que puede brindar la señal de EA. En otros trabajos desarrollados por Vijay y Murugan [12], es aplicado un filtro paso bajo a la señal de EA a fin de eliminar las frecuencias inferiores a los 80 kHz. En este caso, la información del proceso es obtenida principalmente en el rango de frecuencia de 100 – 170 kHz. Las bajas frecuencias asociadas a la rotación de la herramienta no son analizadas por los autores.

Considerando el análisis de frecuencias de las señales de EA obtenidas, se evidencia la existencia de variaciones en el espectro en las frecuencias inferiores a 1 kHz. En este trabajo se extrajo información de las bajas frecuencias (< 1 kHz) a fin de obtener la correlación entre la señal vibroacústica en ese rango de frecuencia y los cambios en la geometría de la herramienta. El análisis de las bajas frecuencias también fue realizado por Burford *et al.* [17], y demostraron la factibilidad de extraer información, en este caso de señales de fuerza de la herramienta en frecuencias asociadas a la velocidad de rotación, y su relación con la aparición de defectos en la unión soldada.

Teniendo en cuenta que la FFT no puede describir adecuadamente las características de la señal de EA a bajas frecuencias [19], se decidió el empleo de otras técnicas de procesamiento de señales que son factibles para estos fines. Por ello, en este trabajo se ha empleado la transformada wavelet para obtener una serie de señales vibroacústicas descompuestas en rangos de frecuencia de interés.

3.5. TRANSFORMADA WAVELET

El resultado de la DWT es una serie de señales descompuestas pertenecientes a diferentes bandas de frecuencia. Las gráficas de las Figuras 7a y 7b muestran las transformadas wavelet de las señales vibroacústicas para las Condiciones 11 y 17 respectivamente. En este caso, la descomposición DWT es aplicada empleando 8 niveles y una wavelet madre *Daubechies (Db5)*.

La señal A8 (Figuras 7a y 7b) puede ser considerada como el resultado de realizar un filtrado paso bajo a la señal vibroacústica, con un ancho de banda resultante [0, 100 Hz]. D1-D8 corresponden a las bandas de frecuencia [100, 200 Hz], [200, 400 Hz], [400, 800 Hz], [800 Hz, 1.6 kHz], [1.6, 3.2 kHz], [3.2, 6.4 kHz], [6.4, 12.8 kHz], y [12.8, 25.6 kHz], respectivamente.

Las descomposiciones D2, D3, D4, y D5 mostraron un comportamiento similar para los dos tipos de herramienta analizadas. Comparando la descomposición D8 para las dos condiciones estudiadas, puede apreciarse una diferencia de las señales en la banda de frecuencia [12.8, 25.6 kHz]. Este resultado coincide con los análisis obtenidos de los espectros, mostrados en la Figura 6.

La Figura 8 muestra la aproximación A8 para ambas condiciones correspondientes a las dos geometrías de herramienta analizadas.

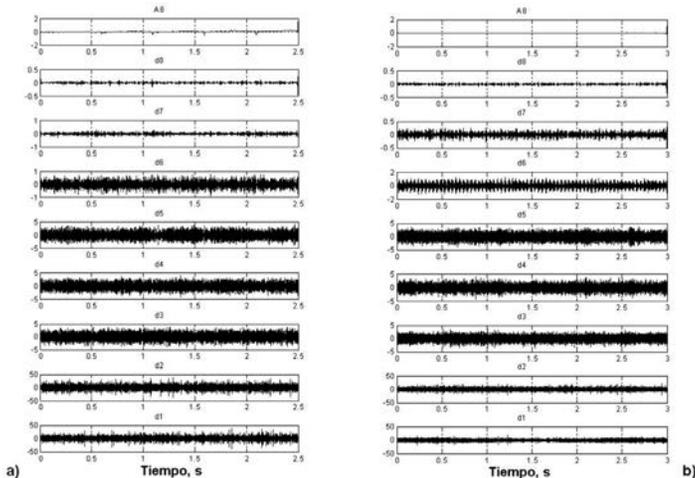


Figura 7: Transformada wavelet para las dos geometrías de herramientas ($\omega = 450 \text{ rpm}$ y $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). a) Herramienta 1; b) Herramienta 2

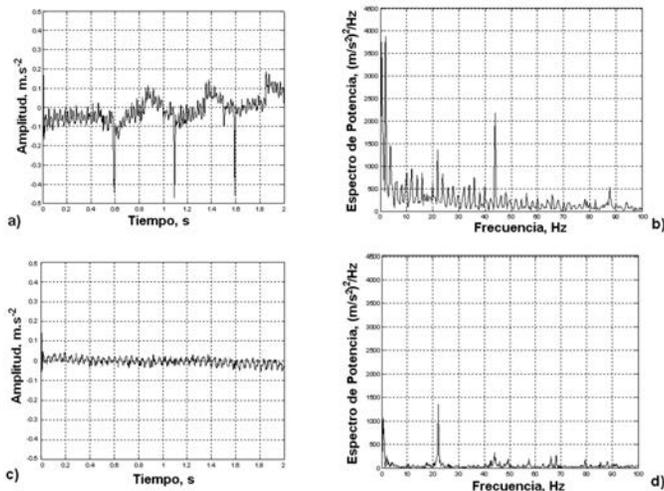


Figura 8: Aproximación A8 para las dos geometrías de herramienta ($\omega = 450 \text{ rpm}$ y $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$). a-b) Herramienta 1; c-d) Herramienta 2

El análisis de las aproximaciones A8 presentadas en las Figuras 8a y 8b (con un ancho de banda [0, 100 Hz]) muestra la visible diferencia a bajas frecuencias entre las señales de las diferentes geometrías de la herramienta.

Con el objetivo de comparar los dos tipos de geometría de herramienta y correlacionarlas con las señales vibroacústicas a bajas frecuencias, han sido extraídas algunas características de las señales, como se muestra en la Tabla 3. La raíz media cuadrática (RMS) y la varianza han sido los parámetros estadísticos que han representado los cambios en las señales extraídas de la DWT.

La aproximación A8 en la Figura 8b ($\omega = 450 \text{ rpm}$, $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ y herramienta con pin cilíndrico convencional

Condición	RMS	Varianza
Herramienta 1	0.09	0.009
Herramienta 2	0.03	0.0008

Tabla 3: Caracterización de la DWT A8 de las señales vibroacústicas para $\omega = 450 \text{ rpm}$ y $v = 100 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

nal con estrías) muestra más componentes de frecuencia que la obtenida en el ensayo con herramienta con pin cilíndrico con ranuras horizontales. Basado en el análisis estadístico, se confirma que la geometría de la herramienta afecta significativamente a las señales estudiadas a baja frecuencia (A8). Este resultado puede estar asociado a la presencia de las tres estrías en la Herramienta 1. Esta característica de la herramienta incrementa la resistencia ofrecida por el movimiento del pin a través de la pieza.

Una evaluación de la incidencia de los cambios de los parámetros de FSW en las señales vibroacústicas, calidad de la soldadura y propiedades mecánicas de la unión, será realizada en sucesivos trabajos como línea de continuación de éste.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación analiza la incidencia de la geometría de la herramienta sobre las señales vibroacústicas generadas durante el proceso FSW de la aleación de aluminio AA1050 H24. De los análisis realizados se concluye que:

- Las características de las señales vibroacústicas en el rango de frecuencias de 0-100Hz, contiene información válida para evaluar cambios en la geometría de la herramienta durante la soldadura por fricción-agitación.
- Las señales vibroacústicas pueden ser aplicadas como un método efectivo para la monitorización on-line de cambios de la geometría de la herramienta.
- Fueron obtenidas uniones libres de defectos tipo túnel, para la herramienta que incorpora un pin cilíndrico convencional con estrías, según fue corroborado en los análisis macroestructurales realizados a todas las probetas.
- Las técnicas de análisis basadas en la transformada wavelet constituyen una herramienta que puede ser empleada eficientemente en la evaluación de cambios en la geometría de la herramienta.

5. AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido apoyado parcialmente por el proyecto del Ministerio e Innovación "DPI2011-25007. Soldadura por fricción-agitación de materiales disimilares. Caracterización mediante técnicas de emisión acústica e inteligencia artificial".

6. BIBLIOGRAFÍA

- Threadgill PL. "Terminology in friction stir welding". *Sci. Technol. Weld. Join.* Marzo 2007. Vol.12-4, p.357-360. <http://dx.doi.org/10.1179/174329307X197629>
- Uday MB et al. "Advances in friction welding process: a review". *Sci. Technol. Weld. Join.* Octubre 2010. Vol.15-7, p.534-558. <http://dx.doi.org/10.1179/136217110X12785889550064>
- Aldanondo E et al. "Avances en la tecnología de soldadura por fricción "STIR"". *DYNA Ingeniería e Industria.* Diciembre 2011. Vol. 86-6. p. 614-618.

- Hassan AS et al. "Friction stir welding of dissimilar A319 and A356 aluminium cast alloys". *Sci. Technol. Weld. Join.* Julio 2010. Vol.15-5, p.414-422. <http://dx.doi.org/10.1179/136217110X12720264008358>
- Szkodo M, Adamowski J, Sitko A. "Assessment of FSW Welds Made of Aluminum Alloy AW7075-T651". *Solid State Phenom.* Junio 2010. Vol.165, p.201-206. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.165.201>
- Xunhong W et al. "Comparison of fatigue property between friction stir and TIG welds". *J. Univ. Sci. Technol. Beijing.* Junio 2008. Vol.15-3, p.280-284.
- Cavaliere P, Panella F. "Effect of tool position on the fatigue properties of dissimilar 2024-7075 sheets joined by friction stir welding". *J. of Mater. Proc. Technol.* 2008. Vol. 206, p.249-255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.036>
- Cederqvist L. et al. "Improved process stability during friction stir welding of 5 cm thick copper canisters through shoulder geometry and parameter studies". *Sci. Technol. Weld. Join.* Febrero 2009. Vol.14-2, p.178-184. <http://dx.doi.org/10.1179/136217109X400420>
- Mahmoud E et al. "Effect of friction stir processing tool probe on fabrication of SiC particle reinforced composite on aluminium surface". *Sci. Technol. Weld. Join.* Julio 2009. Vol.14-5, p.413-425. <http://dx.doi.org/10.1179/136217109X406974>
- Hattingh DG et al. "Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool". *J. of Mater. Proc. Technol.* 2008. Vol.203, p.46-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.028>
- Padmanaban G, Balasubramanian V. "Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach". *Mater and Design.* 2009. Vol.30, p.2647-2656. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2008.10.021>
- Vijay SJ, Murugan N. "Influence of tool pin profile on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded Al-10 wt.% TiB2 metal matrix composite". *Mater and Design.* Enero 2010. Vol.31, p.3585-3589. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.018>
- Valdameri T, Emerio JA. "Avaliação da Geometria de Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052". *Soldagem Insp.* Sao Paulo. Jul/Set 2009. Vol.14-3, p.215 - 227.
- Martinez-Conesa E, Miguel-Eguia V, Godinez-Seoane C, et al. "Análisis de la penetración en la soldadura de una estructura metálica". *DYNA Ingeniería e Industria.* Enero 2012. Vol. 87-1. p.90-97
- Rai R et al. "Review: Friction Stir Welding Tools". *Sci. Technol. Weld. Join.* Febrero 2011. Vol.16-4, p.325 - 342. <http://dx.doi.org/10.1179/1362171811Y.0000000023>
- Suresha CN, Rajaprakash BM, Sarala U. "Applicability of acoustic emission in the analysis of friction stir welded joints". *Int. J. of Recent Trends in Eng.* Mayo 2009. Vol.1-5, p.86-89.
- Burford D. et al. "Evaluation of friction stir weld process and properties for aerospace application: e-NDE for friction stir processes". *FAA Joint Advanced Materials & Structures (JAMS).* 6th Annual Technical Review Meeting, May 19-20, 2010, p.1-27.
- Soundararajan V, Atharifar H, Kovacevic R. "Monitoring and processing the acoustic emission signals from the friction-stir-welding process". *Proc.of the Inst. of Mech. Eng.* Marzo 2006. Vol.220-10, Part B. p.1673-1686. <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM586>
- Chen Ch, Kovacevic R, Jandgric D. "Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum". *Int. J. of Mach Tools & Manuf.* Mayo 2003. Vol.43, p.1383-1390. [http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00130-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00130-5)
- Macías EJ et al. "Time-frequency diagram applied to stability analysis in gas metal arc welding based on acoustic emission". *Sci. Technol. Weld. Join.* 2010. Vol.15-3, p.226-232.
- Widener C, Burford D, Jurak S. "Effects of Tool Design and Friction Stir Welding Parameters on Weld Morphology in Aluminum Alloys". *Mat. Sci. Forum.* Enero 2010. Vol.638-642, p.1261-1266. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.1261>