

INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA EN SOLDADURAS DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA7075-T6 OBTENIDAS POR FRICTION STIR WELDING

Juan Esteban Guzmán¹, Santiago Escobar², Elizabeth Hoyos^{3} y Yesid Montoya⁴*

1: Ingeniero mecánico, Universidad EIA. Envigado, Colombia.

2: Ingeniero mecánico, Universidad EIA. Envigado, Colombia.

3: Ingeniera mecánica – PhD ingeniería, Universidad EIA. Envigado, Colombia.

4: Ingeniera mecánica – MSc. ingeniería, Universidad EIA. Envigado, Colombia.

E-mail: elizabeth.hoyos@eia.edu.co

RESUMEN

Friction Stir Welding (FSW) es un proceso de soldadura en estado sólido inventado en 1991 por The Welding Institute (TWI), donde una herramienta giratoria avanza a lo largo de una junta soportada y fijada a una platina de respaldo, generando continuidad entre las partes. En las aplicaciones principales del proceso se encuentra la unión de materiales de baja soldabilidad, aquellos donde resulta complejo obtener soldaduras sanas empleando procesos convencionales de soldadura por fusión, como es el caso de las aleaciones de aluminio de las series 2XXX y 7XXX.

La sanidad de las soldaduras puede evaluarse empleando Ensayos Destructivos (ED) y No Destructivos (END) convencionales, estos últimos resultan una alternativa interesante al mantener la integridad de las juntas, resaltando la inspección visual y los líquidos penetrantes, por su facilidad de uso. El objetivo de este trabajo es evaluar la aplicabilidad de los END convencionales en el proceso de FSW pensando en inspección local y de bajo costo.

Para el presente desarrollo se obtuvieron soldaduras de la aleación de aluminio AA7075-T6 haciendo uso de una fresadora universal FEXAC UG adaptada para el proceso, empleando un dispositivo instrumentado para la medición de fuerzas. Buscando identificar y localizar las discontinuidades presentes en las juntas se emplearon múltiples END: ultrasonido, con un equipo Olympus EPOCH 4, radiografía, con un equipo Dandong XXG-2005 y líquidos penetrantes Spotcheck®; además de inspección visual para corroborar la funcionalidad de ésta última y su correspondencia con los demás resultados.

Se evaluó la sanidad de las juntas usando los métodos convencionales listados previamente y criterios de aceptación basados en las normas existentes. Se observaron discontinuidades tipo túnel en las radiografías, las indicaciones de los líquidos penetrantes asociadas a falta de penetración del pin y las lecturas ultrasónicas por fuera del umbral establecido. Se concluye que es posible hacer uso de END convencionales teniendo en cuenta que la capacidad de detección está limitada por la naturaleza de cada ensayo, tamaño y posición de la discontinuidad y las características de los equipos empleados.

Palabras Clave: Ensayos no destructivos, Friction Stir Welding, AA7075-T6.

NON-DESTRUCTIVE INSPECTION ON AA7075-T6 ALUMINUM ALLOY WELDS OBTAINED BY FRICTION STIR WELDING

ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state welding process invented in 1991 by The Welding Institute (TWI), in which a rotating tool advances through a joint of material over a backing plate, generating continuity between parts. Among the main applications is the joining of low weldability materials, those in which is complex to achieve sound welds using conventional fusion welding methods such as the 2XXX and 7XXX aluminum alloys series. Weld joint soundness can be evaluated employing Destructive (DT) and conventional Nondestructive Tests (NDT), the last ones are an interesting choice that maintain the integrity of the welded joint, highlighting visual and dye penetrant testing for their easy application. The aim of this work is to evaluate the applicability of conventional NDS in the FSW process thinking about local and low cost inspection.

In this work, welds of the aluminum alloy AA7075-T6 were obtained using a conventional milling machine FEXAC UG adapted for the process and a force-measuring device. For the identification and location of discontinuities diverse Non-Destructive Tests (NTD): ultrasound indications were obtained with an Olympus EPOCH 4 detector, radiography with a Dandong XXG-2005 radiation source and for the dye penetrant inspection Spotcheck® products were used in addition to visual inspection to corroborate the functionality of the latter and its correspondence with other results.

Weld joints soundness was evaluated using the previously listed conventional NDT and acceptance criteria based on existing codes. Tunnel type discontinuities were observed in the radiographies, flaws detected with the dye penetrant associated to the lack of pin penetration and ultrasound indications above the established threshold. It is concluded that conventional NDT can be used according to each test particular limitations, size and position of discontinuities and equipment characteristics.

Keywords: Non-Destructive Test, Friction Stir Welding, AA7075-T6.

1. INTRODUCCIÓN

Friction Stir Welding (FSW), es un proceso de unión en estado sólido desarrollado por TWI (The Welding Institute), derivado de los procesos convencionales de soldadura por fricción [1]. El tiempo entre su invención en 1991 y sus aplicaciones a nivel industrial, a mediados de esa misma década, lo convierten en uno de los procesos nuevos de soldadura más rápidamente aceptados. Éste presenta múltiples ventajas frente a otros medios, tales como evitar cambios de estado en el material, alta eficiencia, bajos niveles de contaminación, baja distorsión y esfuerzos residuales, entre otros. Estas ventajas hacen que el proceso FSW sea utilizado en la fabricación de componentes y paneles de aluminio necesarios para la industria naval, aeroespacial, ferroviaria, automovilística entre otras [2]. Aunque la calidad potencial de los cordones es adecuada para las aplicaciones mencionadas, algunas discontinuidades pueden presentarse, asociadas a las variaciones en los parámetros del proceso [3], es por esto que los parámetros deben ser adaptados y optimizados en la práctica dependiendo del tipo de junta, material a soldar y equipo usado. Para la identificación de discontinuidades es importante reconocer que la geometría, la localización y

la naturaleza microestructural no corresponden con las discontinuidades típicas en soldadura por fusión de aleaciones de aluminio, lo cual conduce a dificultades en su identificación. El uso de Ensayos No Destructivos (END) es una aproximación estándar, económica y relativamente sencilla de utilizar respecto a los ensayos destructivos (ED) para la identificación de discontinuidades; donde cada uno de los métodos primeros cuenta con diferentes capacidades de detección. En el documento se describen las condiciones empleadas para la obtención de juntas soldadas de la aleación de aluminio AA7075-T6, así como los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos empleados con el propósito de identificar cuál o cuáles ENDS son los más adecuados para una evaluación de soldaduras obtenidas por FSW.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1. Obtención de juntas soldadas

Las dimensiones de las placas de AA7075-T6 empleadas son: 150 x 50 mm y 3/16" de espesor; estas son fijadas con utillaje sobre un dispositivo de medición de fuerzas verticales situado en la bancada de una fresadora universal FEXAC UG como se muestra en la sección izquierda de la Figura 1, empleando un ángulo de 2° entre el eje vertical y la herramienta. Finalmente, se ejecuta el proceso de soldadura para diferentes combinaciones de velocidad angular y lineal como se observa en la Tabla 1, y una distancia entre la platina de respaldo y la punta del pin de 0.12 mm; usando para todos los casos una herramienta de hombro cóncavo y pin cónico roscado.

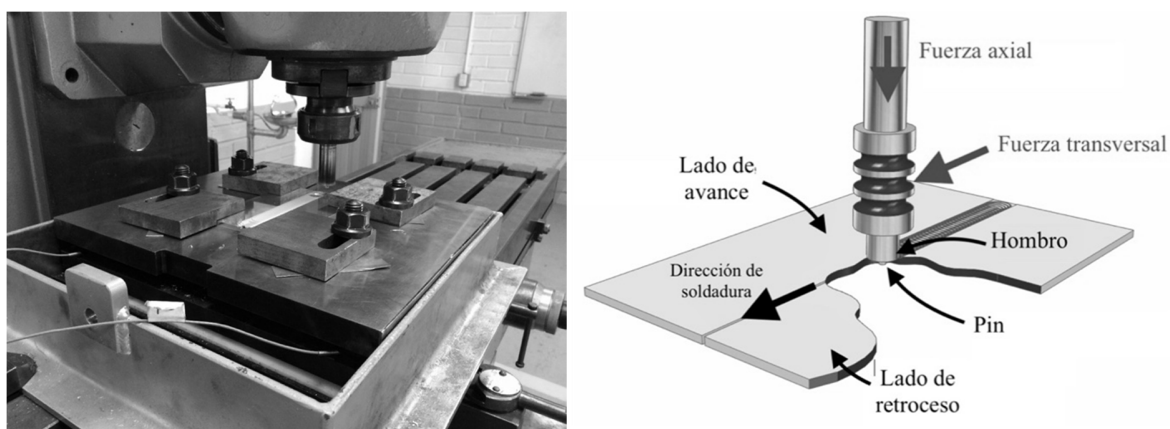


Figura 1. Montaje adaptado para la obtención de juntas soldadas por FSW con medición de fuerza vertical y esquemático de proceso.

Tabla 1. Combinaciones de parámetros.

Velocidad de rotación (RPM)	Velocidad de avance (mm/min)				
	45	65	90	127	187
1400	13	23	10	19	7
1085	5	25	2	17	11
840	16	6	21	14	4
650	1	20	12	8	24
500	15	9	22	3	18

En la Tabla 1 se presentan números del 1 al 25 que corresponden al orden de obtención de las juntas para así garantizar que las variables no controlables como la temperatura afecten de manera aleatoria a las muestras y permitir resultados estadísticamente más confiables.

2.2. Criterios de aceptación

Para la evaluación de cada una de las soldaduras por inspección visual (IV), líquidos penetrantes (LP), ultrasonido (UT) y rayos X (RX); se construyó la Tabla 2 donde se ilustran los criterios de aceptación de la norma AWS D17.3 [5], el estándar ISO 25239-5 [6] y los empleados en este trabajo para la evaluación de los mismos, siendo estos últimos más estrictos que las normas para FSW.

Tabla 2. Criterios de aceptación.

Discontinuidad	Criterio de aceptación		
	AWS D17.3	ISO 25239-5	Adaptados
Grieta	Ninguna	No reportado	Ninguna
Penetración incompleta	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Cavidad abierta en la superficie	Ninguna	No reportado	Ninguna
Cavidad interna	Ninguna	$d \leq 0,2s$ o 4mm, lo que sea menor**	Ninguna
Rebaba	Aceptable*	No reportado	Ninguna

*Se acepta si se puede remover conservando la funcionalidad de la junta

**d equivale a la dimensión más grande de la discontinuidad y s al espesor nominal de la junta.

2.3. Inspección visual (IV)

Para la evaluación de las soldaduras por IV, se realizaron tomas fotográficas del frente y envez de las soldaduras, en las cuales se evaluaron la cantidad de rebaba, existencia de grietas y demás discontinuidades que se observan en la Tabla 2. Siendo cada junta vista por los autores y evaluadas en conjunto para observar coincidencias en los resultados obtenidos.

2.4. Líquidos penetrantes (LP)

En la Figura 2 se presenta un esquemático de penetración incompleta que puede resultar difícil de identificar empleando IV debido lo reducido de su tamaño, en algunos casos. Teniendo esto en cuenta, el lado posterior de las soldaduras se preparó para ser rociado con el penetrante coloreado, el cual, para garantizar su absorción, se dejó sobre la superficie durante 15 minutos de acuerdo con lo estipulado por la norma ASTM E165-95 [7] y por el fabricante Spotcheck® [8]; luego el exceso fue removido para permitir la aplicación del revelador, manteniendo una distancia de aproximadamente 25 cm respecto a la pieza y a una velocidad homogénea. Después de 10 minutos el resultado fue fotografiado y analizado.

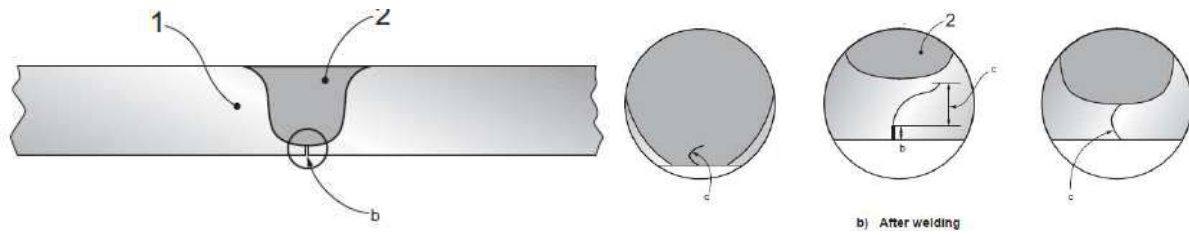


Figura 2. Penetración incompleta [6].

2.5. Ultrasonido (UT)

Éste ensayo fue ejecutado con un equipo EPOCH 4 mediante la técnica por reflexión (pulso-eco) con un palpador angular de 70° a 5 MHz, que actúa como emisor y receptor de energía ultrasónica para hacer un barrido tipo A, como se muestra en la Figura 3. Esto proporciona un gráfico que indica la posición de la discontinuidad a lo largo del espesor de la soldadura; además, de acuerdo a la amplitud de la señal graficada, se puede determinar cualitativamente la severidad de la discontinuidad, para lo cual es necesario construir durante la calibración, una curva de distancia amplitud (DAC por sus siglas en inglés) que actúe como criterio de aceptación y permita clasificar las discontinuidades [10].

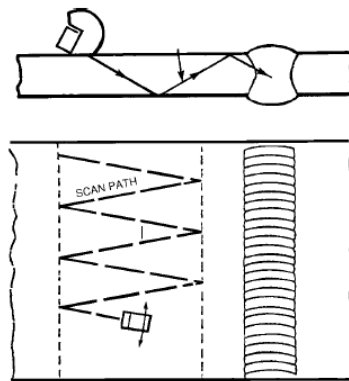


Figura 3. Técnica de inspección de soldaduras a tope con haz angular (ASTM International, 1994).

2.6. Rayos X (RX)

Las placas fueron radiadas haciendo uso de un equipo emisor de rayos X de referencia Dandong XXG-2005 mediante la técnica de pared simple, procurando conservar las mismas condiciones de exposición. Estos ensayos son ejecutados con base en la norma ASTM E1742 [9] y los parámetros usados se observan la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de RX.

Condiciones de exposición	Características
Tamaño focal	2.5 X 2.5 mm
Distancia de la fuente	30 cm
Energía	148 kV
Tiempo de exposición	1 mA · min
Procesamiento	Características
Tiempo revelado	4 min
Tiempo fijado	8 min

3. RESULTADOS

Todos los END fueron ejecutados en cada una de las juntas, pero con el propósito de presentación de resultados se escogieron 4 de ellas.

Las soldaduras 1, 2, 3 y 4 mostradas en la Figura 4 corresponden a 4 cordones de AA7075-T6 obtenidos con diferentes combinaciones de parámetros. A la luz de la IV, y teniendo en cuenta los parámetros estipulados en la especificación AWS D17.3 [5], puede concluirse que los cordones número 1 y 2 cumplen todos los requisitos para ser aceptados incluso dentro de la clasificación de juntas con la mayor prestación, mientras que los cordones número 3 y 4 deberían ser rechazados debido a que el 3 presenta rebaba en exceso, que puede ser resultado de entrada de calor excesiva, y el 4 exhibe lo que podría ser un defecto llamado remanente de línea de junta, que consiste en una extensión, desde la raíz hasta la superficie, de la línea de partición que conforman las dos placas antes de ser soldadas [11].

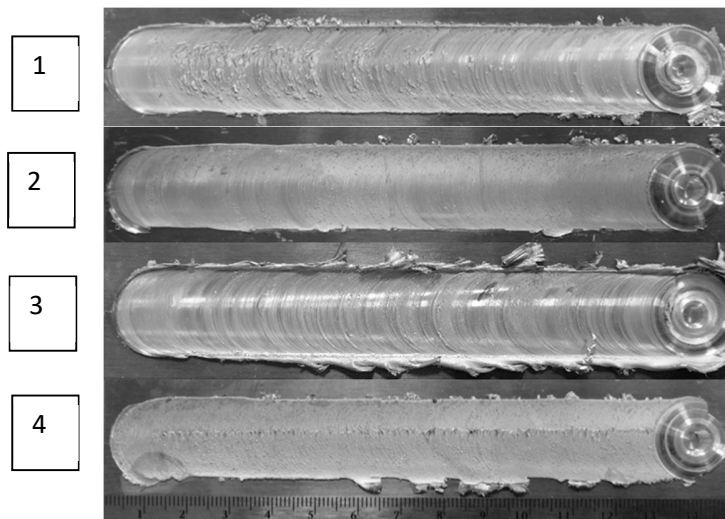


Figura 4. Cordones de soldadura obtenidos mediante FSW. De arriba abajo 90 mm/min – 1085 RPM, 127 mm/min – 1400 RPM, 45 mm/min – 1085 RPM y 187 mm/min – 1400 RPM.

Adicionalmente, las dos últimas soldaduras exhiben una cavidad abierta en el agujero de salida de la herramienta como se muestra en la Figura 5, no obstante, dado que se asumirá que esta sección de la soldadura será removida después del procesamiento, esta discontinuidad no es causal de rechazo.

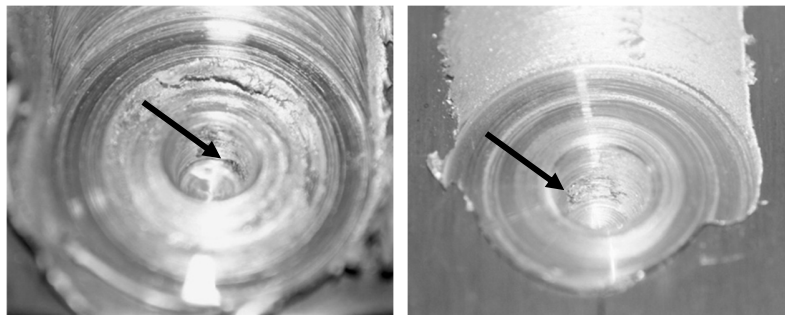


Figura 5. Cavidad abierta en agujeros de salida de herramienta en las soldaduras 3 y 4, respectivamente.

Los resultados de líquidos penetrantes, mostrados en la Figura 6, permiten concluir que en los 4 casos existe una falta de penetración que no es apreciable como discontinuidad la IV, esto debido a que la magnitud de dicha discontinuidad se encuentra por fuera de los rangos detectables por el ojo humano como es de esperarse. Considerando que la entrada del pin se hace por la izquierda de la figura, en las soldaduras 1, 3 y 4 este efecto puede estar relacionado con la apertura inicial en la etapa de penetración, ya que el líquido se acumula principalmente al comienzo del cordón.

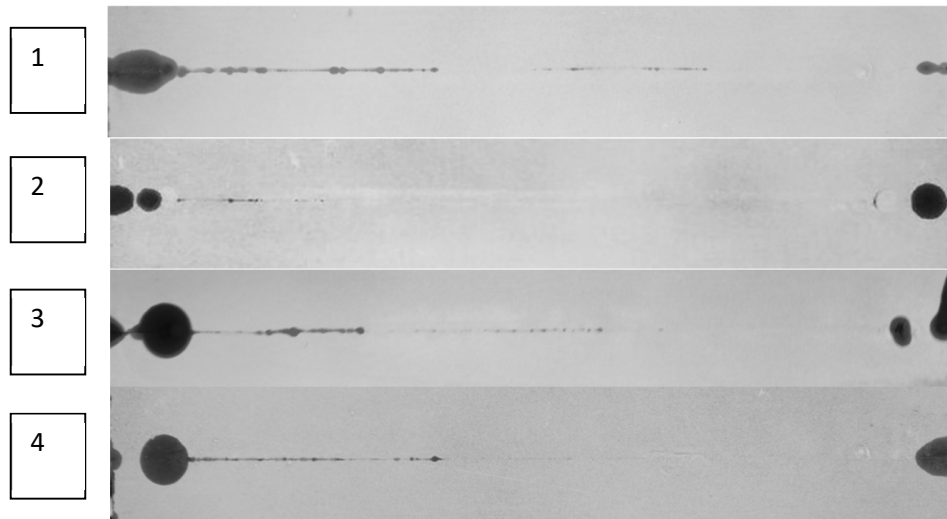


Figura 6. Indicaciones de LP sobre cordones de soldadura obtenidos mediante FSW De arriba abajo 90 mm/min – 1085 RPM, 127 mm/min – 1400 RPM, 45 mm/min – 1085 RPM y 187 mm/min – 1400 RPM.

Al momento de evaluar los resultados de LP, se decidió cortar algunas muestras y evaluar el tamaño de las grietas que se observaron. Es por esto que en la Figura 7 se presentan los resultados de la metalografía realizada sobre la sección transversal de una de las soldaduras obtenidas, en la cual es posible observar una discontinuidad identificada mediante LP, presentando características similares a las descritas por la Figura 2 relacionadas con penetración incompleta.

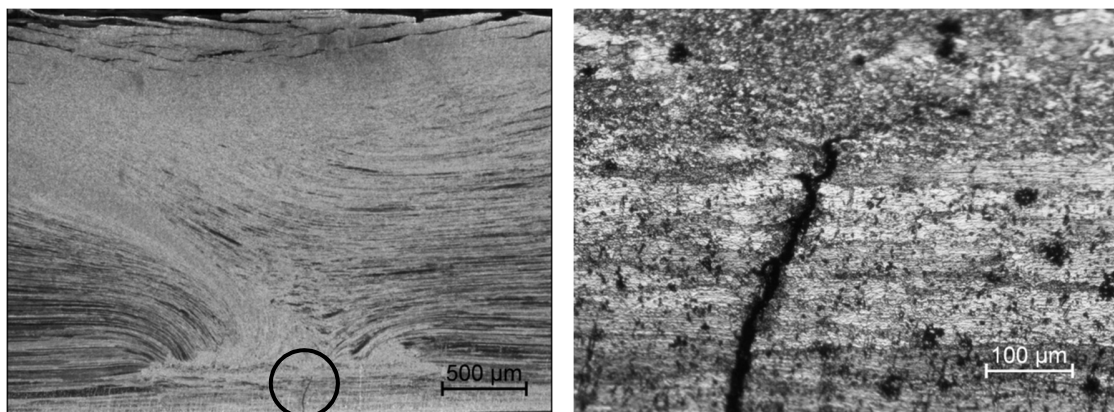


Figura 7. Metalografía de sección transversal de soldadura de AA7075-T6 obtenida mediante FSW. Penetración incompleta.

En la sección izquierda de la Figura 8 se observan las indicaciones resultantes del ensayo de UT, donde cada número corresponde a una señal en ese punto del cordón que superó el límite permitido de la curva DAC, 50% en este caso. Las líneas punteadas indican que existe una discontinuidad a lo largo del rango formado por los dos extremos que las unen. Mientras que en la sección derecha de la Figura 8 se muestra la señal obtenida en el punto 3 del lado inferior de la soldadura 1, donde se observa una discontinuidad que no cumple el criterio de aceptación, con una ubicación transversal de 1.26 mm desde la base.

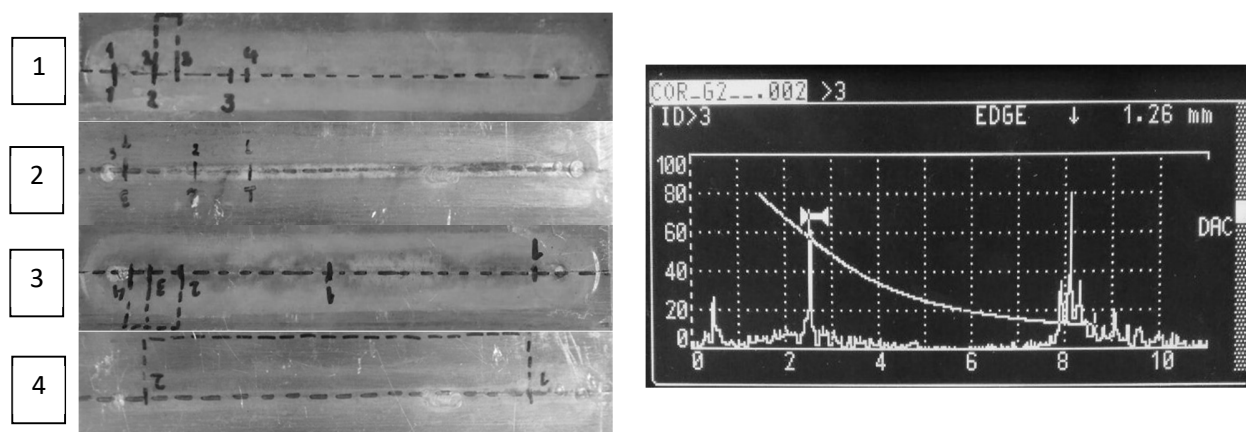


Figura 8. Indicaciones de UT sobre cordones de soldadura obtenidos mediante FSW.

En la Figura 9 se presentan los resultados de radiografía para las juntas presentadas anteriormente, entre aquellas aprobadas inicialmente por IV, la número 1 aparece libre de discontinuidades, a excepción de una luz al inicio del cordón (de izquierda a derecha), debida a una ligera apertura de las placas durante la penetración; dicha discontinuidad puede ser retirada posteriormente por encontrarse en un extremo, mientras que la soldadura número 2 presenta una discontinuidad tipo túnel a lo largo de todo el cordón [11]. Por otro lado, la número 3, inicialmente señalada por sus niveles de excesivos de rebaba, según IV, es una soldadura con una única indicación de discontinuidad al comienzo del cordón. En el caso 4 se observa un túnel aún más severo que en el del número 2.

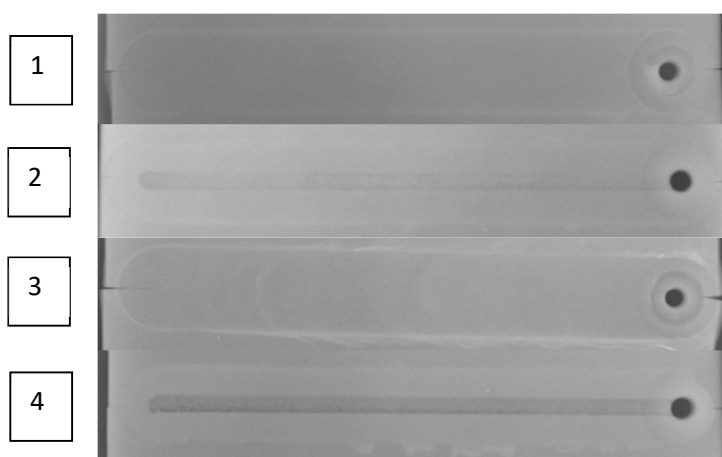


Figura 9. Radiografías de cordones de soldadura obtenidos mediante FSW. De arriba abajo 90 mm/min – 1085 RPM, 127 mm/min – 1400 RPM, 45 mm/min – 1085 RPM y 187 mm/min – 1400 RPM.

A la luz de los resultados de las radiografías, no se encuentra una relación clara entre las indicaciones de los últimos dos ensayos con excepción del caso 4, cuya discontinuidad tipo túnel fue identificada a lo largo del cordón tanto por el UT como por los RX. Teniendo en cuenta que END convencionales, como lo son UT y RX, no tienen la capacidad de detectar discontinuidades de raíz en soldaduras por FSW cuya profundidad sea menor a 200 μm [12]. Finalmente, la Tabla 4 resume el resultado de aprobación o rechazo por parte de cada ensayo no destructivo realizado sobre cada una de las 4 soldaduras seleccionadas.

Tabla 4. Resultado de END sobre las soldaduras estudiadas.

Soldadura	Inspección visual	Rayos X	Ultrasonido	Líquidos penetrantes
1	Aprobada	Aprobada	Rechazada	Rechazada
2	Aprobada	Rechazada	Rechazada	Rechazada
3	Rechazada	Aprobada	Rechazada	Rechazada
4	Rechazada	Rechazada	Rechazada	Rechazada

4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta que la inspección visual no proporciona información suficiente para determinar la sanidad de una junta soldada, aunque se emplea como un primer filtro, es necesario emplear ensayos complementarios que entreguen información sobre el interior del componente, se requiere entonces una combinación adecuada de ensayos no destructivos. Los resultados obtenidos, y la literatura básica de END, indican como adecuado el uso de los ensayos que proveen información de superficie: IV y LP, combinado con alguno de los métodos volumétricos (RX o UT). En el caso específico de FSW y haciendo uso de las diferentes capacidades de detección, los LP permiten descartar la presencia de discontinuidades comunes en la raíz y cavidades abiertas de forma más confiable que la IV.

Aunque las radiografías aportan información más fácil de interpretar respecto a ultrasonido sobre el estado interno de la soldadura, es posible que uno de los métodos detecte una discontinuidad que el otro no es capaz, ya sea por su principio de funcionamiento y el equipo usado, por lo que en los casos en los que resulte posible, como en el entorno académico para la generación de mapas de proceso, se recomienda emplear ambos.

Se concluye que es posible valorar la sanidad de las juntas usando métodos convencionales de END, complementarios entre sí, y siempre con criterios de aceptación claros y basados en las normas existentes. La noción de aceptación o rechazo planteada en los resultados para cada una de las cuatro combinaciones evaluadas fue posible en parte gracias al tamaño de las discontinuidades encontradas y a los umbrales planteados en los criterios descritos, pero es importante reconocer que, como se mencionó en los resultados, la capacidad de detección está limitada por la naturaleza de cada ensayo y las características de los equipos empleados y que si se llegaran a presentar discontinuidades de menor tamaño es posible que escapen a la detección. Lo anterior se confirma con la existencia de END especialmente adaptados para FSW que se reportan en la literatura especializada. Trabajo adicional para relacionar la totalidad de las combinaciones de parámetros ensayadas con la presencia de discontinuidades se encuentra aún en proceso, y se considera un avance en el desarrollo de mapas de procesamiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Semillero de Soldadura del grupo MAPA de la Universidad EIA por todo el apoyo entregado y a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por prestar amablemente su infraestructura y talento humano.

6. REFERENCIAS

- [1] R. Nandan, T. DebRoy, and H. K. D. H. Bhadeshia, "Progress in Materials Science," in recent advances in friction-stir welding - Process weldment structure and properties, 2008, pp. 980–1023.
- [2] S. W. Kallee, Industrial applications of friction stir welding. Elsevier, 2010.
- [3] T. G. Santos, P. Vilaca, and L. Quintino, "Developments in NDT Focusing Defects in FSW of Aluminium Alloys," Dem.Ist.Utl.Pt, 2017.
- [4] C. Hayes, "The ABC's of Nondestructive Weld Examination," Weld. J., vol. 76, no. 5, pp. 46–51, 1997.
- [5] American Welding Society, AWS D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications, 1st ed. Miami, FL, 2009.
- [6] 2539-5 ISO, "Friction stir welding — Aluminium — Part 5: Quality and inspection requirements," 2011.
- [7] ASTM International, ASTM E165-95, Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination. West Conshohocken, PA, 2002.
- [8] Spotcheck, "Dye Penetrant Operating Instructions," 2017.
- [9] ASTM International, ASTM E1742, Standard Practice for Radiographic Examination. West Conshohocken, PA, 2012.
- [10] ASTM International, ASTM E164–97, Standard Practice for Ultrasonic Contact Examination of Weldments. West Conshohocken, PA, 1994.
- [11] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, and W. J. P, "Friction stir welding of aluminium alloys," Int. Mater. Rev., vol. 54, no. 2, pp. 49–93, 2009.
- [12] P. Vilaca and T. G. Santos, "Non-Destructive Testing Techniques for Detecting Imperfections in Friction Stir Welds of Aluminium Alloys," Alum. Alloy. Theory Appl., 2011.