



Obtención de juntas disímiles de la aleación de aluminio AA7075 – T6 y polietileno de alta densidad (HDPE) empleando el proceso *Friction Stir Welding* (FSW)

Dissimilar joints of the aluminum alloy AA7075 – T6 and high-density polyethylene (HDPE) obtained by Friction Stir Welding (FSW)

Santiago Escobar-Muñoz^{1a}, Elizabeth Hoyos-Pulgarín^{1b}

¹Escuela de Ingeniería y Ciencias básicas, Universidad EIA, Colombia. Correos electrónicos:
^a santiago.escobar23@eia.edu.co, ^b elizabeth.hoyos@eia.edu.co

Recibido: 19 mayo, 2018. Aceptado: 16 noviembre, 2018. Versión final: 16 febrero, 2019.

Resumen

En este trabajo se empleó el proceso de soldadura en estado sólido Friction Stir Welding (FSW), aprovechando su condición para obtener uniones permanentes sin superar la temperatura de fusión de los materiales involucrados y sin requerir material de aporte. Sus características lo convierten en una buena opción para la obtención de juntas disímiles y específicamente para la combinación AA 7075 – T6 y polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés). Esta aleación es comúnmente empleada en el sector aeroespacial, y es ideal para el proceso FSW, ya que se caracteriza por su baja soldabilidad por métodos tradicionales por fusión, al presentar problemas de susceptibilidad al agrietamiento durante la solidificación. Las uniones polímero-aluminio se presentan como una alternativa para la fabricación de componentes que requieren altas relaciones resistencia–peso.

Para las juntas se empleó material base de 50 x 150 mm y 3/16 in de espesor, una maquina CNC equipada con un dispositivo de medición de fuerzas, axiales y longitudinales, adaptado a la bancada; una herramienta no consumible de acero H13 con hombro convexo de círculos concéntricos, y un pin cilíndrico roscado de 4,5 mm de largo. Los parámetros evaluados estuvieron entre 500 y 2450 rpm de velocidad de giro, y entre 25 y 100 mm/min para la velocidad de avance. Las juntas obtenidas se evaluaron empleando ensayos no destructivos (END) de inspección visual (IV) y líquidos penetrantes (LP). Adicionalmente se empleó corte por chorro de agua y partículas, buscando así el menor nivel de afectación, para obtener probetas y comparar el nivel de continuidad o unión en la sección transversal de las juntas, empleando estereoscopia óptica. Como complemento de las técnicas de inspección, se contrastaron los resultados con datos de fuerza longitudinal y axial y el comportamiento mecánico de algunas juntas.

A partir de los resultados obtenidos por los métodos mencionados se encontró que ante valores intermedios de velocidades de rotación y de avance en el intervalo evaluado, la sección transversal de las soldaduras presenta mayor continuidad y mejores prestaciones. Resalta la combinación de parámetros: soldaduras a 50 mm/min, entre 1150 a 2450 RPM, y la combinación de 75 mm/min y 2450 RPM. La obtención de juntas sanas es prometedora, pero aún está en desarrollo.

Palabras clave: AA7075-T6; Friction Stir Welding; HDPE; soldaduras disímiles.



Abstract

In this work, the solid-state process of Friction Stir Welding (FSW) was employed due to its ability to obtain permanent joints without surpassing the fusion temperatures of the base materials involved and being free of filler material. Its characteristics make it a satisfactory process for bonding dissimilar materials, specifically the aluminum alloy AA7075 – T6 and high-density polyethylene (HDPE). This alloy is commonly used in the aerospace industry and other high – demanding mechanical applications because of its properties, making it ideal for FSW as it presents low weldability by traditional methods like arc welding processes. Aluminum and polymer joints are presented as an alternative for the fabrication of components with high weight resistance ratio.

For the welds, base material plates of 50X150mm and 3/16 in thick, a CNC machine equipped with a longitudinal and radial force measuring device and a non-consumable H13 tool with a concave shoulder and concentric circles with a 4.5 mm threaded pin were used. The parameters selected range from 500 to 2450 RPM and from 25 to 100 mm/min for the spindle and travel speed, respectively. Non-destructive tests (NDT) of visual inspection and dye penetrant were used on the welds to evaluate the quality. Additionally, joints were sectioned and inspected employing optical stereoscopy after obtaining probes by water jet cut, looking for the level of continuity in the region of welding. This information was compared with force data and destructive tests results.

Additionally, water jet cutting was used, seeking the lowest affectation level to obtain sound specimens and compare the level of continuity in the cross-section of the joints, using optical stereoscopy. As a complement to the inspection techniques, the results were compared with longitudinal and axial force data and the mechanical behavior of some joints.

The cross-section of the welds had greater continuity and better performance using the following parameters combinations: 50 mm/min and between 1150 to 2450 RPM and the combination of 75 mm/min and 2450 RPM. Obtaining sound joints is promising but still in development.

Keywords: Friction Stir Welding; dissimilar welds; AA7075-T6; HDPE.

1. Introducción

Friction Stir Welding (FSW) es un proceso de unión en estado sólido desarrollado en 1991 por el Instituto de Soldadura del Reino Unido (*TWI*, por sus siglas en inglés), derivado de los procesos convencionales de soldadura por fricción, y que utiliza una herramienta no consumible para la unión del material deseado [1]. Las múltiples aplicaciones que tiene este proceso en la industria se aprovechan de la baja distorsión de sus juntas y la posibilidad de unir materiales que por métodos convencionales de arco eléctrico resultan muy difíciles, como lo es para los aluminios a consecuencia del óxido superficial, y es ideal en la fabricación de paneles de aluminio para la industria naval, aeroespacial, automovilística, entre otras [2]–[4]. En *FSW* una herramienta rotatoria avanza en dirección perpendicular a su eje de giro, a lo largo de una junta formada por dos placas en contacto y una platina de respaldo que sirve para el confinamiento del material. Un esquema del proceso de soldadura se observa en la figura 1.

Por las características de unión del proceso de *FSW*, en el cual no se alcanzan temperaturas superiores a las de fusión de los materiales [5], no solo se pueden unir materiales similares, sino a su vez también aquellos de

diferentes naturaleza y condiciones de entrega, como aleaciones de aluminio y acero, magnesio, o incluso polímeros; en aras de mejorar las propiedades mecánicas, relaciones resistencia-peso, mayor resistencia a agentes externos a los que se ven expuestos, entre otras [2]. Ya que se puede utilizar la técnica con diversos materiales, se hace interesante evaluar el comportamiento de una junta disímil entre aluminio y polímero, ya que permite valorar una junta con una relación de resistencia de peso alta y poca reacción a ataques químicos.

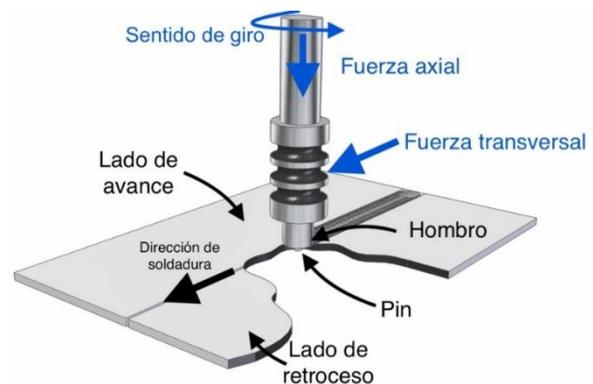


Figura 1. Esquemático del proceso de *FSW*.

A continuación, en la sección de desarrollo del trabajo se exponen los criterios de selección del aluminio y el polietileno, de la herramienta adecuada para el proceso y el grupo de parámetros que se identificaron como adecuados para la obtención de las juntas. Luego se exponen los criterios de evaluación de sanidad usados, entre ellos, ensayos no destructivos de líquidos penetrantes e inspección visual, medición de fuerzas, análisis estereoscópico y pruebas a tracción. Por último, se analizan los resultados alcanzados hasta la fecha en este tipo de juntas disímiles, y se plantean conclusiones y trabajos futuros.

2. Desarrollo del trabajo

2.1. Selección de materiales

La aleación de aluminio seleccionada es la AA7075 – T6, su composición se presenta en la Tabla 1[6]. Con el tratamiento térmico adecuado, esta aleación es ampliamente utilizada en aplicaciones con demandas

mecánicas altas, gracias a su buena relación resistencia- peso reflejadas en las propiedades físicas y mecánicas (Tabla 2). Su soldabilidad es limitada, y emplea métodos de soldadura convencionales por fusión, ya que se puede presentar precipitación, grietas en caliente y porosidad [7].

El polímero empleado es polietileno de alta densidad (HDPE), cuyas propiedades se presentan en la Tabla 3, y es ampliamente utilizado en la industria, por su fácil operación, versatilidad y amplia disponibilidad en el medio local [8]. Ejemplos de las aplicaciones en las que se utiliza comúnmente varían desde recipientes para químicos y reactivos, por su alta estabilidad, pasando por tuberías de conducción de agua y otros productos industriales, ya que no se degrada al contacto con fluidos [9]. Seleccionados los materiales por soldar, se decidió llevar a cabo juntas a tope con placas de aluminio AA7075 - T6 y HDPE, cada una de 50 x 150 mm y 3/16" de espesor, y se hizo así uso del montaje existente.

Tabla 1. Composición química AA7075 - T6 [6].

Elementos de aleación					
	Aluminio (Al)	Zinc (Zn)	Magnesio (Mg)	Cobre (Cu)	Otros
Porcentaje	86,9 a 91,4	5,1 a 6,1	2,1 a 2,9	1,2 a 2	> 4,7

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas AA7075 - T6 [10].

	Propiedad			
	Resistencia última (MPa)	Resistencia a la cedencia (MPa)	Conductividad térmica (W/mK)	Temperatura de fusión (°C)
Valor	572	503	130	635

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas del HDPE [8], [11].

	Propiedad		
	Resistencia a la cedencia (MPa)	Conductividad térmica (W/mK)	Temperatura de fusión (°C)
Valor	25	0,461	129

2.2. Selección de parámetros y herramienta

Para la selección de los parámetros de soldadura se realizó una revisión bibliográfica de trabajos previos que reportan juntas de materiales disímiles similares al polímero y aluminio seleccionados, buscando identificar además geometrías de herramienta similares a la seleccionada, con una configuración de la junta igual y con ángulo de inclinación cercano o igual a 2 grados [2],

[4], [12]–[17]. Con lo cual se construyó la Tabla 4, que presenta un diseño de experimentos factorial 4², para un total de 16 soldaduras sin réplicas, con el orden aleatorio en que se realizaron los cordones, y una configuración de junta a tope con inclinación de herramienta de 2 grados, llevadas a cabo en una máquina de control numérico FIRST - MV1100.

Tabla 4. Diseño de experimentos para la ejecución de soldaduras.

Velocidad de rotación (RPM)	2450	1	7	15	5
	1800	10	14	2	12
	1150	16	3	6	11
	500	8	9	13	4
		25	50	75	100
Velocidad de avance (mm/min)					

La herramienta seleccionada para que cumpla las condiciones adecuadas de longitud de pin y geometría de hombro que se consideraron propicias para el ángulo de inclinación se presenta en la figura 2.

Esta se usó previamente para soldar aluminio de forma satisfactoria, y cuenta con una geometría convexa con círculos concéntricos, 15 mm de diámetro y un pin cónico roscado de 4,5 mm.

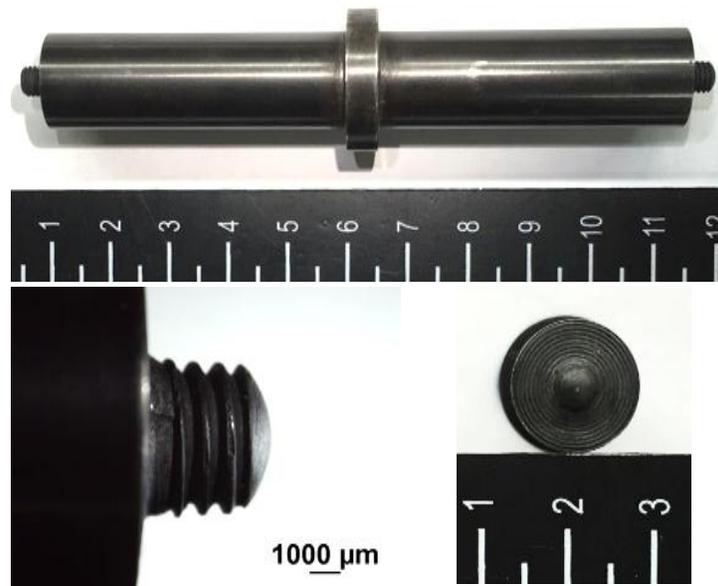


Figura 2. Herramienta para soldaduras disímiles.

2.3. Evaluación de ensayos no destructivos

Para el análisis de las soldaduras, se emplearon dos métodos, inspección visual (IV) y líquidos penetrantes (LP), cuyos resultados son simples de interpretar, a diferencia de los obtenidos por rayos X y ultrasonido en algunas muestras. Lo anterior debido a la diferencia de densidad e impedancia de los materiales que genera resultados en los que no se identifican los materiales y las discontinuidades con un contraste adecuado, en comparación con juntas no disímiles. Los criterios de evaluación para cada una de las dos técnicas se presentan de forma gráfica en la figura 3 y la figura 4, basados en la normativa de la AWS D17.3 [18] y en el estándar ISO 25239 [19], considerando la presencia o no de grietas superficiales, rebaba y apariencia general.

2.4. Análisis estereoscópico

Para el análisis por estereoscopía se cortaron dos muestras rectangulares de 20 x 100 mm de cada una de las soldaduras de la Tabla 4, empleando corte por chorro de agua. La sección transversal de las soldaduras se pulió hasta llegar a una lija de referencia 600. Con lo cual se obtuvo una superficie lisa que, al utilizar un equipo Nikon Eclipse LV100, permitió identificar grietas, distribución del aluminio en la zona de mezcla y anclajes mecánicos en las juntas.

Para la distribución y tamaño del aluminio, se identificó la zona afectada por el pin de la herramienta, conocida como *nugget*. Se midió el área total en cada uno de los cortes, y se realizó una proporción del aluminio en la matriz de polímero en términos del área. Todo ello fue realizado por medio del *software* ImageJ.

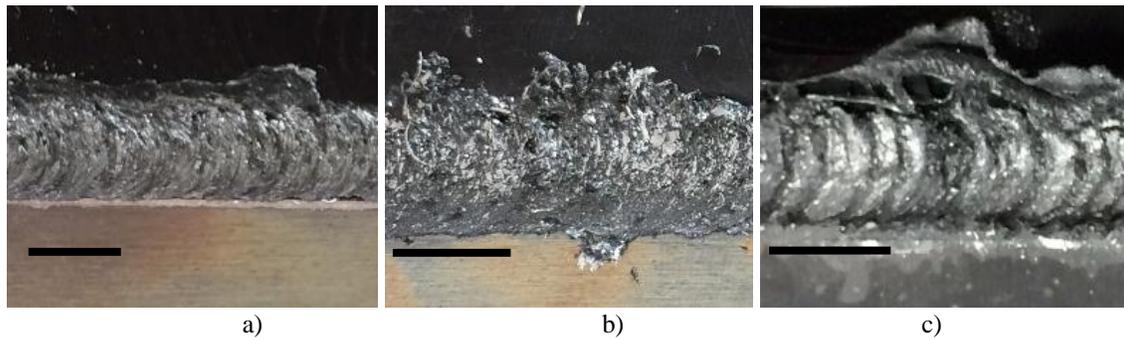


Figura 3. Criterio de aceptación para inspección visual: a) soldadura sana, b) soldadura intermedia y c) soldadura discontinua.

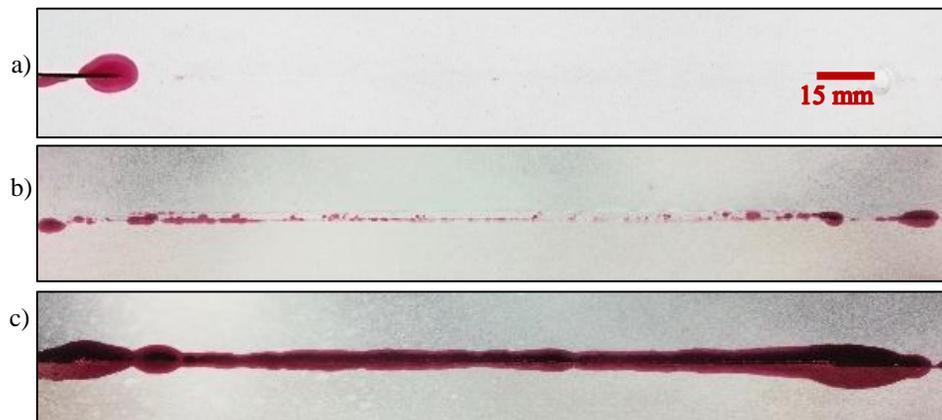


Figura 4. Criterio de líquidos penetrantes: a) soldadura sana, b) soldadura inaceptable discontinua y c) inaceptable continua.

2.5. Medición de fuerzas

Durante el proceso FSW se generan fuerzas longitudinales y verticales, como consecuencia de la oposición a fluir del material que está siendo soldado. Estas, al ser contrastadas con la información arrojada por los ensayos destructivos, pueden ser relacionadas en ciertos casos con la sanidad de las juntas obtenidas [20]. Teniendo lo anterior en mente, se decide utilizar el dispositivo de medición de fuerzas que se presenta en la figura 5, previamente desarrollado por el grupo de investigación, en búsqueda de una información más completa para justificar la sanidad y la posible aparición de tendencias entre la calidad de la unión y las fuerzas presentes en el proceso.

Como características generales, el dispositivo de medición es un equipo que mide las reacciones de la herramienta respecto a la bancada de la máquina CNC que se utiliza. Para la adquisición de las fuerzas, usa dos celdas de carga de 12 kN para la componente vertical (correspondiente al eje de rotación de la herramienta) y

una celda de carga de 5 kN para la fuerza de oposición al avance.



Figura 5. Dispositivo de medición de fuerzas desarrollado.

2.6. Pruebas de tracción

Estas pruebas sirven con medida para evaluar la resistencia mecánica de las juntas obtenidas al aplicar una fuerza de tracción a los especímenes, y poder así contrastar los resultados obtenidos con la combinación de parámetros planteados en la Tabla 4. Para esto se propuso una geometría de probetas basada en el estándar ASTM E8/E8M [21], pero luego modificada como se observa en

la figura 6, porque al momento del corte se presentaron desprendimiento de la junta; sobre las cuales se realizaron los ensayos. El tamaño de las muestras corresponde a un tipo *sub-size*, con una longitud máxima de 100 mm y 20 mm de ancho, cortadas de forma transversal al cordón de soldadura de 120 mm de longitud y falladas a una velocidad de aplicación de la fuerza de 5 mm/min, haciendo uso de una máquina de ensayos universal.

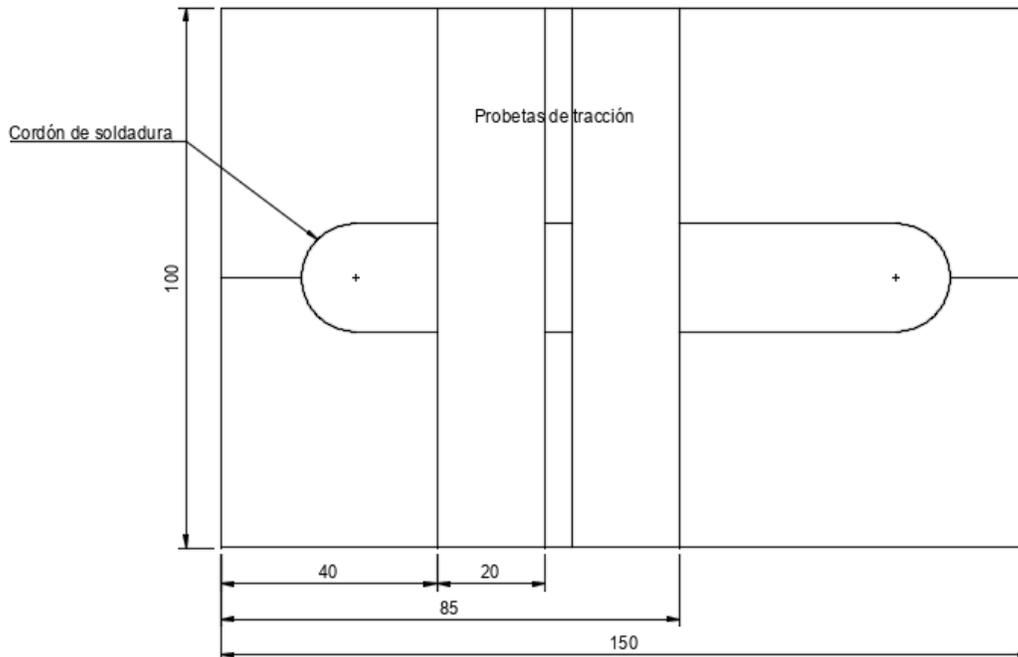


Figura 6. Probetas de tracción.

3. Resultados

A partir de los resultados obtenidos por medio de la IV y los LP, no se obtuvo ninguna soldadura completamente sana conforme a los criterios planteados, pero sí se identifican regiones prometedoras. Identificando el número de soldaduras que presentan esta condición, se hizo una relación con el total de juntas fabricadas y se obtuvo que más del 60 % de estas son inaceptables.

Al sobreponer los resultados, solo se encuentran dos combinaciones aceptables, 2450 RPM – 50 mm/min y 1150 RPM – 100 mm/min, que presentan las condiciones más favorables conforme a los criterios de evaluación planteados en la figura 3 y la figura 4 pero no son significativos, al ser solo 2 de las 16 soldaduras.

Analizando dichas condiciones respecto a las imágenes

de la sección transversal obtenidas por la estereoscopia óptica, se encontró que este comportamiento responde a que el aluminio se deposita en la matriz de polímero; y se presentan, en varios casos, grietas y entrelazamiento mecánico en el fondo del cordón, como se observa en la figura 7, que se asemeja a una unión mecánica, pero sin presentar un flujo del polímero en el aluminio.

Por otro lado, en la zona de mezcla, la fijación del aluminio al polímero es muy estable, y el tamaño de las partículas se incrementa de forma inversamente proporcional a la velocidad de rotación y directamente proporcional a la de avance, como se ilustra en la figura 8. Adicionalmente se observa que la proporción de aluminio respecto al polímero en la zona de mezcla disminuye. Inicia en valores cercanos al 30 % a la izquierda y finaliza en 10 %.

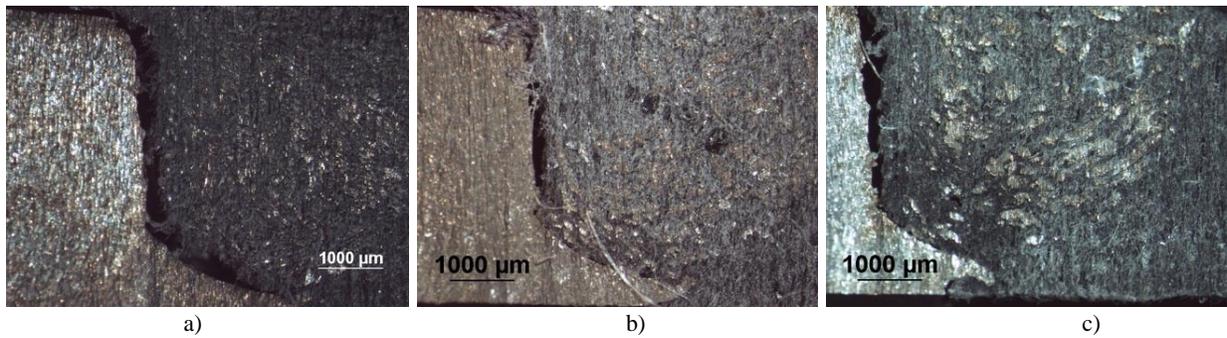


Figura 7. Características de las soldaduras disímiles: a) grieta completa, b) unión intermitente de material y c) entrelazamiento en la región inferior/raíz del cordón.

Con lo anterior se planteó el mapa de proceso preliminar que se observa en la figura 9, cuya clasificación consta de cuatro calidades correspondientes al nivel de unión que presentan los cordones, basado en la metodología de evaluación inicial. Se identifica además que no existe ninguna combinación de parámetros que presenten calidades altas de soldadura, y aquellas con las mejores

características tienen la relación de aluminio-polímero (porcentaje de área cubierta) más alta en el rango encontrado (superior al 21 %), la cual va desde 7 a 33 %. Evaluando los resultados de inspección visual frente a las fuerzas axiales, se observa que las fuerzas intermedias del proceso, entre 1400 a 1700 N, coinciden con la región de mejor calidad identificada en la inspección visual.

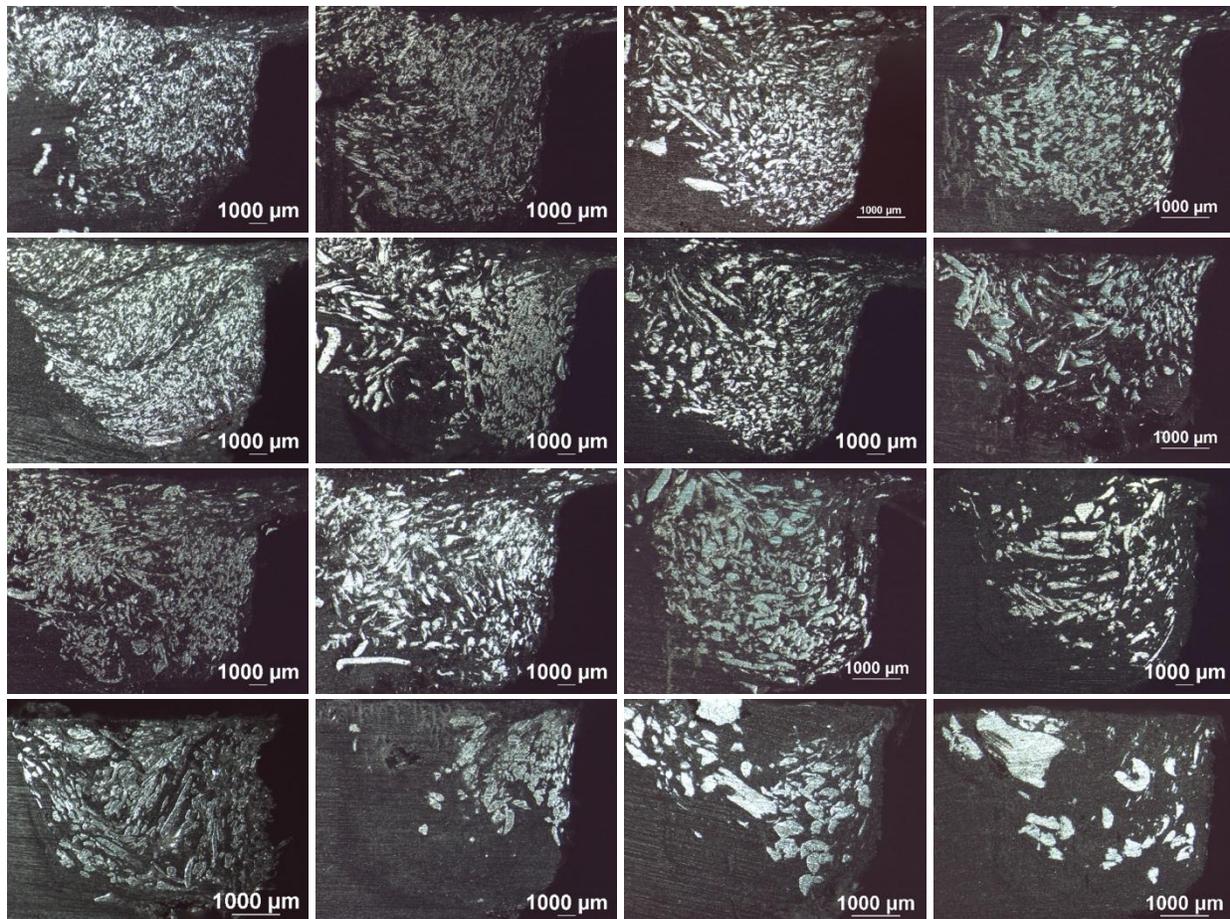


Figura 8. Comportamiento del tamaño de las partículas en las soldaduras disímiles en la misma distribución de la Tabla 4.

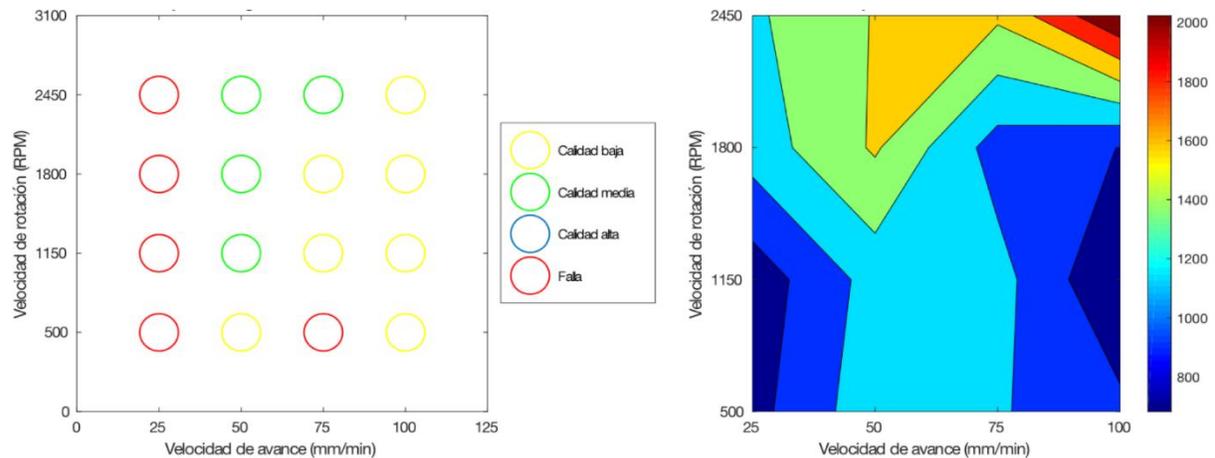


Figura 9. Comparativo de la inspección visual y las fuerzas axiales. En la izquierda, mapa de imágenes e inspección visual; y en la derecha, el mapa de fuerzas axiales.

Los resultados de las pruebas a tracción, realizados en 6 de las 16 soldaduras –esto debido a que algunas de las muestras fallaron durante el proceso de corte–, corroboran que la región identificada con calidad media por IV presenta las mejores propiedades mecánicas y

valores constantes en la resistencia última con valor máximo de esfuerzo de 1,5 MPa, eficiencia de apenas el 6 % del material base de menor resistencia, como se presenta en la figura 10.

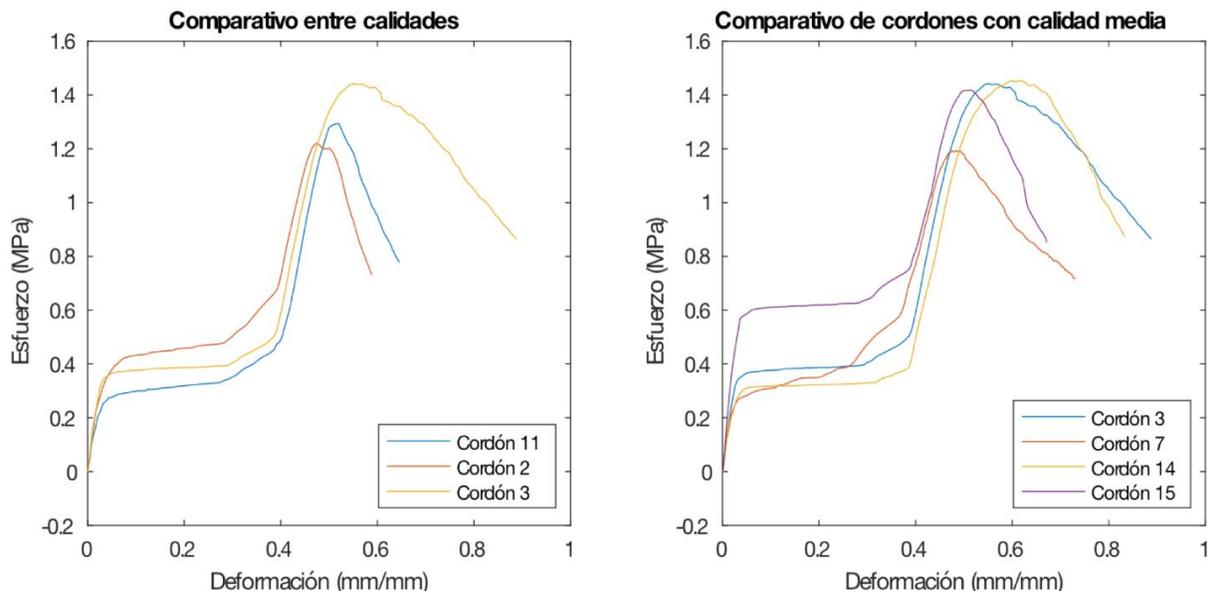


Figura 10. Curvas de esfuerzos a tracción para algunos cordones.

4. Discusión

La eficiencia de las juntas disímiles, a pesar de ser inferior al material base de referencia, el menos resistente (polímero), que obtiene un máximo del 6 %, permitió identificar combinaciones de parámetros prometedoras, ya que es una región que puede identificarse empleando todos los métodos de evaluación utilizados. Además,

para parámetros de soldadura a 25 mm/min en velocidad de avance y a 500 RPM en rotación, se presentan los peores resultados.

El comportamiento de las juntas disímiles de aluminio polímero se asemeja, en la interfase entre la zona de mezcla y la aleación de aluminio, a una unión mecánica con límites relativamente claros y poca coalescencia. A

pesar de no obtenerse resultados en resistencia mecánica cercanos al del material base, existe una región que presenta condiciones prometedoras; y se espera obtener un mayor número de soldaduras en esa región (soldaduras a 50 mm/min, entre 1150 y 2450 RPM; y a 2450 RPM con 75 mm/min) y evaluar otros tipos de herramientas en trabajos futuros que permitan mejorar estos resultados.

Referencias

- [1] W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, P. Temple-smith, and C. J. Dawes, "Improvements relating to friction welding," WO 1993010935 A1, 1991.
- [2] A. R. Patel, C. G. Dalwadi, and H. G. Rana, "A Review: Dissimilar Material Joining of Metal to Polymer using Friction Stir Welding (FSW)," *IJSTE - International J. Sci. Technol. Eng.*, vol. 2, no. 10, pp. 702–706, 2016.
- [3] K. Martinsen, S. J. Hu, and B. E. Carlson, "Joining of dissimilar materials," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 679–699, 2015.
- [4] F. Khodabakhshi *et al.*, "Microstructure-property characterization of a friction-stir welded joint between AA5059 aluminum alloy and high density polyethylene," *Mater. Charact.*, vol. 98, no. July 2016, pp. 73–82, 2014.
- [5] D. S. Villa-salazar, D. A. Hincapié-zuluaga, M. Sc, and C. Física, "Herramientas usadas en soldadura por fricción-agitación Computer Simulation of Heat Transfer on Tools Used in Friction Stir Welding," vol. 26, no. 2, 2015.
- [6] MakeItFrom, "7075-T6 Aluminum," 2018. [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-T6-Aluminum>. [Accessed: 02-Feb-2018].
- [7] D. Fu, C. Sun, C. Zhang, and J. Liu, "Improvement of Formation Quality for Friction Stir Welded Joints," *Weld. J.*, vol. 91, no. Welding research, pp. 169–173, 2012.
- [8] B. plastic Federation, "Polyethylene (High Density) HDPE," *British Plastic Federation*, 2018. .
- [9] A. Plastics, "High-density polyethylene," 2018.
- [10] MatWeb, "Aluminum 7075-T6; 7075-T651," 2018. [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatG> UID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d&ckck=1. [Accessed: 02-Feb-2018].
- [11] U. de Barcelona, "Polietileno de alta densidad," *Materials*, 2018. [Online]. Available: <http://www.ub.edu/cmmaterials/es/content/polietileno-de-alta-densidad>.
- [12] E. Azarsa and A. Mostafapour, "Experimental investigation on flexural behavior of friction stir welded high density polyethylene sheets," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 1, pp. 149–155, 2014.
- [13] F. Simões and D. M. Rodrigues, "Material flow and thermo-mechanical conditions during Friction Stir Welding of polymers: Literature review, experimental results and empirical analysis," *Mater. Des.*, vol. 59, pp. 344–351, 2014.
- [14] W. Ratanathavorn, "Hybrid Joining of Aluminum to Thermoplastics with Friction Stir Welding," KTH-Royal Institute of Technology, 2012.
- [15] B. C. Liechty and B. W. Webb, "The use of plasticine as an analog to explore material flow in friction stir welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 184, no. 1–3, pp. 240–250, 2007.
- [16] B. Vijendra and A. Sharma, "Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics," *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 234–244, 2015.
- [17] S. Eslami, T. Ramos, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, "Shoulder design developments for FSW lap joints of dissimilar polymers," *J. Manuf. Process.*, vol. 20, pp. 15–23, 2015.
- [18] American Welding Society, *AWS D17.3, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Applications*, 1st ed. Miami, FL, 2009.
- [19] ISO, "ISO 25239-1:2011: Friction stir welding — Aluminium Part 1: Quality and inspection requirements," *BSI Stand. Publ.*, 2011.
- [20] N. Busu, M. S. Jaffarullah, C. Y. Low, M. S. B. Shaari, Armansyah, and A. Jaffar, "A Review of Force Control Techniques in Friction Stir Process," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 76, no. Iris, pp. 528–533, 2015.
- [21] ASTM International, *ASTM E8 / E8M-13, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, vol. 2. 2013.