

Análisis de la corriente alterna de onda rectangular en el proceso de soldadura TIG autógeno

Alexander Galleguillos-Solar¹, Christian Paredes- Flores¹, Andrea Henríquez-Giusti¹, Manuel Camus-Maldonado¹, Víctor Vergara-Díaz¹

¹Laboratorio de Procesos de Soldadura (LPS), Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antofagasta, Chile.
Email: victor.vergara@uantof.cl

Resumen

Es objetivo de este estudio realizar ensayos de forma autógena para conocer el comportamiento de las variables de la corriente alterna de onda rectangular sobre la limpieza catódica, área fundida y desgaste del electrodo. Se implementó un banco de pruebas, que consta de una máquina de soldar multiproceso, sistema de desplazamiento lineal de la torcha, sistema de adquisición de datos. Los ensayos se realizaron en la posición plana utilizando como material base aluminio AA 1100. Se evaluó el aspecto superficial y morfología de los depósitos como también el desgaste de los electrodos de tungsteno. Las principales conclusiones revelan que la limpieza de la capa de óxido ocurre para todos los niveles de tiempo programados en la fase positiva, pero comprometiendo el desgaste del electrodo. Los parámetros aquí analizados permitirán dar continuidad al proyecto, contribuyendo a la manufactura aditiva por arco eléctrico, utilizando el proceso de soldadura TIG con alimentación mecanizada de alambre.

Palabras clave: TIG; aluminio; limpieza catódica; autógena.

Abstract

The objective of this study is to carry out tests autogenously to know the behavior of the variables of the rectangular wave alternating current on the cathodic cleaning, penetration and wear of the electrode. A test bench was implemented, which consists of a multiprocess welding machine, linear torch displacement system, and data acquisition system. The tests were carried out in the flat position using AA 1100 aluminum as the base material. The surface appearance and morphology of the deposits as well as the wear of the tungsten electrodes were evaluated. The main conclusions reveal that the cleaning of the oxidized layer occurs for all time levels programmed in the positive phase, but compromising the wear of the tungsten electrode. The parameters analyzed here will allow the project to continue, contributing to additive manufacturing by electric arc, using the TIG welding process with mechanized wire feeding.

Keywords: TIG; aluminum; cathodic cleaning; autogenous welds.

1. Introducción

La soldadura de las aleaciones de aluminio presenta algunas peculiaridades en relación con la soldadura de los aceros, debido principalmente a sus propiedades. Dentro de estas propiedades se puede citar en el aluminio la alta conductividad térmica y formación de una fina capa de óxido, propiedades que irán a influenciar en el aspecto del cordón de soldadura [1].

La alta conductividad, en el aluminio, hace que el calor se disipe rápidamente, dificultando en el mojado del metal base y en el perfil de penetración del cordón de soldadura [2].

Otra agravante está relacionada con la alta reactividad del aluminio con el oxígeno, formando naturalmente, en su superficie, una capa de óxido de aluminio (Al_2O_3). Esta capa a pesar de ser muy fina es suficiente para proteger el metal en diversos medios corrosivos, lo que explica su excelente resistencia a la corrosión.

La Al_2O_3 es eléctricamente no conductora lo que causa una dificultad del paso de la corriente, resultando en inestabilidad en el arco. Por lo tanto, se hace necesario la remoción de este óxido. La alúmina se funde a 2050°C y el punto de fusión del aluminio es en torno de 660°C [3].

Los autores de la referencia [4] realizaron observaciones en tiempo real de la limpieza de óxidos durante el proceso de soldadura TIG con polaridad variable (VP GTAW) en la aleación de aluminio Al 6061 de 6 mm de espesor, utilizando una cámara con 30 cuadros por segundo, proporcionando instrucciones prácticas para la correcta selección de parámetros del proceso de soldadura resultando en una poza de fusión libre de óxidos.

Para la remoción de esta capa de óxido, en el proceso de soldadura TIG, se utiliza la corriente alterna de onda rectangular, programando los menores tiempos en la polaridad positiva, donde ocurre el efecto de limpieza y desgaste del electrodo. La Figura 1, muestra el formato de la corriente alterna rectangular indicando las polaridades donde ocurre la limpieza y la fusión [5].

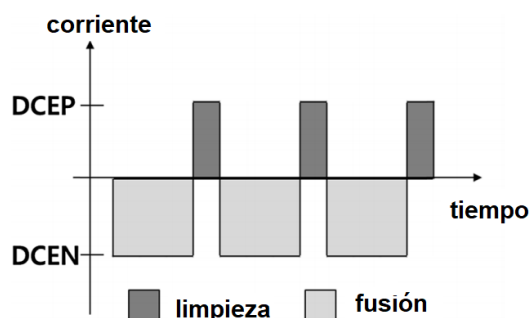


Figura 1. Función de la polaridad en la soldadura del aluminio con polaridad variable, onda rectangular. DCEP: Corriente Continua Electrodo Positivo, DCEN: Corriente Continua Electrodo Negativo [5].

Varios son los autores que han encontrado valores del tiempo en la polaridad positiva cuando se refieren a la soldadura del aluminio. La referencia [6] señala 19 ms en la polaridad negativa y 3 ms en la polaridad positiva. Por otro lado, la referencia [7] relata que para un tiempo en la polaridad positiva de 1,3 ms es posible obtener limpieza catódica, menor desgaste del electrodo y mayor penetración. La referencia [9] empleó tiempos entre 2 y 4 ms.

En este artículo se aborda la limpieza de la capa de óxido en el aluminio utilizando como herramienta de remoción el propio arco voltaico del proceso de soldadura TIG con corriente alterna de onda rectangular como también seleccionar el mejor conjunto de parámetros de este estudio para utilizar el proceso TIG con alimentación mecanizada de alambre [7, 8, 9], contribuyendo de esta forma a la manufactura aditiva por arco eléctrico con alambre conocido por las siglas en inglés WAAM (Wire Additive Arc Welding) [9].

2. Método(s), metodología

Se implementó un banco de pruebas en el Laboratorio de Procesos de Soldadura (LPS), el cual consta de una máquina de soldar multiproceso, una torcha TIG refrigerada por agua, gases, un sistema de desplazamiento lineal de la torcha con un grado de libertad y un Sistema de Adquisición de Datos (SAD). Los cordones de soldadura se realizaron en la posición plana de manera autógena utilizando como material base el aluminio AA 1100 de dimensiones $240 \times 70 \times 3$, se utilizó argón como gas de protección con un caudal de 12 l/min y la tobera N°7. El electrodo utilizado fue del tipo tungsteno con 2% de Torio EWTh-2 con un diámetro de 2,4 mm y ángulo en la punta del electrodo de 45° . La longitud de arco se calibró en 3 mm. La velocidad de soldadura programada en el sistema de traslación de la pistola fue de 15 cm/min. La abertura del arco se realizó mediante la técnica lift arc. En la Corriente Alterna de Onda Rectangular se utilizaron tres niveles de tiempo en la polaridad positiva: 1, 2, 3 y 4 ms. El criterio adoptado en este estudio fue de mantener el periodo T en 20 ms, o sea, una frecuencia de 50 Hz. De acuerdo con el espesor de la plancha de aluminio y el tipo de aleación, los niveles de corriente en la polaridad positiva y negativa fueron de 100 A. Los cordones de soldadura se evaluaron por el aspecto superficial y su morfología, y los electrodos de tungsteno se evaluaron por el desgaste de la punta.

3. Resultados

3.1. Introducción.

Los resultados obtenidos exhiben el aspecto superficial, las macrografías, el desgaste del electrodo, los oscilogramas de corriente y tensión, la energía del arco y la morfología de los cordones de soldadura con la correspondiente área fundida.

3.2. Aspecto superficial.

La Figura 2 muestra el aspecto superficial de los cordones de soldadura realizados durante los ensayos para diferentes tiempos en la polaridad positiva de la corriente de soldadura con formato rectangular.

Se puede observar que todos los ensayos, desde el número uno al número cuatro, presentan una remoción de la alúmina, sin embargo, se puede inferir que para un tiempo programado en la máquina de soldar de $t_+ = 1$ ms es suficiente para conseguir este efecto de limpieza, que es necesaria para poder realizar la soldadura del aluminio cuando se pasa a la fase negativa que es la encargada de realizar la fusión en el material base.

Debido a que el proceso de soldadura autógeno del aluminio fue realizado de forma mecanizada, en el borde del cordón de soldadura se origina una franja

blanca de forma homogénea que permanece a lo largo del cordón, que justamente se trata de la alúmina que fue retirada producto de la limpieza catódica. En la bibliografía especializada las referencias [4, 7, 9, 10] encontraron observaciones similares, quienes trabajaron utilizando como material base las aleaciones de aluminio 6061, 1200, 5052 y 6082-T6, respectivamente.


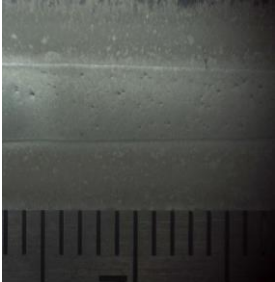


Ensayo	Fotografías	Parámetros
N° 1		$t^+ = 1 \text{ ms}$ $t^- = 19 \text{ ms}$
N° 2		$t^+ = 2 \text{ ms}$ $t^- = 18 \text{ ms}$
N° 3		$t^+ = 3 \text{ ms}$ $t^- = 17 \text{ ms}$
N° 4		$t^+ = 4 \text{ ms}$ $t^- = 16 \text{ ms}$

Figura 2. Aspecto superficial de los cordones de soldadura para diferentes tiempos de polaridad positiva y polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

3.3. Macrografías.

La Figura 3 exhibe las macrografías para todos los ensayos realizados, desde el número uno al número cuatro, en los cuales se fue variando el tiempo en la fase positiva considerando un periodo de 20 ms que se mantuvo constante.



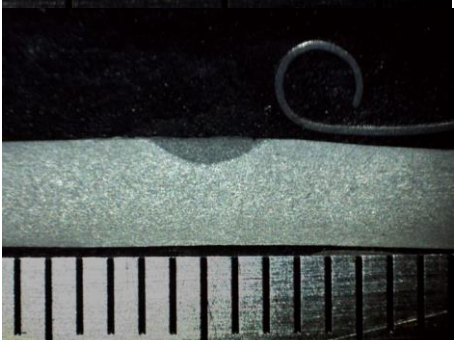

Ensayo	Fotografías
N° 1	
N° 2	
N° 3	
N° 4	

Figura 3. Macrografías de la sección transversal de los cordones de soldadura para diferentes tiempos de polaridad positiva y negativa. Fuente: elaboración propia.

Las macrografías revelan el área fundida de los cordones, en estos registros fotográficos adquiridos no se observa refuerzo del cordón, lo anterior es producto que estos se realizaron de forma autógena (sin material de aporte). Estos resultados serán utilizados en otro proyecto que considera la soldadura TIG con alimentación mecanizada de alambre.

El registro fotográfico de la sección transversal de los cordones de soldadura realizados muestra, desde el punto de vista cualitativo, que en la medida que se aumenta el tiempo en la fase positiva de la corriente alterna de onda rectangular existe una disminución en la región fundida y en la penetración de esta misma. Para una buena interpretación de lo anterior es importante destacar que la corriente utilizada en la polaridad positiva y en la polaridad negativa siempre se programó en el mismo nivel de 100 A, onda balanceada en la corriente.

3.4. Desgaste del electrodo

La Figura 4 muestra los ensayos del número uno al número cuatro, que corresponden a diferentes tiempos en la fase positiva de la corriente de soldadura alterna con formato rectangular.

Se observa claramente en las fotografías que en la medida que se aumenta el tiempo en la polaridad positiva (t^+), existe un desgaste considerable en la punta del electrodo, este hecho ocurrido debe ser considerado y tomado en cuenta al momento de producir soldaduras con corriente alterna de onda rectangular, debido a que debe existir un equilibrio entre limpieza de la capa de óxido y desgaste del electrodo.

Hasta el momento de lo que se ha expuesto en el presente trabajo, ya se puede concluir que un tiempo adecuado en la polaridad positiva es de 1 ms, porque es posible obtener limpieza del óxido y se tiene en este mismo tiempo un desgaste mínimo del electrodo. Resultados similares fueron encontrados por las referencias [5, 9, 10].

3.5. Oscilogramas de corriente y tensión

Desde la Figura 5 a la Figura 8 se muestran los oscilogramas de corriente y tensión de los distintos ensayos realizados, variando el tiempo en la polaridad positiva en cada uno de estos.

En estos oscilogramas se observa que la tensión en la polaridad negativa siempre resulta menor que en la polaridad positiva, esto toma relevancia al considerar que se utilizaron los mismos niveles de corriente en la polaridad positiva y negativa.

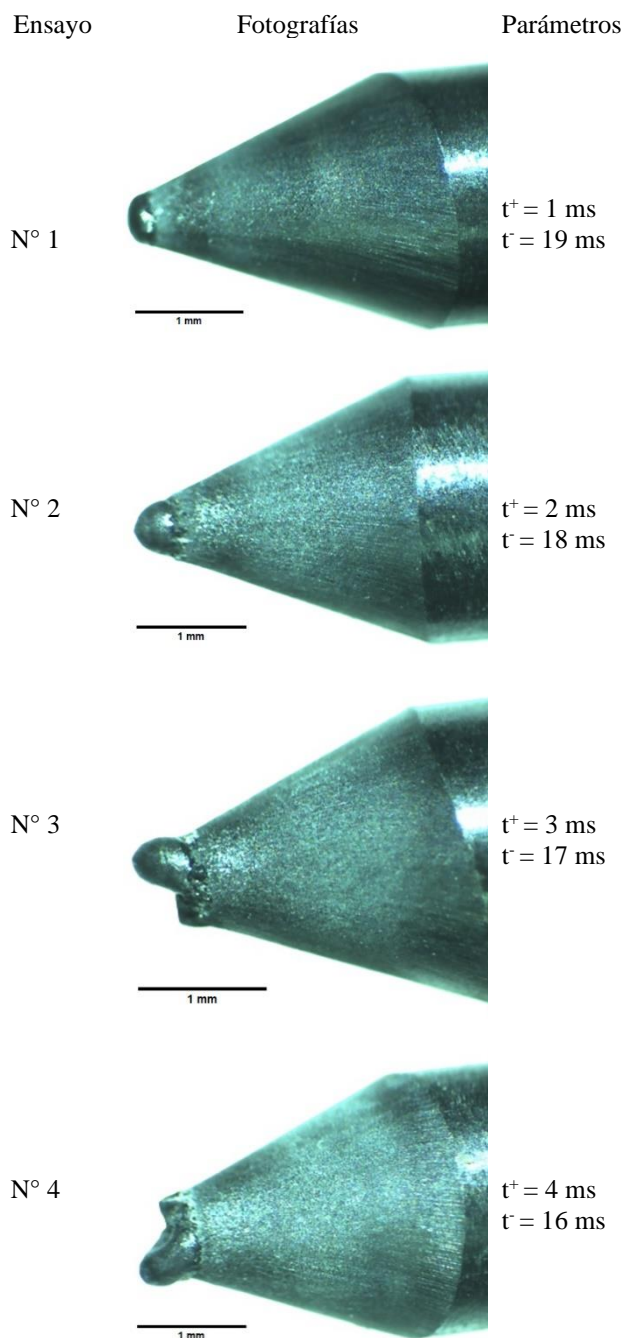


Figura 4. Fotografías del desgaste de los electrodos para diferentes tiempos de polaridad positiva y negativa. Fuente: elaboración propia.

También se observa que en la medida que se aumenta el tiempo en la polaridad positiva del electrodo de tungsteno existe una disminución de la tensión en el arco en la polaridad negativa, este efecto puede ser explicado por la eficiencia que presenta el electrodo de tungsteno en el efecto termoiónico, el cual se calienta en la polaridad positiva ayudando a la emisión termoiónica, efecto que se refiere a la emisión de electrones que ocurre cuando un material se calienta. También se puede atribuir esta disminución de la tensión en el arco en la polaridad negativa a un mejor

desempeño en esta polaridad producto de una mayor ionización del gas, esto debido a que un gas ionizado tiene la capacidad de conducir corriente eléctrica.

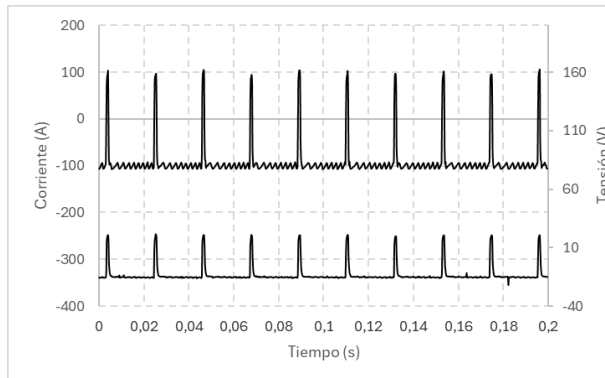


Figura 5. Oscilogramas de tensión y corriente para un tiempo de 1 ms en la polaridad positiva y 19 ms en la polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

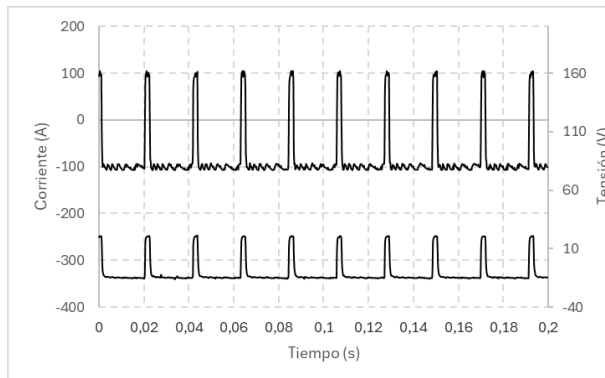


Figura 6. Oscilogramas de tensión y corriente para un tiempo de 2 ms en la polaridad positiva y 18 ms en la polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

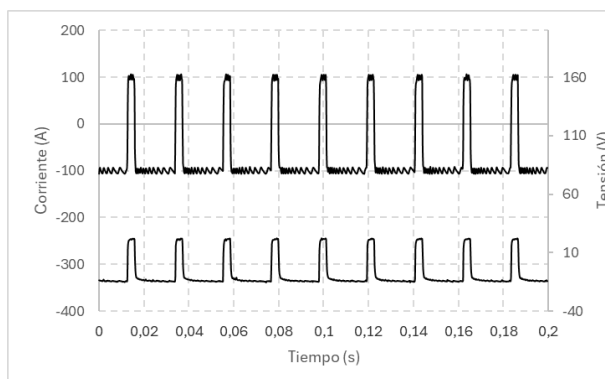


Figura 7. Oscilogramas de tensión y corriente para un tiempo de 3 ms en la polaridad positiva y 17 ms en la polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

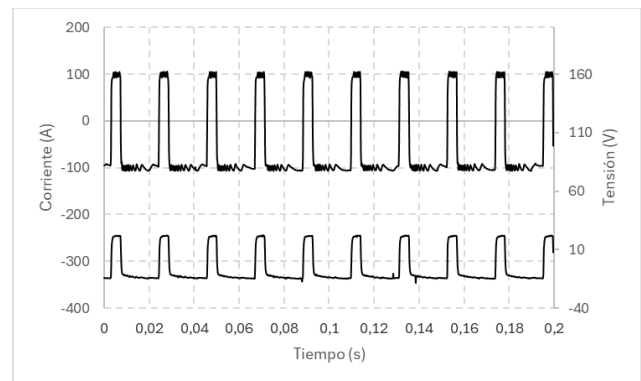


Figura 8. Oscilogramas de tensión y corriente para un tiempo de 4 ms en la polaridad positiva y 16 ms en la polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

3.5. Energía del arco

La Tabla 1 muestra la energía del arco de forma separada para las polaridades positivas y negativas, para diferentes tiempos programados en la polaridad positiva. De forma gráfica en la Figura 9 se visualiza que existe también una tendencia a aumentar la energía del arco en la fase positiva (afectando en el deterioro del electrodo) y una disminución de esta misma en la fase negativa (lo que afectará en el grado de penetración del cordón de soldadura). Resultados similares fueron encontrados por la referencia [7, 11], quienes trabajaron con la aleación de aluminio AA 1200 y 5083, respectivamente.

Tabla 1. Energía del arco calculadas separadamente para las polaridades negativas y positivas.

t^+ (ms)	Q^+ (kJ/cm)	Q^- (kJ/cm)
1	5,65	5,96
2	6,84	5,66
3	7,64	5,44
4	7,68	5,33

t^+ : Tiempo en la polaridad positiva. Q^+ : Energía del arco en la polaridad positiva. Q^- : Energía del arco en la polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

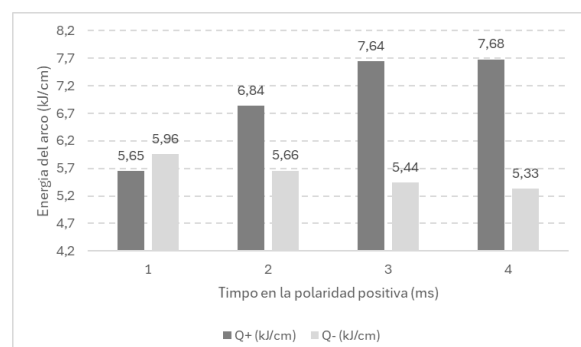


Figura 9. Tendencia de la energía del arco durante las fases positivas y negativas. Q^+ : Energía del arco en la polaridad positiva. Q^- : Energía del arco en la polaridad negativa. Fuente: elaboración propia.

3.6. Morfología de los cordones de soldadura y área fundida

De forma cuantitativa se realizará un análisis a los parámetros geométricos de los cordones de soldadura para los diferentes tiempos en la polaridad positiva.

Se ha realizado la medición de los parámetros geométricos utilizando un software comercial CAD, los que se muestran en la Tabla 4.5.

La Figura 10 muestra la penetración de los cordones de soldadura realizados de forma autógena, en esta figura se puede observar que en la medida que se aumenta el tiempo en la polaridad positiva del electrodo de tungsteno existe una disminución en la penetración de la región fundida. Lo anterior puede ser explicado por la Figura 9, la cual muestra que la energía del arco en la fase negativa resulta siempre menor que en la fase positiva, y es precisamente en la fase negativa donde se realiza la fusión, siendo en la fase positiva donde se realiza la limpieza de la capa de óxido.

En la Figura 11 se muestra de forma gráfica el ancho de los cordones de soldadura. Se observa que en la medida que se aumenta el tiempo en la polaridad positiva, se puede apreciar una clara disminución del ancho de la región fundida y luego un aumento en $t+ = 4 \text{ ms}$.

Se grafica en la Figura 12 la relación entre el área de la región fundida y el tiempo en la polaridad positiva en que permanece el electrodo de tungsteno. Se puede inferir a partir de esta figura que a medida que se aumentan los milisegundos en la fase positiva, disminuye el área de la región fundida.

4.0. Aplicación

Con los resultados obtenidos en este estudio se han realizados ensayos con alimentación tangencial de alambre. Para poder realizar esta operación se implementó el proceso de soldadura TIG con alimentación mecanizada de alambre con las expectativas de investigar sobre la manufactura aditiva por arco eléctrico.

En este banco de pruebas la pistola TIG adaptada permite la entrada del alambre al arco de forma tangencial (el ángulo entre el alambre y el electrodo de tungsteno es de 20°).

La Figura 13 muestra la pistola TIG adaptada para realizar cordones de soldadura con alambre ER4043 de 1,2 mm de diámetro. La pistola TIG adaptada hace parte del banco de pruebas implementado en el laboratorio de procesos de soldadura.

El mejor conjunto de parámetros obtenidos en este estudio de la soldadura autógena con el formato de onda rectangular de la corriente alterna, son aplicados con alimentación mecanizada de alambre. La Figura 14a muestra el aspecto superficial del cordón de soldadura y la Figura 14b la sección transversal. El

efecto de escamas del cordón de soldadura es característico cuando se emplea el formato de onda de corriente alterna pulsada. La sección transversal del cordón en la metalografía de la figura 4b indica penetración total como también un adecuado ángulo de mojado de 24° .

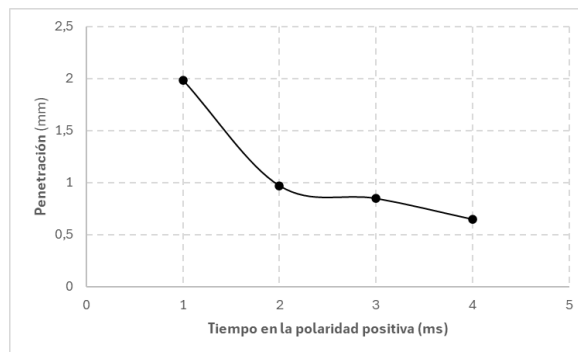


Figura 10. Relación entre el tiempo en la polaridad positiva y la penetración. Fuente: elaboración propia.

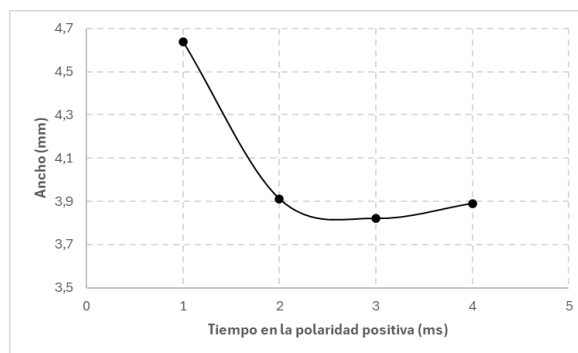


Figura 11. Relación entre el tiempo en la polaridad positiva y el ancho. Fuente: elaboración propia.

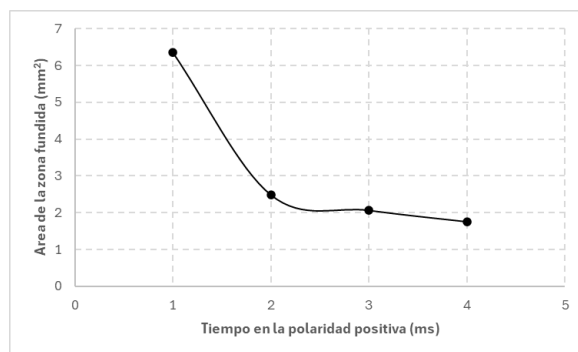
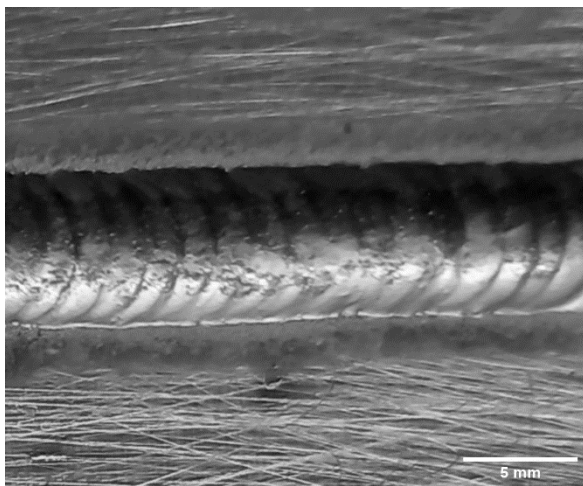


Figura 12. Relación entre el tiempo en la polaridad positiva y el área de la zona fundida. Fuente: elaboración propia.



Figura 13. Torcha TIG adaptada para la alimentación mecanizada de alambre. Fuente: elaboración propia



(a)



(b)

Figura 14. (a) Aspecto superficial y (b) macrografía de la sección transversal del cordón de soldadura con alimentación mecanizada de alambre. Material base AA1100, espesor 3 mm, alambre ER 4043, diámetro de 1,2 mm, velocidad de alambre $v_a = 0,8$ m/s, alimentación tangencial. Fuente: elaboración propia.

5.0. Conclusiones

A partir del análisis de los resultados obtenidos de los ensayos experimentales es posible concluir que:

1. Se observa en el registro fotográfico de la superficie de los cordones de soldadura que la limpieza de la capa de óxido (limpieza catódica) se da para todos los niveles del tiempo en la polaridad positiva programados. Sin embargo, se puede observar en el aspecto superficial de los cordones de soldadura realizados que es necesario un tiempo de 1 ms solamente para producir limpieza catódica.
2. A partir de las fotografías obtenidas se observa desgaste en la punta del electrodo de tungsteno cuando se utilizan tiempos mayores en la polaridad positiva. En base a esto, para que exista limpieza catódica en los cordones de soldadura y un menor desgaste de la punta del electrodo de tungsteno es necesario utilizar los menores tiempos en la polaridad positiva.
3. Los mayores valores de penetración en la región fundida se obtuvieron para los menores valores de tiempo en la fase positiva, esto se debe a los mayores niveles de energía del arco conseguidos en esa polaridad. Se infiere a partir de los datos obtenidos que a medida que se aumenta el tiempo en la polaridad positiva decrece el área de la región fundida debido a la disminución de la tensión en la fase negativa, que es precisamente en esta fase donde se produce la fusión.
4. Este estudio ha permitido obtener parámetros de soldadura para la aleación AA1100 de 3 mm de espesor, contribuyendo a la manufactura aditiva por arco eléctrico con alambre, utilizando el proceso de soldadura TIG con alimentación mecanizada de alambre de forma tangencial.

6.0. Referencias

- [1] A. Bansal, M.S. Kumar, I. Shekhar, S. Chauhan, S. Bhardwaj. "Effect of welding parameter on mechanical properties of TIG welded AA6061". *Materials Today: Proceedings*, n.º 37, pp. 2126-2131, 2021.
- [2] E. Siewert, N. Hussary, M. Schnick, M. Dreher, H. Schuster, R. Wagner, S. Eichler. "New GTAW variant for high-throughput aluminum welding". *Welding in the World*, n.º 62, pp. 385-391, 2018.
- [3] S. Rose, J. Zähr, M. Schnick, U. Füßel, S.F. Goecke, M. Hübner. "Arc attachments on aluminium during tungsten electrode positive polarity in TIG welding of aluminium". *Welding in the World*, n.º 55, pp. 1-99, 2011.
- [4] R. Sarrafi, D. Lin, R. Kovacevic. "Real-time observation of cathodic cleaning during variable-polarity gas tungsten arc welding of aluminium alloy". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, n.º 9, pp. 1143-1157, 2009.

- [5] J. Cho, J.J. Lee, S.H. Bae. “Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n° 81, pp. 1273-1280, 2015.
- [6] O'Brien, R. L. (1991). *Welding Handbook. Volume 2: Welding Processes.(Retroactive Coverage)*. American Welding Society, 1991.
- [7] J.C., Dutra. *Ciência e tecnologia da soldagem a arco voltaico: dos fundamentos às modernas técnicas*, 1. Ed. – Palhoça, SC: Ed. do Autor, 2023.
- [8] T. Kumar, D. V. Kiran, J. Cheon, N. Arora. “Probing the influence of cold wire gas tungsten arc welding current waveforms on the aluminum-steel joining”. *Journal of Manufacturing Processes*, n° 59, pp. 378-388, 2020.
- [9] K. F. Ayarkwa, S. W. Williams, J. Ding. “Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire+ arc additive manufacture, *Addit. Manuf.*, n°18, pp186–193, 2017.
- [10] J. Cho. “Variable Polarity Arc Welding of Aluminum Thin Plate”. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, n° 2, pp. 89-93, 2014.
- [11] M. A. R. Yarmuch, B.M. Patchett. “Variable AC polarity GTAW fusion behavior in 5083 aluminum”. *WELDING JOURNAL-NEW YORK-*, n° 7, pp. 196-200, 2007.