

Cambio tecnológico en la industria naval utilizando el proceso de soldadura de punto por Fricción-Agitación

Technological change in the naval industry using the friction spot- stir Welding (FSSW) Process

Marcelo Pelayo ^{1a}, Oscar Pascal ^{1b}, Guillermo Lombera ²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina
Correos electrónicos: ^a marcelo_pelayo@yahoo.com.ar, ^b ompascal@hotmail.com

² Grupo de ingeniería asistido por computación (GIAC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina. Correo electrónico: glombera@fi.mdp.edu.ar

Recibido: 20 septiembre, 2019. Aceptado: 10 febrero, 2020. Versión final: 30 abril, 2020.

Resumen

El presente artículo pretende dar respuesta a una demanda tecnológica del astillero TECNAO SRL, ubicado en la zona de San Fernando en la provincia de Buenos Aires, Argentina, este se dedica a la fabricación de barcos de bajo porte, fabricados principalmente de aluminio. El problema detectado consiste en la dificultad que se presenta en el proceso de fabricación de las naves, en lo referente al posicionamiento de las planchas de aluminio a soldar, que se posicionan mediante un punteo previo. En la actualidad, dicha actividad se realiza mediante procesos de soldadura tradicionales MIG o TIG, lo que obliga a trasladar las torchas a lo largo de todo el barco y a la necesidad de contar con personal altamente calificado para realizar esta tarea, lo que impacta fuertemente en el costo y en la competitividad del sector, además de los problemas de distorsión de las planchas por efecto de las altas temperaturas asociadas a los procesos utilizados. El presente trabajo describe los estudios realizados tendientes al diseño de un equipo portátil de soldadura de punto por fricción- agitación (FSSW) de aplicación en la industria naval. Se evaluó la incorporación FSSW con una herramienta autónoma. La herramienta permitió el punteo de la estructura sin la necesidad del movimiento de torchas a lo largo de todo el barco, se presentó una complejidad adicional, soldar espesores mayores a 3mm, esto resulto relevante en la investigación.

Palabras clave: soldadura; fricción; soldadura de punto; industria naval; dispositivo; AA 6082.

Abstract

This article aims to respond to a technological demand from the TECNAO SRL shipyard, located in the San Fernando area in the province of Buenos Aires, Argentina, dedicated to the manufacture of small ships, made mainly of aluminum. The detected problem consists in the difficulty that arises in the manufacturing process of the ships, in relation to the positioning of the aluminum plates to be welded, which are positioned by means of a prior tapping. Currently, this activity is carried out using traditional MIG or TIG welding processes, which requires moving the torches throughout the entire barcode and the need for highly qualified personnel to carry out this task, which impacts strongly the cost and competitiveness of the sector, in addition to the problems of plate distortion due to the high temperatures associated with the processes used. The present work describes the studies carried out aimed at the design of a portable equipment for spot welding by friction-agitation (FSSW) for application in the naval industry. The FSSW

solution was evaluated with an autonomous tool. The tool specified the structure stitching without the need for torch movement throughout the entire barcode, presented an additional complexity, welding thicknesses greater than 3 mm, this was relevant in the investigation.

Keywords: welding; friction; spot welding; naval industry; AA 6082.

1. Introducción

La soldadura de punto por fricción agitación fue desarrollada por Mazda. La primera aplicación de esta tecnología (FSSW) fue en su modelo 2003 RX - 8, un automóvil de producción en masa.

Dos variantes distintivas del proceso de FSSW han sido reportadas en la literatura. El primer enfoque utilizado por Mazda emplea una geometría de herramienta con un pin fijo. El pasador sobresale dejando el agujero de salida característico del proceso [1].

El segundo enfoque utiliza distintos mecanismos a fin de eliminar la existencia del agujero dejado por la herramienta, ya sea movimientos relativos del pin y el hombro para que vuelva a llenar el agujero, la eliminación del pin o la realización de la soldadura de punto por fricción agitación en dos etapas. Basado en la información disponible, el segundo enfoque exige un tiempo de procesamiento largo. De acuerdo con los trabajos realizados, se puede ver que el método tradicional es muy rápido para aleaciones de Aluminio siendo el método más desarrollado de esta tecnología. Una soldadura de punto por fricción agitación, puede hacerse en menos de un segundo. Además, las máquinas de soldaduras existentes y el sistema de control para la ubicación de la herramienta con el pin, es simple y fácil de integrar en una producción en masa de grandes volúmenes, como una línea de montaje [2].

En el caso de Mazda, la utilización del sistema de soldadura por fricción agitación, reportó más del 90 por ciento de ahorro y más del 40 por ciento del capital involucrado en la energía de operación, además de la reducción de inversión respecto a la soldadura por puntos convencional utilizada para la unión de aleaciones de Aluminio [3].

El proceso de soldadura de punto por fricción agitación es aplicable a todas las aleaciones de aluminio [4]. Este proceso consiste en un el posicionamiento de una herramienta compuesta por un Pin y un hombro (Shoulder), la cual se monta sobre una fresadora o cualquier otro herramental que permita la rotación de la herramienta y un movimiento axial con una carga predeterminada. Luego se baja la herramienta sobre el material base a soldar que generalmente consiste en una placa inferior y una placa superior. La herramienta se fija

a una velocidad de rotación determinada y se inicia la penetración sobre la placa con una determinada carga axial, lo que genera una agitación del material durante un tiempo determinado, que es una variable determinante en las propiedades finales de la unión soldada. Luego se levanta la herramienta y la pieza queda soldada por los efectos de la agitación de los materiales. Una placa de soporte se utiliza en el lado inferior de las placas a soldar, de apoyo a la carga aplicada, para evitar que la carga aplicada deforme las mismas. En este proceso a diferencia del método de soldadura por fricción (FSW), no existe traslación lineal. Al retirarse la herramienta, y tal como se ve en la última parte del esquema representado en la Figura 1, queda un agujero característico (Weld Keyhole) el cual no resulta estético y genera algunos problemas en las propiedades finales de la soldadura. Un ejemplo del proceso se puede ver en forma esquemática en la Figura 1.

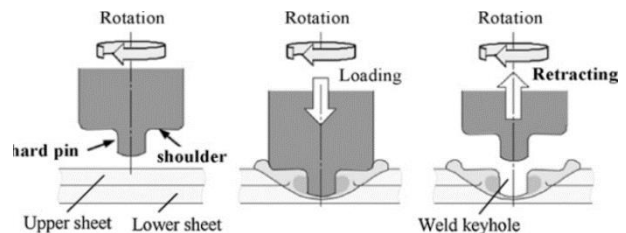


Figura 1. Proceso Completo de Soldadura por Fricción-Agitación [7].

Las variables más importantes de este proceso son: la velocidad de rotación, la carga axial, la velocidad de penetración, el tiempo de residencia, la herramienta utilizada, el espesor a soldar, las características del anclaje, la preparación de las juntas y la penetración del pin [5].

En cuanto a la herramienta, las características principales que influyen en la soldadura son la geometría (cónica, roscada, cilíndrica), la altura y el diámetro del pin, el diámetro del hombro y la forma del hombro y del pin [6].

Los barcos fabricados en la Argentina poseen reconocimiento internacional, ya sea por la presencia en mercados externos, el prestigio de diseñadores de nuestro país o la participación en competencias internacionales de embarcaciones deportivas.

En la técnica de fabricación de un barco se utiliza un sistema constructivo basado en un esqueleto constituido por perfiles y chapas, que se cortan con un modelo y posteriormente se reviste con chapas de aleación 5083, tal como se puede observar en la Figura 2.



Figura 2. Imágenes Representativa de la Técnica de Fabricación de Barcos. Fuente: elaboración propia

Todas estas operaciones son realizadas mediante procesos de soldadura que generalmente pueden unir aleaciones 6082, con 6082, o aleaciones 5083 con 5083 o aleaciones 5083 con 6082. El método utilizado es un punteo previo y, luego de fijadas y posicionadas las partes, se le da terminación al cordón.

Los proyectos más complejos tienen lugar en el diseño y proceso constructivo de barcos de mayor porte, tal como puede observarse en la Figura 3. En estos proyectos resulta complicado acceder con los equipos de soldaduras a los distintos lugares del barco, para darle forma al esqueleto y fijar las chapas de recubrimiento mediante el punteo de la estructura.



Figura 3. Fabricación de Barcos de Porte Grande. Fuente: elaboración propia.

Un problema clave en este tipo de industrias, lo constituye el punteado de toda la estructura. Este proceso obliga a utilizar largas torchas para llegar a los lugares de difícil acceso del buque y al movimiento de estas estructuras pesadas. La demanda concreta del sector es que esta tarea sea más rápida, pueda realizarse de una manera cómoda, sin demasiado movimiento de equipos, y que asegure una estructura de propiedades superiores a las obtenidas por las técnicas utilizadas actualmente como la soldadura TIG y la soldadura MIG.



Figura 4. Estructura de fabricación de un barco Fuente: elaboración propia.

2. Metodología

Para poder resolver lo planteado, se fabricó un equipo portátil de soldadura de punto por fricción-agitación (FSSW) de aplicación en la industria naval. Se evaluó la incorporación FSSW con una herramienta autónoma que permita soldar estructuras de aluminio construidas con perfiles de 3mm o más.

De acuerdo a las demandas del sector, se utilizan perfiles de aleación AA 6082, con las siguientes dimensiones: 200 mm de alto, por 3mm de espesor y por 6000 mm de largo. Estos perfiles poseen un peso de aproximadamente 10 Kg para un espesor de 3 mm, por lo cual la fuerza que debería soportar la soldadura sería de por lo menos ese valor.

El dispositivo autónomo diseñado debe permitir soldar perfiles de aleación 6082 de espesores de 3mm como mínimo con las siguientes condiciones: Puntos de soldadura con una resistencia de al menos el doble del peso del perfil, potencia y peso máximo del equipo de 5000 W y 15 kg respectivamente, puntos de soldadura de más de 20 kg de carga, con una potencia consumida menor a los 5000 W.

Se trabajó sobre el diámetro y la altura del pin y sobre el diámetro del hombro de la herramienta. En todos los casos la geometría de la herramienta es cilíndrica.

En función de los requerimientos se encontraron valores de referencia de la velocidad de rotación (V_r), velocidad de avance (V_a), la profundidad de penetración, y el tiempo de residencia (T_r). No es objeto de este documento determinar la fuerza axial aplicada sobre el perfil de aluminio debido a que utiliza un sistema hidráulico adecuado a la potencia del motor.

En cuanto a los materiales a soldar, dentro de las aleaciones de aluminio, las más utilizadas son las aleaciones AA 6082 y AA 5083, cuyas composiciones se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición de las aleaciones de aluminio más usadas en la fabricación de barcos en Argentina

Aleación	Al	Si	Fe	Mn	Mg
6082	Resto	0,7-1,3	0,5	0,4-1,00	0,6-1,2
5083	Resto	0,4	0,4	0,4-1,00	4,00-4,9

Fuente: elaboración propia.

La aleación 6082 es una aleación de la serie 6000 tratable térmicamente. La misma se utiliza con un tratamiento T5 o T6 de Solubilizado y Envejecido. La aleación se utiliza en forma de perfiles obtenidos por extrusión. La aleación 5083 de la serie 5000, lleva tratamiento de endurecimiento por trabajo en frío H 111. La aleación se utiliza en forma de chapas planas de distintos espesores: 6 mm en el fondo, 4 mm en el lateral, 4 mm en cubierta y 10 mm en la popa.

El presente artículo se centra en la aleación 6082, que constituye mayoritariamente el material de los esqueletos de los barcos, donde se aplica principalmente el método de punteo.

3. Resultados

Se realizaron estudios en aleaciones 6082 para determinar la influencia del diámetro del Pin con respecto a la carga de rotura. Para los ensayos que se realizaron se seleccionaron variables de proceso que tuvieran en cuenta datos bibliográficos referentes al comportamiento de la aleación. Los mismos especifican que T_r y V_a no influyen significativamente en el comportamiento mecánico. En tal sentido se asumieron los siguientes valores: T_r : 3 s y V_a : 50 mm/min. Si bien encontramos análisis con valores mayores de tiempo de residencia (5 o 7 segundos), se optó por un valor menor a fin de

disminuir el consumo de energía. Se eligió una velocidad de avance de 50 mm/min con el fin de lograr un mejor desempeño operativo, dado que con esa velocidad de avance se puede lograr un punto de soldadura en 20 segundos, lo que da una velocidad de proceso adecuada. En los ensayos la velocidad de rotación fue de 2000 rpm y la penetración de 3,5 mm.

En la Figura 5 se muestran los resultados de las cargas de rotura promedio para tres series de ensayos (W, Y y Z) donde se varían los diámetros del pin siendo de 3, 4 y 4.6 mm respectivamente.

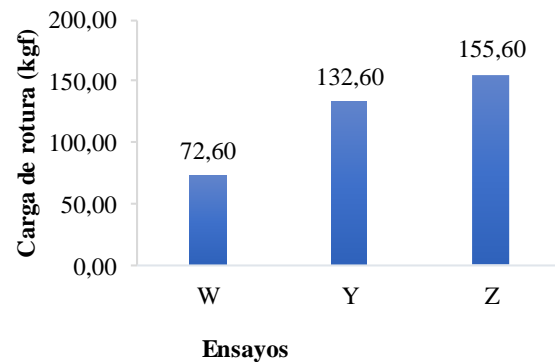


Figura 5. Cargas de rotura promedio en Kg. Fuente: elaboración propia.

Uno de los aspectos a considerar fue poder realizar soldaduras de punto por fricción agitación para espesores de 3 mm o mayores, ya que estos espesores son los más comunes en la industria naval de bajo porte, y, además, que sea realizado de manera autónoma para aleaciones de aluminio 6082.

En 2016, [8] aborda el estudio de soldaduras por FSSW de aleación AA 6082 con espesores de 3 mm. Si bien sus resultados guardan correlación con los del presente artículo, en este se ha tenido en cuenta la influencia del tamaño del pin en ausencia de penetración del hombro. Por otra parte, el trabajo [8] no tiene en cuenta el consumo de potencia, ni plantea la posibilidad de soldar espesores de 4 mm. Tampoco [9] y [10] abordan el estudio de soldadura de aleaciones AA 6082 de espesores de 3 mm, con ausencia de participación del hombro, la posibilidad de soldar espesores mayores, ni analizan el consumo de potencia.

Los ensayos mostrados en la figura 5 corresponden a espesores de 3mm con valores de consumos de potencia menores a los 5000 watts. Es importante mencionar que el hombro no penetra en la placa, solo contiene el material ascendente producto de la penetración del pin que desplaza material hacia la parte superior. Este efecto

es el de un aplastamiento del material que permite una mejor mezcla del material agitado.

El aumento del área del pin aumenta claramente la cantidad de material desplazado lo que permite tener mayor cantidad de material involucrado y una mayor área de soldadura. El aumento de la superficie de contacto entre la herramienta y el material produce una mayor zona de agitación y una mayor área de soldadura, lo que deriva en una mayor carga de rotura. El efecto de la variación del diámetro del pin toma importancia a partir de que el efecto de agitación y mezclado del material por parte del hombro es mínimo, casi despreciable.

En la Figura 6 se observa la correlación entre el área del pin y los valores obtenidos de carga de rotura, cuando el efecto del hombro es despreciable.

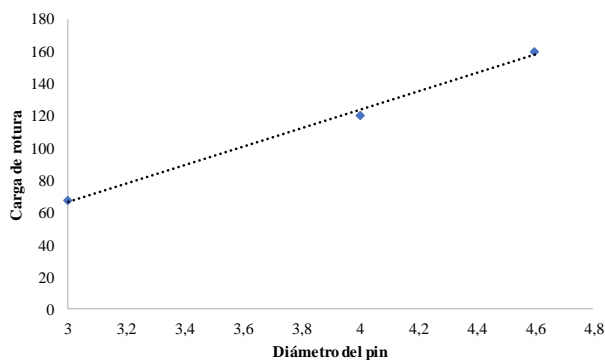


Figura 6. Correlación entre diámetro del pin (mm.) y la carga de rotura (Kgf). Fuente: elaboración propia.

El perfil de dureza correspondiente a las series de probetas X, Y y Z fueron similares a los perfiles de dureza descritos en la bibliografía para soldaduras por FSSW de aleaciones de aluminio 6082.

El análisis de soldaduras con espesores mayores a 3 mm, condicionado a consumos de potencia menores de 5000 watts, fue analizado previamente mediante una simulación numérica utilizando el método de los elementos finitos. El análisis numérico fue validado previamente para soldaduras de 3 mm. Los resultados de la simulación posibilitan la realización de soldaduras por FSSW con espesores mayores a 3mm. Posteriormente, se realizaron análisis experimentales con buenos resultados en soldadura de aleaciones 6082 en 4mm de espesor con consumos de potencia menores a 5000 watts. Vale aclarar que las investigaciones sobre la soldadura de aleaciones 6082 no mencionan la posibilidad soldar 4 mm.

Hay dos aspectos relevantes relacionados al proceso de soldadura por fricción agitación para que el consumo de potencia sea mínimo. En primer lugar, la forma de la

herramienta y, en segundo lugar, la profundidad de penetración del hombro de la herramienta en la lámina superior.

Los aspectos geométricos críticos de la herramienta son la altura y el diámetro del pin y el diámetro del hombro. La altura del pin óptima, según se ha determinado en estos casos, es 1 mm mayor que el espesor de las placas a soldar. Esto permite realizar una fluidificación del material antes de que el hombro se apoye en la placa superior. Una de las razones de este aspecto es que la penetración del hombro sobre la placa superior aumenta de manera muy fuerte el consumo de potencia.

En cuanto al diámetro del hombro, debe ser lo menor posible, en este caso se tomaron valores de diámetro del hombro de 3 a 4 veces el diámetro del pin utilizado. El hombro y el pin actúan como la pared y el pistón durante un proceso de extrusión de aluminio. En este proceso el material fluidificado se mezcla a los costados del pin y asciende. Este material que se mueve en forma ascendente es retenido por el hombro que lo comprime y produce una nueva mezcla de material de las dos aleaciones. Claramente el aumento de la zona de penetración del hombro sobre la placa superior aumenta el área de soldadura de las dos placas, debido al efecto de mezclado de los materiales ascendentes.

Una de las maneras de disminuir el consumo de potencia en el proceso de FSSW, es evitar que el hombro penetre demasiado en la placa superior y que el área de contacto del hombro sea la menor posible. Esta acción trae como consecuencias que el área de soldadura sea sensiblemente menor. No obstante, como el objetivo de este proceso es resolver el tema del punteo, no se requiere grandes valores de carga de trabajo.

En la Figura 7, se observa una soldadura de punto por fricción-agitación de una aleación 6082 y en la Figura 8 una soldadura de punto por fricción-agitación de una aleación 6063. En esta última, la posición donde comienza el hook es muy cercana a la impronta dejada por la herramienta. En la Figura 7, la altura del hook es muy alta y la zona de unión es muy pequeña. Se compara el tipo de hook y área de agitación que se obtienen con la 6082 respecto a la 6063, la 6082 presenta un hook alto y un área de agitación muy pequeña respecto a la 6063. Esto se fundamenta en las distintas propiedades mecánicas que poseen las dos aleaciones como se ve en la Tabla 2.

La aleación 6082 posee mayor dureza, resistencia mecánica y límite de elasticidad, mientras que una menor capacidad de deformación plástica. Si se tiene en cuenta que el material es más resistente y con menor

deformación, es posible pensar que para parámetros operativos de proceso similares el área de agitación y la zona de unión serán menores como puede verse al comparar la Figura 8 y la Figura 7.

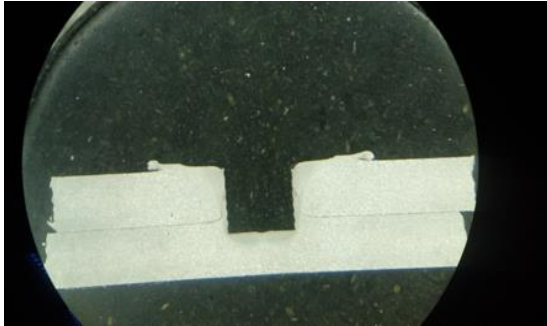


Figura 7. Macroscopía de aleación 6082 con baja penetración del hombro. Fuente: elaboración propia.

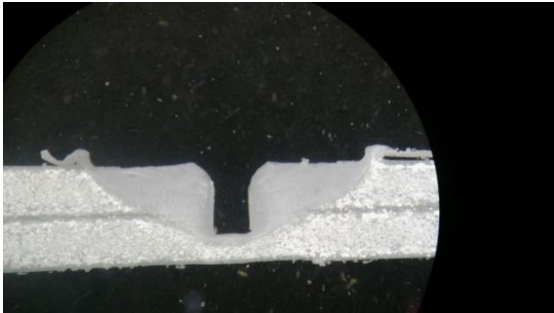


Figura 8. Macroscopía de aleación 6063 con mayor penetración del hombro. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio 6063 y 6082, con TT T5

Propiedades mecánicas	AA 6063 T5	AA 6082 T5	%
Carga a la rotura(N/mm ²)	21.5	32.5	15.1
Límite elástico (N/mm ²)	17.5	27.5	15.7
Alargamiento (%)	14	11	-12
Dureza (HB)	75	90	20

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la carga de trabajo, los valores obtenidos pueden verse en la Figura 9. Las probetas W, Y y Z corresponden a los ensayos previamente descritos, la probeta P1 corresponde a una soldadura con espesor de chapa de 4 mm realizada con los siguientes parámetros: Vr:2000 rpm, Tr: 3 s, Va: 50 mm/min. Las características

de la herramienta fueron: 3 mm de diámetro de pin, altura de pin de 6 mm, un diámetro de hombro de 12 mm y una penetración de 7 mm.

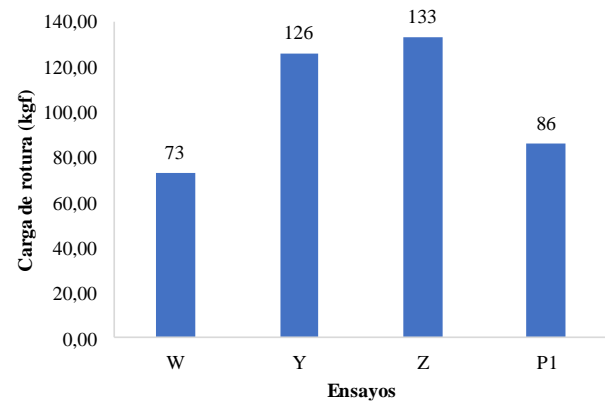


Figura 9. Resultados de carga de trabajo en Kg. de las distintas probetas.

En todos los casos los valores obtenidos son ampliamente superiores al valor requerido por el proceso de fijación de los perfiles de aluminio de 48 kgf que es el peso del perfil a unir. En la muestra P1, los valores son bajos debido a que el pin tiene el mismo diámetro que 3 mm de espesor. Es lógico pensar que la resistencia mecánica de las placas soldadas se relaciona con el volumen de material deformado, y este a su vez con el ancho de la unión obtenida.

En cuanto a la dureza, los valores obtenidos, como así también los perfiles obtenidos de la misma, son similares a los encontrados en la bibliografía para casos similares. En las pruebas realizadas los valores más bajos encontrados son del orden de los 70 HV0.3. Los perfiles obtenidos indican la forma característica reportada por la literatura existente, donde se produce una disminución importante en la zona termo mecánicamente afectada producto de la redisolución de las fases endurecedoras, es también en esta zona donde suele iniciarse la rotura.

Otro aspecto es que la zona de caída de la dureza se encuentra en una posición muy cercana a la zona donde se encuentra el agujero dejado por el pin, esto se debe al poco ancho de la zona de agitación, que mueve hacia el agujero las distintas zonas características de la soldadura.

El consumo de potencia es uno de los aspectos críticos, el éxito para poder construir una máquina autónoma de FSSW residió en acotar la potencia necesaria para generar una unión con un equipo que no tenga un peso excesivo.

En la Figura 10, se relaciona la potencia consumida entre la probeta Y descrita anteriormente y la probeta M que

fue soldada bajo una V_r de 2000 rpm, T_r de 3 segundos y V_a de 50 mm/min, con una herramienta de 4 mm de diámetro de pin, altura de pin de 4 mm, un diámetro de hombro de 12 mm y una penetración de 4.2 mm.

Se determino, a partir de los ensayos, que la parte de mayor consumo de potencia se encuentra cuando el hombro entra en contacto con la placa superior a soldar, en el caso de la probeta Y, el hombro no penetró y en el caso de la probeta M el hombro penetró 0.7 mm más.

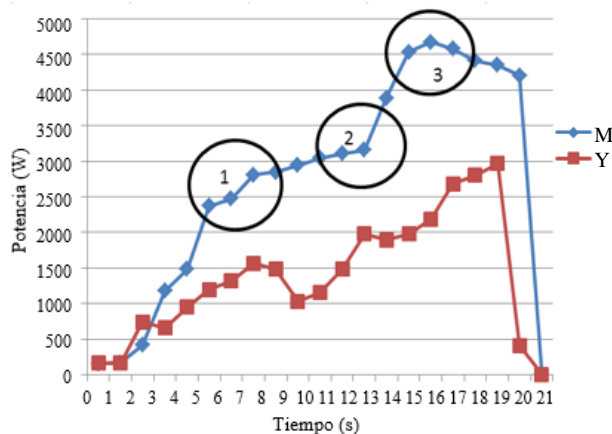


Figura 10. Potencia consumida en el tiempo.
Fuente: elaboración propia.

En la zona 1 se observa el inicio de la penetración, el consumo de potencia tiene una fuerte pendiente que indica el aumento rápido del consumo de potencia, debido al contacto entre el pin y la placa superior y el comienzo de la deformación plástica de los materiales.

En la zona 2 la velocidad de aumento del consumo de potencia disminuye, aunque el consumo de potencia sigue aumentando. El material se encuentra fluidificado y el proceso de agitación y mezcla de los dos materiales consume una menor cantidad de potencia.

En la zona 3 se puede ver lo que corresponde al máximo consumo de potencia impulsado por el contacto del hombro sobre la placa superior y el contacto con el material fluidificado. Se observa que la entrada en contacto del hombro produce el mayor consumo, hasta que llega al máximo de profundidad y a medida que se mantiene la herramienta produciendo la deformación plástica que conduce a la soldadura, el consumo comienza a disminuir producto de que ya no es necesario energía adicional para comenzar la deformación plástica del material.

Tal como se puede ver en el caso de la muestra M donde el hombro entró en mayor contacto con la placa que en la

muestra Y se puede ver que el perfil de consumo da un valor más alto.

En el caso de 4 mm la potencia consumida fue solo de un 10 % mayor al valor obtenido en las muestras M donde la penetración del hombro fue más importante. No obstante, el valor de consumo de potencia para soldar 4 mm es superior, alrededor de un 60 % más que en el caso donde el hombro ha penetrado menos.

4. Conclusiones

Este trabajo partió de la dificultad que tiene el proceso de fabricación de barcos de bajo porte, especialmente en lo referido al posicionamiento de las planchas de aluminio a soldar, que se ubican mediante un punteo previo. Para esto, se describió el diseño de un equipo portátil de FSSW de aplicación en la industria naval.

Se concluye finalmente que es posible realizar una soldadura por el proceso de FSSW utilizando un equipo autónomo, que pueda soldar espesores de chapa superiores a los 3 mm. con potencias menores a 5000 watts. El aumento del diámetro del pin aumenta la carga de rotura de la unión, en ausencia de una penetración importante del hombro. El perfil de dureza da una idea de la resistencia de la zona soldada. El consumo de potencia está relacionado al grado de penetración del hombro. Además, fue posible soldar espesores de 4 mm con cargas de rotura superiores a 70 kgf.

Se determino que la aleación 6082 frente a la aleación 6063, presenta conflictos, en especial la reducción importante de la zona de unión.

Referencias

- [1] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005, doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001
- [2] B. Raj Singh, *A Handbook on Friction Stir Welding*. Reino Unido, UK: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
- [3] M. Fujimoto, S. Koga, N. Abe, Y. S. Sato, H. Kokawa, "Microstructural analysis of stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 13, no. 7, pp. 663–670, 2008, doi: 10.1179/136217108X347601
- [4] C. D. Cox, B. T. Gibson, A. M. Strauss, G. E. Cook, "Effect of Pin Length and Rotation Rate on the Tensile Strength of a Friction Stir Spot-Welded Al Alloy: A Contribution to Automated Production," *Mater. Manuf.*

Process., vol. 27, no. 4, pp. 472–478, 2012, doi: 10.1080/10426914.2011.585503

[5] G. Buffa, L. Fratini, M. Piacentini, “On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 208, no. 1 – 3, pp. 309 – 317, 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.01.001

[6] N.T. Nguyen, D.Y. Kim, H. Y. Kim, “Assessment of the failure load for an AA6061-T6 friction stir spot welding joint,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 225, no. 10, pp. 1746 – 1756, 2011, doi: 10.1177/0954405411405911

[7] Hybe, “Una industria que se mantiene a flote,” *Saber Cómo*, no. 95, [En línea]. Disponible en: <https://www.inti.gob.ar/sabercomo/sc95/inti10.php>.

[8] H. Aydin, O. Tuncel, Y. Umur, M. Tutar, A. Bayram, “Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy AA 6082 T6 friction stir spot welding,” *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 24, p.p. 215-227, 2017.

[9] H Aydin, O Tuncel, Y Umur, M Tutar, A Bayram, “Tool Pin Geometry Effect on Fracture Characteristics of 6082-T6 Friction Stir Spot Welds in Lap Shear Test,” *2nd International Conference on Advanced Engineering Technologies*, [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320024232_Tool_Pin_Geometry_Effect_on_Fracture_Characteristics_of_6082T6_Friction_Stir_Spot_Welds_in_Lap_Shear_Test_2017.

[10] Z. Gao, J. T. Niu, F. Krumphals, N. Enzinger, S. Mitsche, C. Sommitsch, “FE modelling of microstructure evolution during friction stir spot welding in AA6082-T6,” *Welding in the World*, vol. 57, pp 895–902, 2013, 10.1007/s40194-013-0083-x