

# Efecto del Aporte Térmico Sobre el Comportamiento Metalúrgico de Soldaduras Subacuáticas Mojadas Empleando el Proceso FCAW-S

Patricia Sheilla Costa<sup>1</sup> , Gerardo Altamirano Guerrero<sup>1</sup> , Luis Edmundo Ramírez Luna<sup>2</sup> , Luis Antonio Guía Hernández<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Saltillo, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup>Consultores Asociados en Soldadura, Saltillo, Coahuila, México.

**Como citá:** Costa PS, Altamirano Guerrero G, Ramírez Luna LE, Guía Hernández LA. Efecto del aporte térmico sobre el comportamiento metalúrgico de soldaduras subacuáticas mojadas empleando el proceso FCAW-S. *Soldagem & Inspeção*. 2024;29:e2902. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI29.02>

**Resumen:** La soldadura subacuática mojada utilizando el proceso con alambre tubular autoprotegido ha sido foco de estudio en los últimos años debido principalmente a su mayor productividad en comparación con el proceso de soldadura manual con electrodo revestido. En la presente investigación se evalúa el efecto del aumento del aporte térmico sobre las características geométricas y microestructurales de cordones de soldadura desarrollados sobre placas de acero ASTM A36. Para este propósito, fueron realizadas tres soldaduras experimentales con diferentes velocidades de avance resultando en tres niveles diferentes de aportación térmica. Las características geométricas evaluadas fueron la penetración, el refuerzo y el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC), además, se llevó a cabo el análisis de la porosidad interna y de la microestructura en la sección transversal de cada cordón. Los principales resultados mostraron que el aumento de aporte térmico incrementa el refuerzo, la penetración y el ancho de la ZAC. Por otra parte, la microestructura de la zona de fusión consistió básicamente de ferrita y bainita, mientras que en la ZAC se detectó presencia de martensita. El análisis general de los resultados indicó que es posible obtener soldaduras clase B según el código de soldadura AWS D3.6.

**Palabras clave:** Soldadura subacuática mojada; Proceso FCAW-S; Aporte térmico; Parámetros de soldadura; Caracterización de materiales.

## Effect of Heat Input on the Metallurgical Behavior of Underwater Wet Welding Using FCAW-S Process

**Abstract:** Underwater wet welding using the flux-cored self-shielded wire (FCAW-S) process has been the focus of study in recent years mainly due to its higher productivity compared to the shielded metal arc welding (SMAW) process. In the present investigation, the effect of an increase in heat input on the geometric and microstructural characteristics of weld beads on the ASTM A36 steel plate is evaluated. For this purpose, three experimental weld beads have been produced at different travel speeds, resulting in three different levels of heat input. The geometric characteristics evaluated were the penetration, reinforcement, and heat-affected zone (HAZ) width. In addition, the analysis of the internal porosity and the microstructure in the cross-section of each weld bead was realized. The main results showed that the increment in heat input increases the HAZ's reinforcement, penetration, and width. On the other hand, the microstructure of the fusion zone consisted of ferrite and bainite, while the presence of martensite was detected in the coarse-grained HAZ. The general analysis of the results indicated that it is possible to obtain class B welds according to underwater welding code AWS D3.6.

**Key-words:** Underwater wet welding; FCAW-S process; Heat input; Welding parameters; Characterization of materials.

### 1. Introducción

La soldadura subacuática mojada es realizada por un soldador de forma manual y utilizada en la reparación de embarcaciones, estructuras de plataformas offshore y tuberías de acero que conducen petróleo y gas desde el fondo del océano hasta las plataformas marítimas [1]. Este tipo de soldadura también puede ser empleada para la reparación de estructuras metálicas de acero y cascos de embarcaciones que estén sumergidos en ríos, represas y lagunas. Generalmente, los elementos estructurales subacuáticos están contruidos con aceros de alta resistencia y deben de cumplir con estrictos requisitos de resistencia estática y dinámica, siendo el acero estructural de bajo carbono el material más utilizado para esta aplicación.

Recibido: 16 Mayo, 2023. Aprobado: 23 Sept., 2023.

E-mail: [patricia\\_sheilla@hotmail.com](mailto:patricia_sheilla@hotmail.com) (PSC)



Este es un artículo publicado en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Attribution, que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, sin restricciones siempre que el trabajo original sea debidamente citado.

El principal reto de la soldadura mojada es evitar el deterioro de sus propiedades mecánicas cuando son comparadas con las realizadas en la superficie, ya que, el ambiente subacuático propicia la formación de poros por gases atrapados y defectos ocasionados por las reacciones químicas que ocurren en el charco de soldadura [2]. Desde un punto de vista metalúrgico, la respuesta mecánica de la soldadura se ve condicionada por el desarrollo microestructural de la misma, y a su vez, la microestructura se encuentra definida por el aporte térmico provocado por la combinación de parámetros de proceso utilizados, además de la atmosfera acuosa que da lugar a elevadas velocidades de enfriamiento. Estas condiciones pueden generar transformaciones de fase que provoquen la fragilización y degradación de propiedades mecánicas, llevando a un posible agrietamiento del componente soldado [3,4].

El proceso de soldadura subacuática, utilizando alambre tubular autoprotegido (FCAW-S), ha sido estudiado en los últimos años por varios autores en un esfuerzo por describir los fenómenos físicos que ocurren en el mismo y su efecto sobre la calidad de la unión [5-9]. El agua que rodea al charco de soldadura, las alteraciones del arco, formación de burbujas y la influencia del aporte térmico en el desarrollo microestructural son algunos de los muchos factores que afectan estas uniones. En este contexto, Chen et al. [10] estudiaron la influencia de la presión causada por el ambiente subacuático sobre la calidad de la soldadura; sus resultados reportan una influencia directa en la formación de burbujas en el campo adyacente al arco eléctrico. La influencia de la burbuja generada tiende a provocar una mayor inestabilidad en el arco, causando un incremento de la porosidad en la unión efectuada.

Por su parte, Fu et al. [11] estudiaron el efecto de la tensión eléctrica en el mecanismo de transferencia metálica de la soldadura subacuática, reportando que un método de transferencia globular de ángulo corto favorecerá la calidad de la soldadura, mientras que un mecanismo de transferencia globular de ángulo amplio deberá ser controlado para evitar la formación de salpicaduras y de imperfecciones en el metal fundido. Mendonça y Bracarense [12] señalan que la formación de las burbujas, su geometría y distribución no presentan un comportamiento uniforme. Sin embargo, de acuerdo con Wang et al. [13] un crecimiento lineal de las burbujas puede ser regulado mediante el aporte de calor suministrado, donde al incrementar el mismo, la burbuja tenderá a generar un campo de mayor protección al arco, propiciando la estabilidad de este. Este fenómeno fue estudiado por Yang et al. [6] encontrando que con una tensión eléctrica baja predominarán las burbujas de diámetro pequeño y distribución aleatoria, provocando una desviación y perturbación del arco eléctrico. En otras palabras, la correcta elección de la tensión eléctrica como parámetro de proceso, puede permitir obtener una burbuja estable que brinda un lapso de protección al arco antes de su desaparición.

Se ha reportado que, al incrementar el aporte térmico, el área de influencia de la burbuja puede favorecer la estabilidad del arco y, por consecuencia, una mejora de las propiedades mecánicas de la unión al brindar un mayor lapso de tiempo para que los gases logren evacuar la región del charco de soldadura, disminuyendo la porosidad. En este sentido, Li et al. [14] estudiaron el efecto del aporte térmico sobre la estabilidad del arco y su relación con la calidad de la soldadura en un acero E40 empleando el proceso FCAW-S. Se demostró que un incremento del mismo, utilizando un alambre con composición de fundente inadecuada, puede generar salpicaduras deteriorando la calidad de la unión. Además, este incremento permite que disminuya la velocidad de enfriamiento, lo que impacta directamente en las características geométricas del cordón de soldadura y disminuye los valores de dureza en la ZAC y zona de fusión.

En las últimas décadas, se han reportado importantes avances en la comprensión y mejora de la soldadura subacuática. Ejemplo de esto, es el uso de procesos de soldadura más productivos como el FCAW mencionado anteriormente. Sin embargo, al día de hoy no existe suficiente literatura científica reportada [15], en comparación con la disponible para el proceso con electrodo revestido SMAW, estrictamente enfocada en el análisis del efecto del aporte térmico sobre la calidad de cordones soldadura, y su inevitable impacto en el desarrollo microestructural, obtenidos con FCAW-S subacuático. Basado en lo anterior, se evidencia la necesidad de generar conocimientos técnico-científicos que permitan producir soldaduras que cumplan con los requerimientos metalúrgicos y mecánicos especificados en los códigos internacionales de soldadura. Por lo tanto, el objetivo principal del presente trabajo es estudiar y determinar experimentalmente el efecto del aumento del aporte térmico sobre las características geométricas y microestructurales de cordones de soldadura realizados sobre placa de acero ASTM A36.

## 2. Métodos Experimentales

Los experimentos de soldadura subacuática mojada empleando el proceso FCAW-S fueron llevados a cabo realizando cordones de soldadura en posición plana (1G) sobre una placa de acero ASTM A36 con longitud, ancho y espesor de 400 mm, 150 mm y 10 mm, respectivamente. La composición química del metal base es presentada en la Tabla 1. Utilizando la Ecuación 1 [16] se calculó el índice de carbono equivalente (0.35), indicando que el acero presenta buena soldabilidad.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

Para simular el proceso FCAW-S subacuático, se utilizó un alambre tubular autoprotegido que cumple con la especificación AWS E71T-GS, de 0.9 mm de diámetro y una máquina de soldadura ESAB EMP 235ic. En el proceso se utilizó corriente directa con electrodo negativo y fue necesario modificar la antorcha comercial (Tweco Spray Master 250) para su manipulación y realización

de soldaduras semiautomáticas dentro de un tanque con agua dulce utilizando un sistema de desplazamiento lineal (Figura 1). La distancia entre la punta de contacto y la pieza de trabajo (CTWD, por sus siglas en inglés) fue de 7 mm y la altura de la columna de agua utilizada fue de 30 cm, simulando condiciones de reparación de componentes subacuáticos cercanas a la superficie. Los parámetros utilizados para llevar a cabo cada cordón de 15 cm de longitud son presentados en la Tabla 2. El cálculo del aporte térmico fue realizado a partir de la Ecuación 2 [17], en la cual el valor de la eficiencia térmica ( $\eta$ ) considerada fue de 0.85.

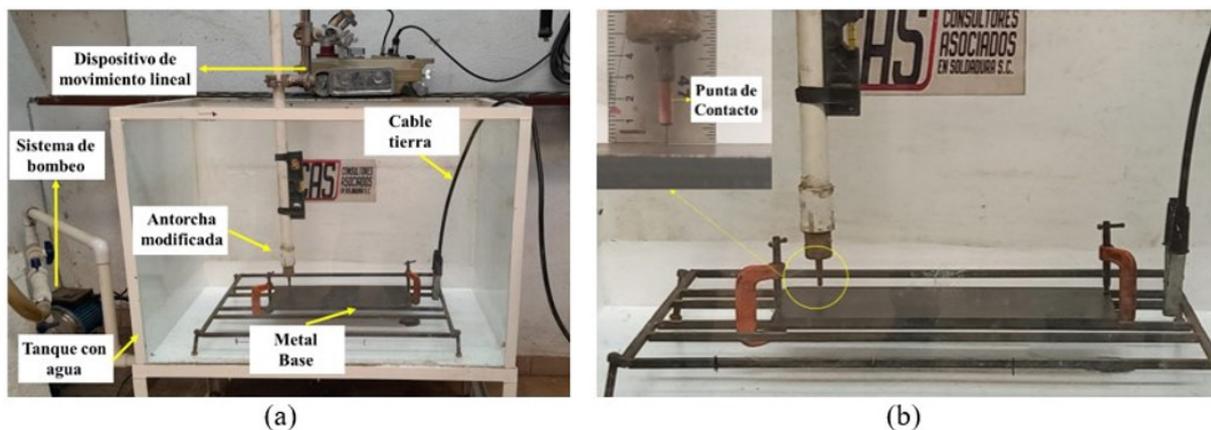
$$Q = \eta \frac{V \times A}{v} \tag{2}$$

donde Q es el aporte térmico en J/mm, V es la **tensión eléctrica**, A es la corriente de soldadura y v es la velocidad de avance de soldadura.

**Tabla 1.** Composición química del acero ASMT A36.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.242	0.115	0.603	0.0094	0.0044	0.0151	0.0018
Ni	Al	Cu	Nb	Ti	V	W
0.0096	0.037	0.0083	0.0005	0.0008	0.001	0.0003

Para la evaluación de la geometría, cada cordón de soldadura fue cortado transversalmente en el centro y las muestras fueron preparadas para análisis macrográfico utilizando técnicas convencionales de preparación metalográfica y ataque químico con reactivo Nital al 2%. A través de las macrografías resultantes se determinaron las mediciones correspondientes de penetración, refuerzo y ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 2.



**Figura 1.** Soldadura subacuática utilizando el proceso FCAW-S. (a) Configuración experimental del proceso en condiciones simuladas; (b) Detalle de la antorcha y de la distancia entre la punta de contacto y la pieza de trabajo (CTWD).

Por otro lado, para el análisis microestructural se utilizó un microscopio electrónico de barrido Jeol JSM-6610LV y mediciones de microdureza Vickers. Para este caso se volvieron a preparar las mismas muestras extraídas para análisis macrográfico utilizando el ataque con Nital al 2%. Los perfiles de microdureza fueron realizados a una distancia de 2.0 mm de la superficie del metal base empleando un microdureómetro Vickers de la marca Buehler. La carga utilizada fue de 1000 gf aplicada por 15 s. La localización y distancia entre las indentaciones fueron realizadas de acuerdo con la norma ISO 9015-2 [18].

**Tabla 2.** Parámetros de soldadura.

Muestra	Tensión eléctrica (V)	Velocidad de alimentación del alambre (m/s)	Velocidad de avance de soldadura (mm/s)	Corriente de soldadura (A)	Aporte térmico (J/mm)
II-1	24	0.148	2.2	230.3	2122
II-2	24	0.148	2.7	230.0	1729
II-3	24	0.148	3.2	219.A1	1397

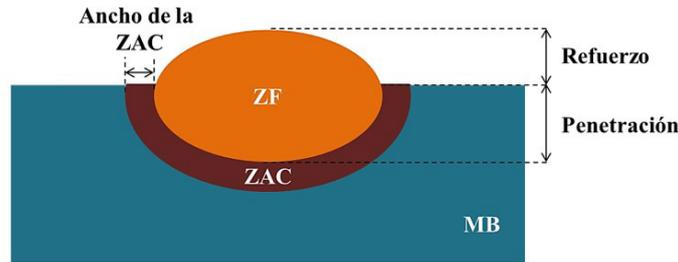


Figura 2. Sección transversal esquemática de un cordón de soldadura mostrando los parámetros de geometría evaluados. ZF: Zona de Fusión; MB: Metal Base; ZAC: Zona Afectada por el Calor.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Efecto del aporte de calor sobre las características geométricas del cordón de soldadura

Como se puntualizó anteriormente, uno de los principales problemas de la soldadura subacuática con FCAW-S es la estabilización del arco bajo el agua. Para este análisis, la Figura 3 presenta la evolución de los parámetros de soldadura durante los primeros 60 segundos de cada cordón. Los parámetros fueron obtenidos de un video en tiempo real grabado sobre el *display* de la máquina de soldadura durante la realización del cordón. De acuerdo con los gráficos de la Figura 3 se pueden apreciar picos en el inicio de ambos parámetros analizados (corriente de soldadura y tensión eléctrica) lo cual es debido al inicio de apertura del arco eléctrico. Una vez que la antorcha de soldadura avanza, esos parámetros tienden a estabilizarse.

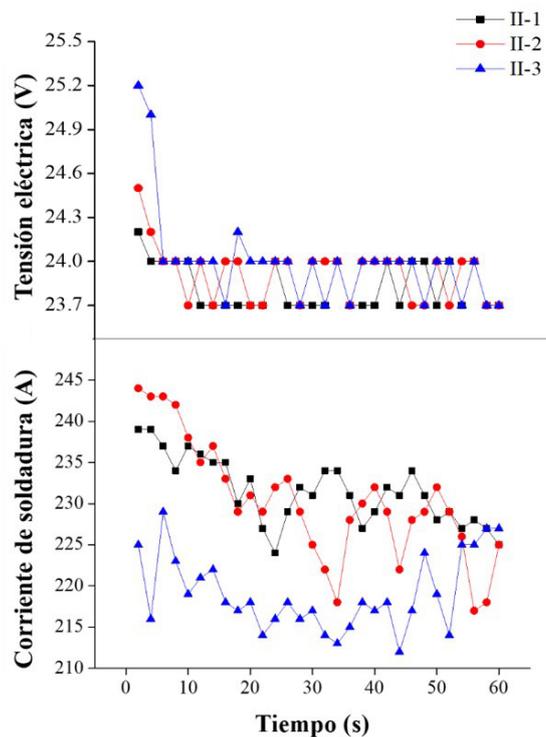


Figura 3. Evolución de los parámetros de soldadura durante los primeros 60 segundos de cada cordón realizado.

Como la máquina de soldadura utilizada es de tensión eléctrica constante, la mayor variación ocurre en la corriente de soldadura para que puedan permanecer constantes la velocidad de alimentación del alambre y la tensión eléctrica del arco. La variación de los valores de tensión eléctrica y corriente puede estar relacionado con el proceso de formación y desprendimiento de las burbujas que se forman al evaporar el agua que rodea al charco de soldadura. De acuerdo con Mendonça y Bracarense [12], las burbujas, durante su formación y crecimiento protegen el arco eléctrico, sin embargo, cuando se desprenden del charco de soldadura, permiten que el arco eléctrico quede expuesto al agua circundante, lo que genera inestabilidad en el mismo.

La Figura 4 presenta las imágenes y macrografías correspondientes de cada cordón de soldadura realizado. Como se puede apreciar, los tres cordones presentan porosidad superficial e interna, que son defectos que ocurren frecuentemente en las

soldaduras subacuáticas debido a la presencia de gases en el charco de soldadura que se quedan atrapados durante el proceso de solidificación. Otros autores como Ramírez Luna et al. [19], Chen et al. [10], Zhang et al. [20], también han reportado la presencia de porosidad en los cordones de soldadura realizados en sus trabajos de investigación. Sin embargo, para el presente caso experimental es evidente que no hay presencia significativa de porosidad superficial. El código de soldadura subacuática AWS D3.6 [21] establece que los poros superficiales con diámetros mayores a 1.5 mm deben ser contabilizados y que la sumatoria de los diámetros de cada poro en una pulgada (25.4 mm) de longitud del cordón, no debe exceder 10 mm. Sobre esta referencia, los tres cordones experimentales analizados aprueban el criterio de porosidad superficial del código mencionado.

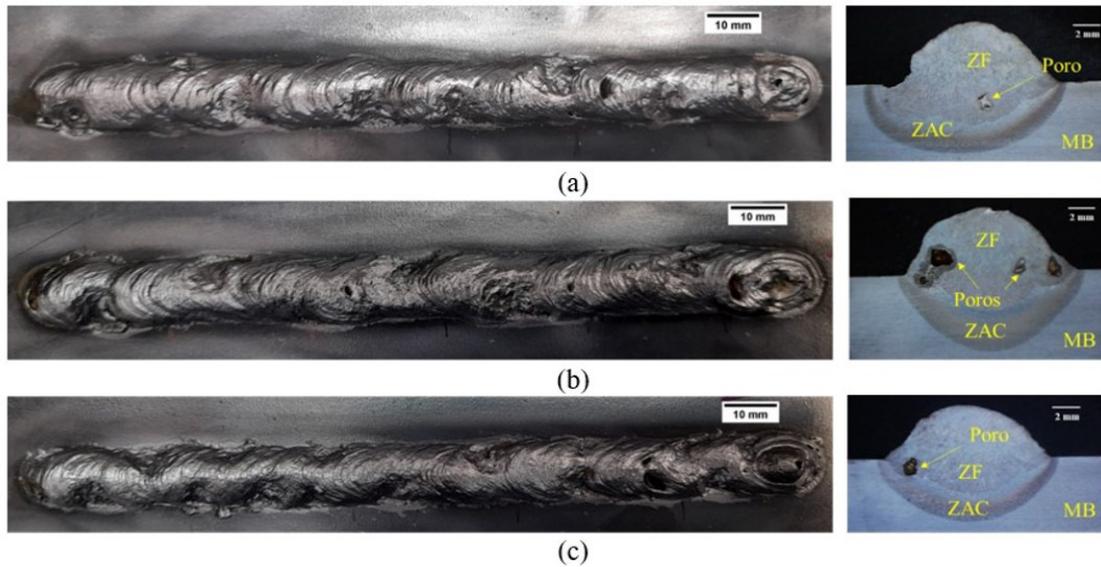


Figura 4. Cordones de soldadura realizados. (a) II-1; (b) II-2; (c) II-3. ZF: zona de fusión; MB: metal base; ZAC: zona afectada por el calor.

Por otra parte, el porcentaje de porosidad interna en las macrografías de la Figura 4 fue registrado y los resultados son mostrados en la Figura 5. Como se puede apreciar, el aumento del aporte térmico se favorece el escape de los gases producto de una solidificación del cordón de soldadura más lenta, lo cual se manifiesta en una reducción de la porosidad superficial de la soldadura. En ese contexto, el código de soldadura subacuática AWS D3.6 [21] establece que la porosidad interna de los cordones de soldadura no debe exceder 5% del área superficial y que cualquier discontinuidad debe ser menor que 2 mm en longitud. El mayor poro de la macrografía de la muestra II-2 mide 1.55 mm (Figura 4b), así los tres cordones analizados también aprueban el criterio especificado en dicho código. En este sentido, Shi et al. [22] también reportan que el aumento del aporte de calor favorece la disminución de la porosidad en soldaduras subacuáticas mojadas.

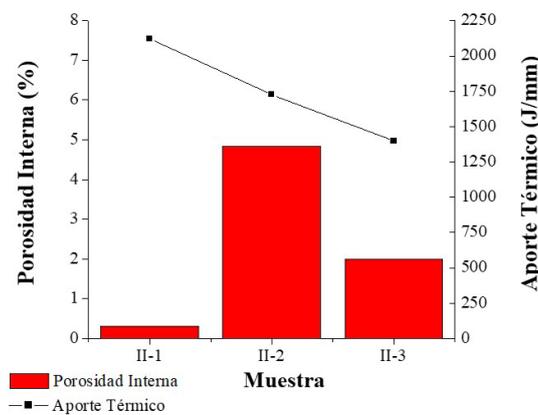


Figura 5. Efecto del aporte térmico sobre el porcentaje de porosidad interna de los cordones de soldadura evaluados.

La Figura 6 revela que, con la disminución del aporte térmico, la penetración, el refuerzo y el ancho de la ZAC tienden a disminuir. Esos resultados están de acuerdo con los reportados por Li et al. [14]. Por su parte, Emuejevoke Omajene et al. [23], también reportan

que un incremento en la corriente de soldadura tiende a aumentar la penetración y el refuerzo de los cordones realizados. Por otro lado, es evidente que la tensión eléctrica determina la forma de la sección transversal del cordón y su apariencia. Al incrementarlo con corriente constante, los cordones de soldadura resultantes tienden a ser más planos y anchos [24]. En ese trabajo de investigación, tanto la tensión eléctrica, como la velocidad de alimentación del alambre, que está directamente relacionado con la corriente de soldadura, fueron mantenidos constantes. Por tal motivo, las mediciones de las características geométricas de los cordones presentados en la Figura 6 son similares. El código de soldadura subacuática AWS D3.6 especifica que la altura del refuerzo no debe exceder 5 mm para soldaduras Clase B, por lo tanto, los tres cordones analizados aprueban ese criterio de evaluación.

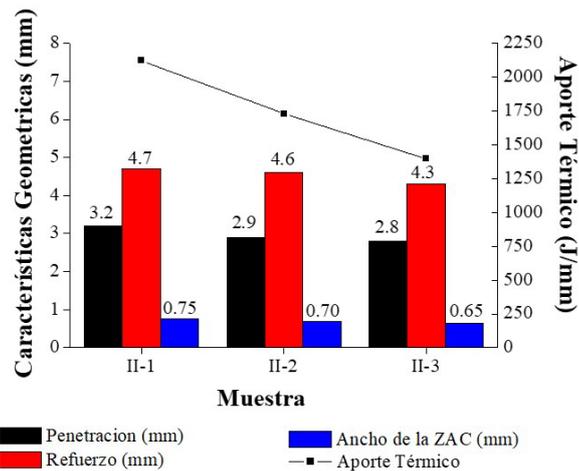


Figura 6. Análisis de los parámetros de geometría del cordón de soldadura con la variación del aporte térmico.

### 3.2. Efecto del aporte de calor sobre la microestructura y microdureza de las diferentes regiones de los cordones de soldadura

La Figura 7 muestra la microestructura del acero ASTM A36 utilizado como metal base de las soldaduras realizadas. Es posible apreciar que el acero proviene de un proceso laminado en caliente, ya que los granos son aproximadamente equiaxiales y su microestructura está compuesta por ferrita (F) y perlita (P). La medición de microdureza (137 HV) es coherente con la microestructura presentada.

Las micrografías de la zona de fusión (ZF) presentadas en las Figuras 8a-c indican la presencia diferentes tipos de ferrita mezclados con bainita. Además, es notable que, disminuyendo el aporte térmico, los valores de microdureza Vickers incrementan debido a la mayor velocidad de enfriamiento generada. Esos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura [14]. De acuerdo con Li et al. [14], para aportes térmicos entre 1600 J/mm y 3900 J/mm el  $\Delta T_{8/5}$  varía de 3.2 a 7.9 s, respectivamente, lo que resultaría en una velocidad de enfriamiento entre 93.7 y 37.9 °C/s. Basado en estos datos, para el presente estudio se puede estimar una velocidad de enfriamiento entre 93.7 y 66.6 °C/s para los niveles de aporte térmico utilizados.

Es sabido que cuando se realiza la soldadura sobre el metal base ASTM A36, la región cercana a la línea de fusión (límite entre metal fundido y metal base) pasa por transformaciones de fase que cambian la estructura inicial del acero mostrada en la Figura 7. La zona de fusión de los cordones de soldadura estudiados (Figuras 8a-c) está compuesta básicamente por bainita y los valores de microdureza son coherentes con la microestructura presente.

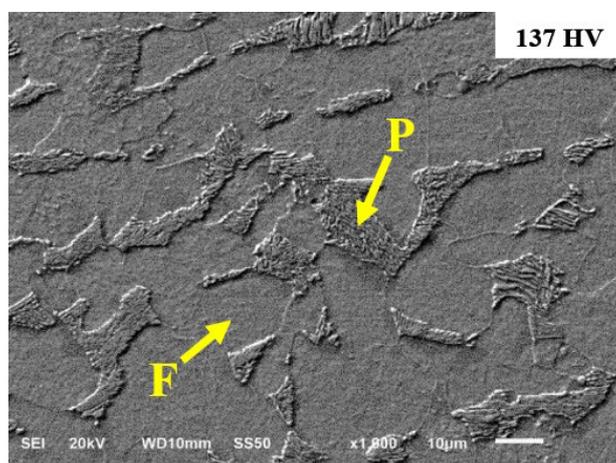
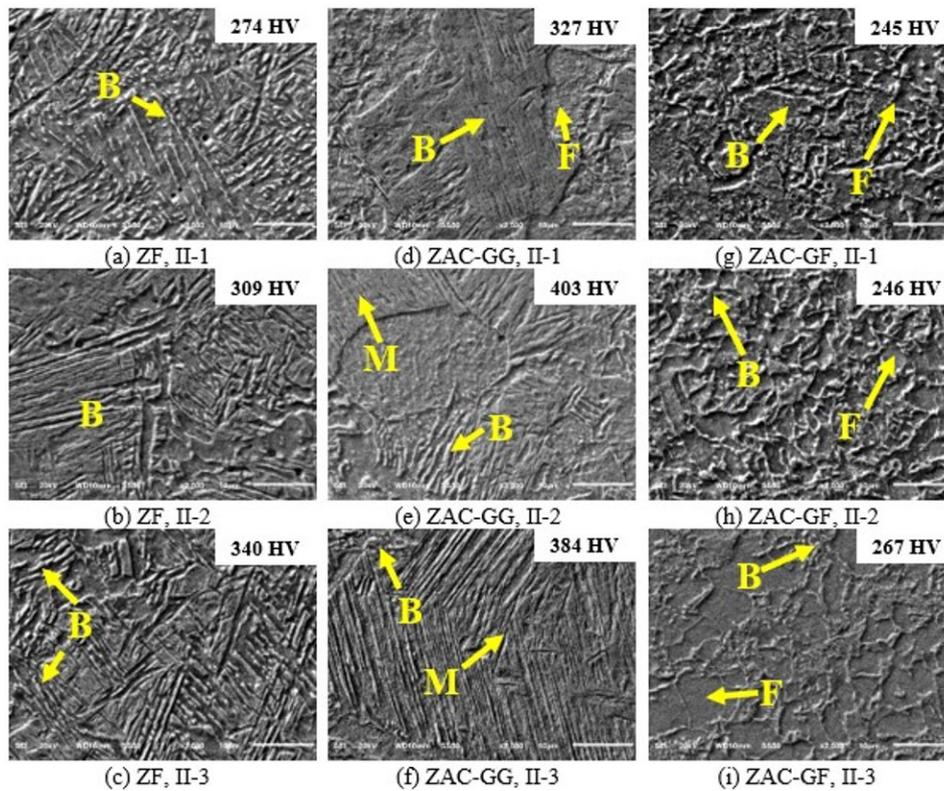


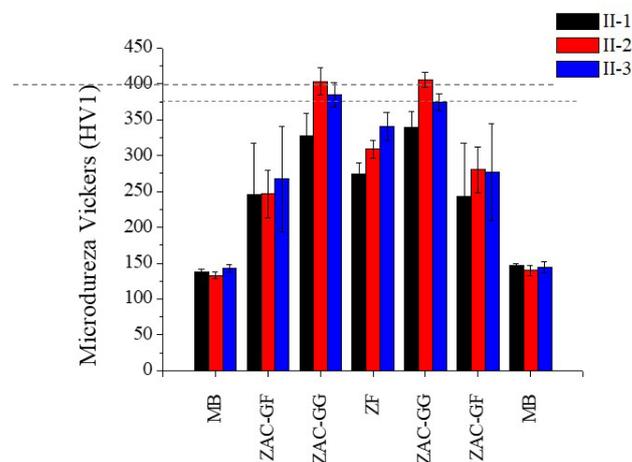
Figura 7. Microestructura del metal base, acero ASTM A36. F: ferrita; P: perlita.

Como se puede apreciar en las Figuras 8d-f, la zona afectada por el calor de grano grueso (ZAC-GG) presenta microestructuras compuestas de una mezcla de martensita y bainita, siendo los valores de microdureza Vickers coherentes con estas fases para los tres niveles de aporte de calor analizados. Para la zona afectada por el calor de grano fino (ZAC-GF, Figuras 8g-i), los granos son visualmente más pequeños que los presentados en la ZAC-GG y además se presenta como una mezcla de ferrita y bainita.



**Figura 8.** Efecto del aporte de calor sobre la microestructura de las diferentes regiones de soldadura: (a), (b) y (c) zona de fusión de las muestras II-1, II-2 y II-3 respectivamente; (d), (e) y (f) zona afectada por el calor de grano grueso de las muestras II-1, II-2 y II-3 respectivamente; (g), (h) y (i) zona afectada por el calor de grano fino de las muestras II-1, II-2 y II-3 respectivamente. ZF: Zona de Fusión; ZAC-GG: Zona Afectada por el Calor de Grano Grueso; ZAC-GF: Zona Afectada por el Calor de Grano Fino; B: Bainita; F: Ferrita; M: Martensita.

La Figura 9 presenta los valores de las mediciones de microdureza Vickers para las diferentes regiones de las uniones soldadas para los tres diferentes niveles de aporte de calor. El código AWS D3.6 especifica que para las soldaduras subacuáticas clase B el valor de medición de microdureza Vickers debe ser menor a 375 HV para todas las regiones de soldadura. Basado en ese criterio, solamente la soldadura de la muestra II-1 lo aprueba.



**Figura 9.** Evolución de la microdureza Vickers con el aumento del aporte de calor en las diferentes regiones de la soldadura. MB: Metal Base; ZAC-GF: Zona Afectada por el Calor de Grano Fino; ZAC-GG: Zona Afectada por el Calor de Grano Grueso; ZF: Zona de Fusión.

## 4. Conclusiones

El aumento del aporte térmico incrementa notablemente la penetración, el refuerzo y el ancho de la zona afectada por el calor, además, disminuye la dureza en las regiones de los cordones de soldadura realizados. Por otro lado, el porcentaje de porosidad interna disminuye con el aumento del aporte térmico debido a la menor velocidad de enfriamiento involucrada en el proceso, que permite que las burbujas de gas tengan más tiempo para escapar del charco de soldadura. Finalmente, con los resultados obtenidos es posible la proposición de parámetros de soldadura subacuática mojada para la obtención de soldaduras que cumplan con las especificaciones de clase B (código AWS D3.6), siendo: tensión eléctrica de 24 V, velocidad de alimentación de alambre (WFS) de 0.148 m/s y velocidad de avance de la antorcha de soldadura de 2.2 mm/s.

## Contribución de los autores

PSC: conceptualización, metodología, análisis formal, validación, investigación y escritura. GAG: supervisión, administración del proyecto, revisión de escritura. LERL: conceptualización, investigación y metodología. LAGH: realización de la metodología y validación. Todos los autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero para esta investigación de los fondos del Tecnológico Nacional de México (proyecto TecNM clave 17537.23P) y Consultores Asociados en Soldadura S.C. por la estructura y soporte brindado. Los autores P. Costa y A. Guía-Hernández agradecen al CONACYT por el apoyo en forma de una beca de estudios de posgrado.

## Referencias

- [1] Ramírez Luna LE, Bracarense AQ, Pessoa ECP, Costa PS, Altamirano Guerrero G, Salas Reyes AE. Effect of the welding angle on the porosity of underwater wet welds performed in overhead position at different simulated depths. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;294:1171-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117114>.
- [2] Uribe AMM, Bracarense AQ, Pessoa ECP, Santos VR. Influência da polaridade sobre a estabilidade do processo de soldagem subaquática molhada com eletrodo revestido. *Soldagem e Inspeção*. 2017;22(4):429-441. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2204.13>.
- [3] Tsai CL, Masubuchi K. Mechanisms of rapid cooling and their design considerations in underwater welding. *Journal of Petroleum Technology*. 1980;32(10):1825-1833. <http://dx.doi.org/10.2118/8527-PA>.
- [4] Hu Y, Shi Y, Sun K, Shen X. Microstructure evolution and mechanical performance of underwater local dry welded DSS metals at various simulated water depths. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019;264:366-376. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.09.023>.
- [5] Zhao B, Chen J, Wu C, Shi L. Numerical simulation of bubble and arc dynamics during underwater wet flux-cored arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;59:167-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.054>.
- [6] Yang Q, Han Y, Jia C, Wu J, Dong S, Wu C. Impeding effect of bubbles on metal transfer in underwater wet FCAW. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;45:682-689. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.013>.
- [7] Shi Y, Zheng Z, Huang J. Sensitivity model for prediction of bead geometry in underwater wet flux cored arc welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2013;23(7):1977-1984. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(13\)62686-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(13)62686-2).
- [8] Guo N, Cheng Q, Fu Y, Du Y, Zhang X, Feng J. Investigation on the mass transfer control, process stability and welding quality during underwater pulse current FCAW for Q235. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;46(2):317-327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.08.022>.
- [9] Surojo E, Putri EDWS, Budiana EP, Triyono. Recent developments on underwater welding of metallic material. *Procedia Structural Integrity*. 2020;27:14-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2020.07.003>.
- [10] Chen H, Guo N, Shi X, Du Y, Feng J, Wang G. Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018;259(2):159-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.037>.
- [11] Fu Y, Guo N, Du Y, Chen H, Xu C, Feng J. Effect of metal transfer mode on spatter and arc stability in underwater flux-cored wire wet welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;35(2):161-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.027>.
- [12] Mendonça CM, Bracarense AQ. Investigação do fenômeno das bolhas em soldagem subaquática molhada com arame tubular autoprottegido. *Soldagem e Inspeção*. 2019;24:e2416. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si24.16>.
- [13] Wang J, Sun Q, Zhang T, Xu P, Feng J. Experimental study of arc bubble growth and detachment from underwater wet FCAW. *Welding in the World*. 2019;63(6):1747-1759. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-019-00776-3>.
- [14] Li H, Liu D, Yan Y, Guo N, Liu Y, Feng J. Effects of heat input on arc stability and weld quality in underwater wet flux-cored arc welding of E40 steel. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018;31:833-843. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.013>.

- [15] Pessoa ECP, Liu S. The state of the art of underwater wet welding practice: part 2. *Welding Journal*. 2021;100(5):171-182. <http://dx.doi.org/10.29391/2021.100.014>.
- [16] American Welding Society. *Underwater welding code*. Miami: AWS; 2010.
- [17] Kou S. *Welding metallurgy*. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2003.
- [18] International Organization for Standardization. *Destructive tests on welds in metallic materials – hardness testing – part 2: microhardness testing of welded joints*. Vol. 1. Ginebra: ISO; 2003.
- [19] Ramírez Luna LE, Bracarense AQ, Pessoa ECP, Costa PS, Altamirano Guerrero G, Salas Reyes AE. Effect of the welding angle on the porosity of underwater wet welds performed in overhead position at different simulated depths. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;294:117114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117114>.
- [20] Zhang Y, Jia C, Zhao B, Hu J, Wu C. Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;238:373-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.024>.
- [21] American Welding Society. *Underwater welding code*. Miami: AWS; 2017. 148 p.
- [22] Shi Y, Hu Y, Yi Y, Lin S, Li Z. Porosity and microstructure of underwater wet FCAW of duplex stainless steel. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2017;6(5):383-389. <http://dx.doi.org/10.1007/s13632-017-0376-3>.
- [23] Emuejevoke Omajene J, Martikainen J, Kah P. Effect of welding parameters on weld bead shape for welds done underwater. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*. 2014;2(6):128-134. <http://dx.doi.org/10.11648/j.ijmea.20140206.17>.
- [24] Arias PAC, Meza DAG, Carmona DP, Barrada JEG. Efecto de la oscilación en la geometría de soldaduras superficiales aplicadas con GMAW cortocircuito. *Revista Colombiana de Materiales*. 2012;2:1-15. <http://dx.doi.org/10.17533/udea.rcm.11283>.