

## Manufactura de alambre tubular autoprotegido y evaluación de condiciones operacionales en soldadura submarina

### Self-Shielded tube wire manufacturing and evaluation of operational conditions in underwater welding

Orlando Mauricio Castellanos González 

Gaudy Carolina Prada Botia 

José Leonardo Jácome Carrascal  Universidad

Francisco de Paula Santander, Colombia

Andrés Mauricio Moreno Uribe 

Ariel Rodríguez Arias 

Universidade Federal de Minas Gerais, Brazil

OPEN  ACCESS

Recibido: 04/01/2021

Aceptado: 01/04/2021

Publicado: 08/06/2021

Correspondencia de autores:

andresmauriciomu@ufmg.br



Copyright 2020  
by Investigación e  
Innovación en Ingenierías

#### Resumen

**Objetivo:** Evaluar las condiciones operacionales del proceso “FCAW subacuático”, desarrollándose a su vez el primer electrodo tubular autoprotegido de tipo rutilico en latino américa. **Metodología:** Se utilizó un proceso de manufactura usado especialmente para este artículo, realizándose posteriormente ensayos de soldadura dentro de un acuario destinado para simular condiciones subacuáticas a 0.3 m de profundidad. De este modo, se analizó la geometría del cordón de soldadura y fueron caracterizadas las fases formadas en la deposición. **Resultados:** Se consiguió fabricar en laboratorio, alambre tubular relleno homogéneamente y con una circularidad notoria, comprobando a su vez que operacionalmente presenta comportamientos similares al electrodo revestido cuando es soldado bajo las condiciones de ambientes subacuáticos, observándose que en la deposición se obtuvieron cordones de soldadura sin grietas por hidrógeno. **Conclusiones:** Se demostró por primera vez, que en Colombia es posible la producción de nuevas tecnologías que permitan una mejora continua en las técnicas usadas para la reparación y mantenimiento de estructuras en alta mar, Por otro lado, se mostró una idea general de la importancia de los constituyentes del fundente, los cuales ayudan a la obtención de estructuras soldadas con características mecánicas y metalúrgicas específicas.

**Palabras clave:** Soldadura submarina, alambre tubular auto protegido, arco eléctrico, estabilidad, Offshore.

#### Abstract

**Objective:** Evaluate the operational conditions of the “underwater FCAW” process, developing in turn the first rutile-type self-protected tubular electrode in Latin America. **Methodology:** A manufacturing process used especially for this article was used, later welding tests were carried out inside an aquarium designed to simulate underwater conditions at 0.3 m depth. In this way, the geometry of the weld seam was analyzed and the phases formed in the deposition were characterized. **Results:** It was possible to manufacture in the laboratory, tubular wire filled homogeneously and with a noticeable circularity, verifying at the same time that operationally it presents similar behaviors to the coated electrode when it is welded under the conditions of underwater environments, observing that in the deposition welding beads were obtained without cracks by hydrogen. **Conclusions:** It was demonstrated for the first time that in Colombia it is possible to produce new technologies that allow continuous improvement in the techniques used for the repair and maintenance of offshore structures. On the other hand, a general idea of the importance of the flux constituents, which help to obtain welded structures with specific mechanical and metallurgical characteristics.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicle, UAV, applications, Tree of Science, systematic review, fixed wing, multicopter.

## Introducción

La soldadura submarina es una solución de reparación para estructuras semi sumergibles y astilleros; específicamente, la aplicación de esta tecnología en contacto directo con el medio acuoso, asegura menores costos y reduce los tiempos de mantenimiento en comparación con otros procesos de unión utilizados en el área offshore [1]. A pesar de que el uso de electrodo revestido sea más común, en la actualidad existe una creciente e importante tendencia en el uso de alambres tubulares autoprotegidos, [2] como una tentativa de automatizar el proceso y también, por la gran versatilidad para formular fundentes de diferentes naturalezas [3].

En relación a las particularidades de esta técnica de soldadura, el proceso flux cored arc welding (FCAW) se caracteriza por utilizar un alambre consumible y continuo, de geometría tubular, que contiene un fundente compactado [4], el cual es calentado hasta su temperatura de fusión, permitiendo la coalescencia de metales mediante la acción del arco eléctrico, establecido entre el electrodo y las piezas de trabajo a ser unidas [5,6].

Como es conocido en la literatura, se evidencia la importancia de producir electrodos autoprotegidos en laboratorio, garantizando la uniformidad del flujo interno en diferentes secciones a lo largo del alambre (taza de relleno) [7], asegurando a su vez, que las propiedades finales de los cordones de soldadura no se vean alteradas debido a posibles irregularidades en el proceso de fabricación, y dando como resultado, la manufactura de electrodos cuya deposición ayuda a la consecución de microestructuras apropiadas, como por ejemplo ferrita acicular, de gran importancia en la soldadura debido a que ayuda al aumento de la tenacidad del acero [8,9]. Asimismo, se sabe que es factor importante en este proceso, el estudio de los constituyentes del fundente, ya que está estrechamente relacionado con la transferencia de las gotas de metal, la estabilización del arco y, por consiguiente, con las propiedades metalúrgicas y mecánicas [10,11] pudiendo a su vez, actuar en la ocurrencia de defectos, siendo necesario, un análisis más profundo del fundente agregado en el electrodo autoprotegido, a partir del estudio de la viscosidad de la escoria, de la densidad de los elementos que componen tal flujo, etc.[12]

Cabe resaltar que, aunque los equipamientos del proceso SMAW tienden a ser más baratos y prácticos que los del FCAW [13]; este, por ejemplo, presenta algunas ventajas con respecto a la soldadura manual, como alta calidad del metal depositado, alta eficiencia, debido a la alta deposición (provocada por la alta densidad de corriente), soldadura uniforme (óptima apariencia visual) [14], permite la unión de grandes cantidades de aceros, en diferentes gamas de espesuras, alta productividad y alta tolerancia con relación a contaminantes que pueden ocasionar grietas [15], de ahí surge la idea para centrar el actual trabajo en el estudio del proceso de soldadura por arco con alambre tubular aplicado en ambiente acuoso, con el fin de aportar a la optimización de técnicas que permitan aumentar productividad, contribuyendo al mantenimiento y reparación de estructuras en la industria off-shore y oil & gas con características mecánicas apropiadas.

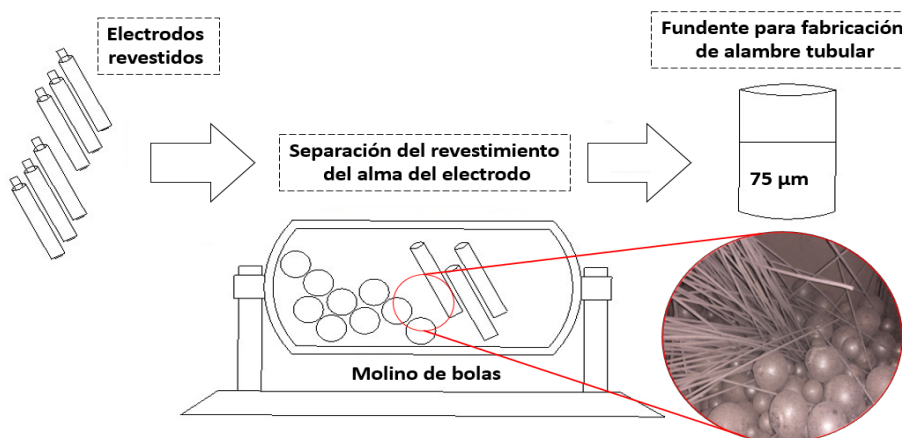
## Metodología

### *Manufactura del alambre tubular*

La fabricación del consumible se constituyó de tres etapas: preparación del fundente, fabricación y treflado del alambre, y por último, evaluación de la tasa de relleno y circularidad; las cuales a su vez, incluyeron una serie de actividades. En la primera etapa, se separó el alma del revestimiento de un lote de electrodos

de tipo rutilico de 3.25 mm de diámetro nominal, con designación AWS E6013. Para este fin, se introdujo el electrodo revestido en un molino de bolas, realizándose el proceso de molienda, tal como muestra la figura 1, y se obtuvo material triturado con granulometría igual a 75  $\mu\text{m}$  (clasificación granulométrica realizada con tamices). De este modo, el fundente resultante fue resecado en horno eléctrico a 100 °C por 2 horas, con el objetivo de retirar humedad.

**Figura 1. Esquema del proceso utilizado para la obtención del fundente. La vista de detalle muestra el alma "limpia" de los electrodos revestidos en el interior del molino.**



Fuente: Elaboración propia

La etapa siguiente, como mostrado en la Figura 2, consistió en la conformación de un perfil tipo cinta fleje (SAE 1006) con 0.50 mm de espesura y 10.00 mm de ancho, el cual pasó a través de una serie de rodillos hasta obtener una sección en formato de U; a partir de esta geometría, fue realizado el relleno con fundente de 75  $\mu\text{m}$ , el cual fue alimentado por medio de una banda transportadora y un embudo. Finalmente, el alambre pasa por un juego de rodillos de cierre. Paso seguido, el electrodo fue trefilado, realizándose varios pases con un conjunto de hiladores, hasta obtener el diámetro de 2.00 mm. Los hiladores de treflado usados presentaron diámetros internos que permitieron la reducción del área transversal del electrodo (diámetros usados en orden descendente: 4.00 mm; 3.70mm; 3.50 mm; 3.20 mm; 2.90 mm; 2.75 mm; 2.60 mm; 2.45mm; 2.30 mm; 2.20mm y 2.00mm).

**Figura 2. Esquema representativo de la manufactura del electrodo.**

$$Taza\ de\ relleno = \frac{Masa\ del\ fundente\ (gramos)}{Masa\ del\ alambre\ con\ fundente\ (gramos)} * 100$$

Fuente: Adaptado [7]

Con el consumible fabricado, fue medida la taza de relleno del electrodo, para lo cual se cortaron 5 secciones de 8.00 cm. Para pesar las muestras, se utilizó una balanza digital marca Marte con exactitud de 0.001 gramos. En un primer momento, se pesaron las muestras con fundente en su interior, tabulándose los resultados obtenidos y luego, se retiró el fundente de las secciones de alambre, abriéndolas cuidadosamente e inyectando aire comprimido, permitiendo el barrido total del material. La ecuación 1, permite percibir que la taza de relleno es una relación entre la masa del alambre con fundente y la masa del alambre sin fundente.

$$(Ecuación\ 1.1)\ Taza\ de\ relleno = \frac{Masa\ del\ fundente\ (gramos)}{Masa\ del\ alambre\ con\ fundente\ (gramos)} * 100$$

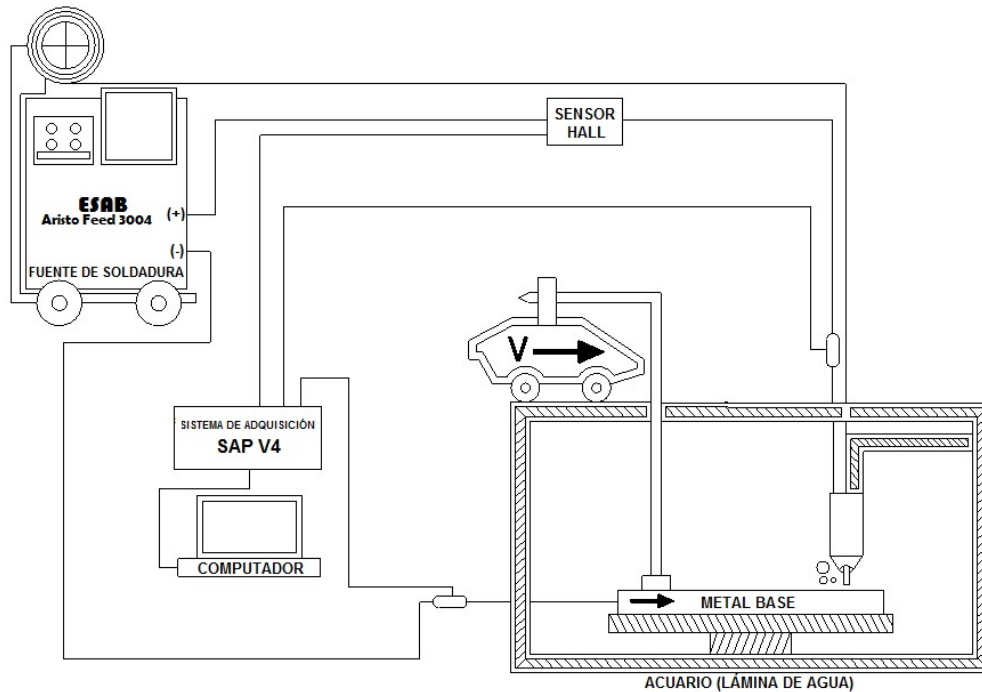
Por último, para medir la circularidad del alambre, se cortaron transversalmente 10 secciones con 1.50 cm de longitud del alambre tubular de 2.00 mm. Estas muestras fueron embutidas en resina epoxi (embutido a frío) y se realizó el lijado en las siguientes granulometrías: 80, 180, 320, 400, 600. Luego, fueron realizadas macrofotografías digitales de la sección transversal del alambre, siendo posteriormente analizada la circularidad de manera cualitativa.

### **Soldadura submarina**

Con el objetivo de caracterizar el consumible y evaluar su aplicación en el proceso de soldadura submarina, fueron realizados 3 cordones de soldadura en la posición plana, dentro de un acuario usado para simular soldadura subacuática a 30 cm de profundidad (profundidad conocida como lámina de agua), utilizando cupones de Acero-Carbono (ASTM A-36 con 50x250x15 mm), y con el uso de una fuente operando a tensión constante, como mostrado en la Figura 3. Los parámetros de soldadura impuestos en el estudio son los siguientes: distancia entre la boquilla de contacto y la pieza (DBCP = 35 mm), tensión de Soldadura (28 V), velocidad de soldadura (250 mm/min), velocidad de alimentación (3 m/min) y polaridad inversa (Electrodo Positivo). Fue utilizada agua dulce en función de la disponibilidad. La técnica operatoria consistió en accionar un gatillo que comunica al operador con la fuente de soldadura ESAB Aristo Feed 3004, permitiendo el flujo de corriente y habilitando la tensión en vacío del equipo; mientras que a su vez, ocurre la alimentación del

alambre tubular a ser fundido en el cupón de acero, generando la abertura del arco en el instante que la punta del electrodo hace contacto con el cupón; conjuntamente se acciona un dispositivo tipo “tractor”, que permite el desplazamiento del soporte del metal base a la velocidad de soldadura anteriormente mencionada (Figura 4).

Figura 3. Esquema del montaje experimental para la deposición de cordones de soldadura submarina en la profundidad de “lámina de agua” (0.3 m).



Fuente: Elaboración propia

Para mantener constante el flujo de material en el charco de soldadura, hubo una proporcionalidad entre la velocidad de alimentación y la velocidad de consumo. El registro de corriente, tensión del arco eléctrico (entre la boquilla de contacto y pieza) y velocidad del alambre, fueron recolectadas con placas de adquisición de datos articuladas a microcomputadores, a una frecuencia de 5 kHz. Para adquisición de corriente, fue utilizado un sensor de efecto Hall (transductor que convierte señales de campo eléctrico en variación de voltaje) y, para adquisición de tensión, fue utilizado un sensor divisor de tensión. Estos sistemas de adquisición de corriente y tensión, se encontraban conectados a una placa de conversión analógico/digital controlada por un programa de computador (SAP V4). Para adquisición de la velocidad de alimentación del alambre, se usó un sensor de disco óptico conectado a una placa de adquisición de datos, controlado por un programa de computador específico.

**Figura 4. Acuario utilizado para simular operaciones de soldadura submarina.**



Fuente: Elaboración propia

El estudio de las condiciones operacionales se realizó a través de evaluación de estabilidad operacional, aspecto superficial cordón de soldadura, también, con la extracción de cuerpos de prueba transversales al cordón para análisis macroestructural y microestructural (Estudio metalográfico).

De este modo, el comportamiento del arco eléctrico fue analizado con oscilogramas de tensión y corriente (mostrando niveles de fluctuación de estos parámetros durante el proceso de deposición del material) y análisis del aspecto superficial del cordón.

Para el análisis metalográfico, se hicieron macrografías con el uso de una cámara digital y micrografías en 100X de aumento con un microscopio óptico, sobre la sección central del cordón depositado. En primer lugar, se cortó la sección transversal del cuerpo de prueba de 10 mm de espesura, se embutió el corte en baquelita (embutido caliente) y se aplicaron técnicas convencionales de metalografía con lijas de agua (Granulometrías iguales a 80, 220, 400, 600, 1200). Después, se realizó el pulimiento con pasta de alúmina de 1 $\mu$ , prosiguiendo con el ataque de Nital 5% a la muestra.

## Resultados

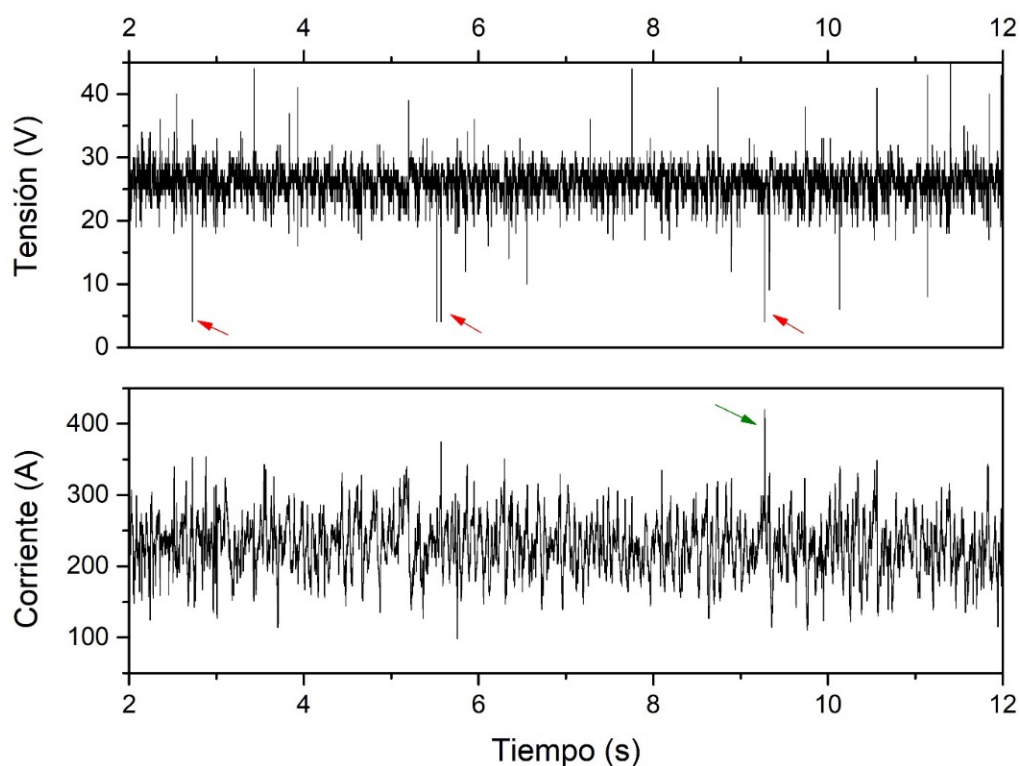
### *Estabilidad del proceso*

La Figura 5 presenta oscilogramas típicos del proceso de soldadura con alambre tubular en lámina de agua. Fueron analizados exclusivamente 10 s para los 3 ensayos de soldadura (el rango comprendido entre 2 a 12 s), con el objetivo de analizar una región cuasi-estable y libre de perturbaciones características del inicio y fin del proceso. En el oscilograma de tensión son indicados (con marcadores rojos) 3 eventos de corto-circuito si se considera un valor de tensión de referencia de 5 V; este tipo de transferencia de metal genera perturbaciones en el proceso como resultado de la extinción del arco con determinada frecuencia [16]. Como es posible evidenciar, los cortos-circuitos no acompañan una frecuencia, por lo cual

son independientes y posiblemente relacionados con la dinámica de generación de burbujas propia de la soldadura submarina. Además, la tensión promedio de operación es de 26.2 V con una desviación estándar de 1.8 V, lo que permite inferir que el tipo de transferencia metálica dominante fue por vuelo libre, ya que la baja dispersión estadística reflejada en la desviación estándar justifica ese fenómeno [17].

El oscilograma de corriente presenta una mayor fluctuación del registro y una corriente promedio de 229.7 A (desviación estándar de 37.2 A). La marca verde muestra que entre el segundo 9 al 10 se presentó un periodo en el cual el arco eléctrico estuvo extinto, ya que la corriente alcanza el valor de 400 A, lo cual representa el aumento de corriente como resultado de un puente metálico generado durante el cortocircuito.

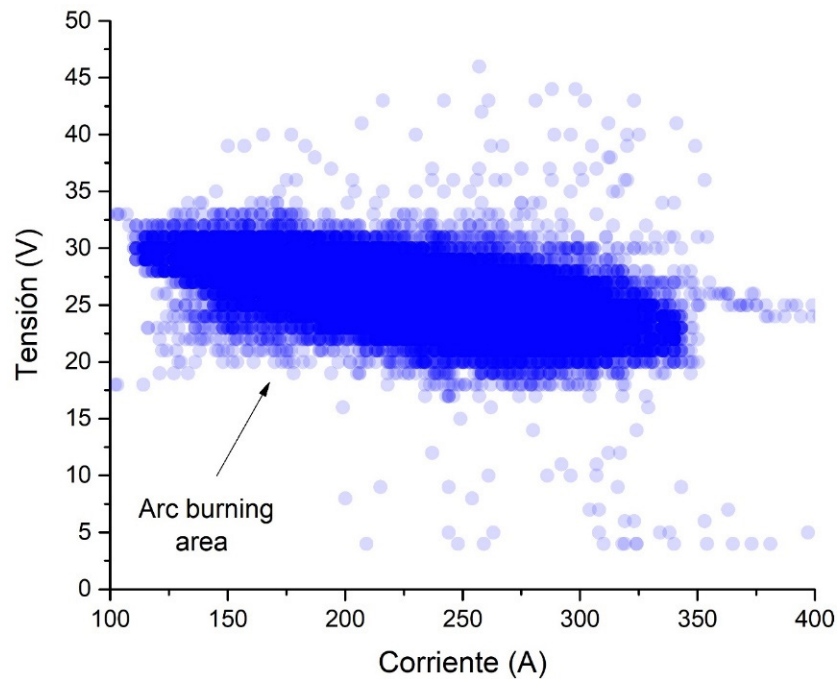
Figura 5. Oscilogramas de tensión (superior) y corriente (inferior) de soldadura con alambre tubular auto – protegido en 0.3 m de profundidad simulada.



Fuente: Elaboración propia

La Figura 6 exhibe un ciclograma de potencia con 100000 puntos que permite evidenciar la región de “arc burning” del proceso. La nube densa del centro muestra la concentración de valores de tensión, que en términos generales fluctúan entre los 20 y 30 V. Los puntos transparentes y fuera de la nube representan breves periodos en que la longitud de arco fue igual o menor a 5 V (puntos inferiores a la nube) o instantes del proceso en que hubo registros cercanos al valor de tensión en vacío del equipamiento; sin embargo estos eventos no representan inestabilidad. Según [18] un ciclograma ideal tendría la menor área de potencia posible; en este caso específico, la mayor dispersión está en los valores de corriente, lo cual sería una respuesta del tipo de fuente eléctrica.

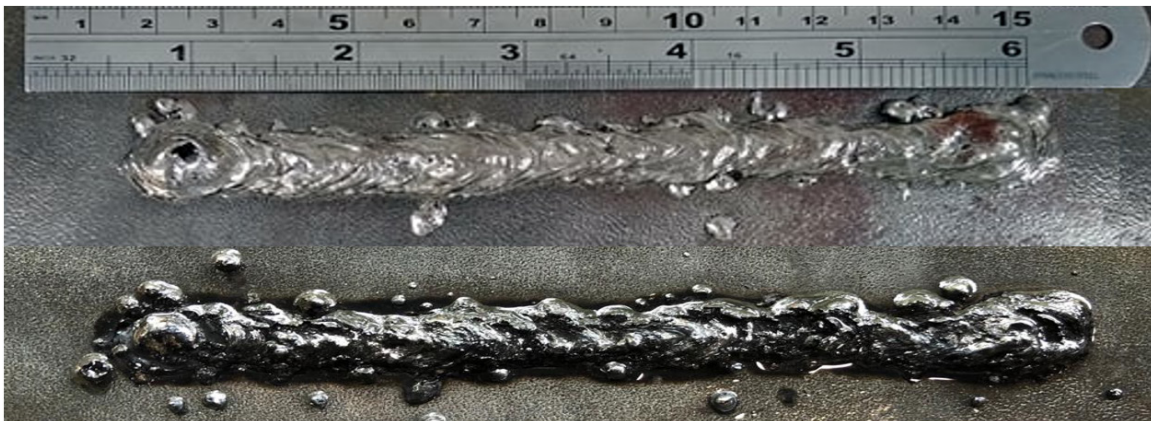
Figura 6. Ciclograma de potencia



Fuente: Elaboración propia

La Figura 7 representa la influencia de la presión hidrostática y el efecto de los parámetros de soldadura sobre el aspecto visual del cordón. Es posible evidenciar una escoria que no cubre completamente el cordón de soldadura y presenta un alto grado de porosidad; en relación al cordón, se exhiben algunos poros con destaque en el poro de la cratera, al final del cordón. En términos generales, el aspecto de la deposición es aceptable, teniendo en cuenta el contacto directo con el agua.

Figura 7. Aspecto Superficial del cordón de soldadura depositado.



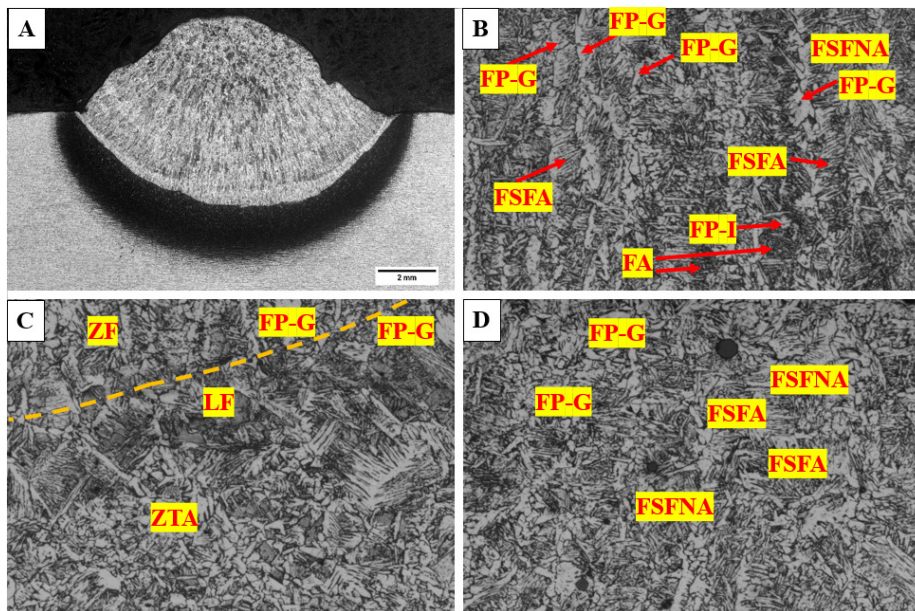
Fuente: Elaboración propia



**Morfología del cordón y fases presentes en la deposición.**

En la parte A de la Figura 8, se muestra la sección transversal del cordón de soldadura obtenido a través de microscopio óptico (Aumento 25x) y cada una de las tres secciones a analizar (Partes B, C, D con Aumento 100x). En la sección B de la figura 8, se evidencia Ferrita Primaria de Contorno de Grano FP-G, micro constituyente que lleva este nombre, debido a que comienza a nuclearse en los contornos de la austenita, además se muestra predominancia de ferrita de segunda fase alineada FSFA y ferrita de segunda fase no alineada FSFNA, mostrándose también, unas áreas con predominancia de Ferrita acicular FA y unas zonas con Ferrita Primaria Intergranular FP-I [19]. En la sección C de la Figura 8, se muestra la división entre la Zona Fundida ZF y la Zona térmicamente Afectada ZTA mediante la Línea de Fusión LF (línea amarilla punteada), viéndose una ZTA de granos grandes y una ZF con Ferrita Primaria FP-G. Finalmente, se muestra también en la parte D de la figura 6, predominancia de ferritas primarias y ferritas de segunda fase alineadas y no alineadas.

Figura 8. Sección transversal del cordón de soldadura y microconstituyentes de la zona fundida. A- sección transversal cordón de soldadura (25x), B- centro sección transversal (100x), C- Línea de Fusión Sección Transversal (100x), D- Topo Sección Transversal (100x).



Fuente: Elaboración propia

En relación a la geometría del cordón, se exhibe una sección transversal sin poros, lo cual refleja una buena protección por parte de los gases producidos en la fusión del alambre tubular. También, en el punto triple del lado izquierdo de la macrografía, se observa mordedura, la cual es resultado de las altas tasas de enfriamiento inherentes al proceso de soldadura en medio acuoso [5]. La Tabla 1 relaciona las características geométricas del cordón de soldadura (Refuerzo, ancho y penetración) con su respectiva desviación estándar. Además, un valor de dilución igual a 53,170%, parámetro definido como la participación del metal de base y de adición en el metal de soldadura [20,21].

**Tabla 1. Parámetros obtenidos del cordón de soldadura. Ar- Área de Refuerzo, Ap- Área de Penetración, x- Promedio, - Desviación estándar.**

Ancho		Refuerzo		Penetración		Ar		Ap		
No.	Valor	No.	Valor	No.	Valor	No.	Valor	No.	Valor	
1	19,221	1	3,156	1	3,332	1	20,147	1	22,761	
2	18,412	2	3,251	2	3,201	2	20,247	2	22,743	
3	18,313	3	3,331	3	3,087	3	19,752	3	22,786	
x	18,649	x	3,246	x	3,207	x	20,049	x	22,763	
$\sigma$	0,498	$\sigma$	0,088	$\sigma$	0,123	$\sigma$	0,262	$\sigma$	0,022	
							Dilución		53,170%	

Fuente: Elaboración propia

### **Caracterización del electrodo manufacturado.**

La Tabla 2 evidencia una tasa de relleno igual a 18,241%, es decir, por cada 100 gramos de electrodo; 18,241 gramos son del flujo, el restante pertenece al alambre de Acero Carbono 1006. Además, se puede notar una desviación estándar igual a 0,688; demostrando que tan dispersos se encuentran los datos tomados con respecto a la media, reflejando la variación general del proceso de fabricación del alambre, el cual se muestra como un proceso de relleno homogéneo, garantizando cantidades próximas a lo largo del electrodo.

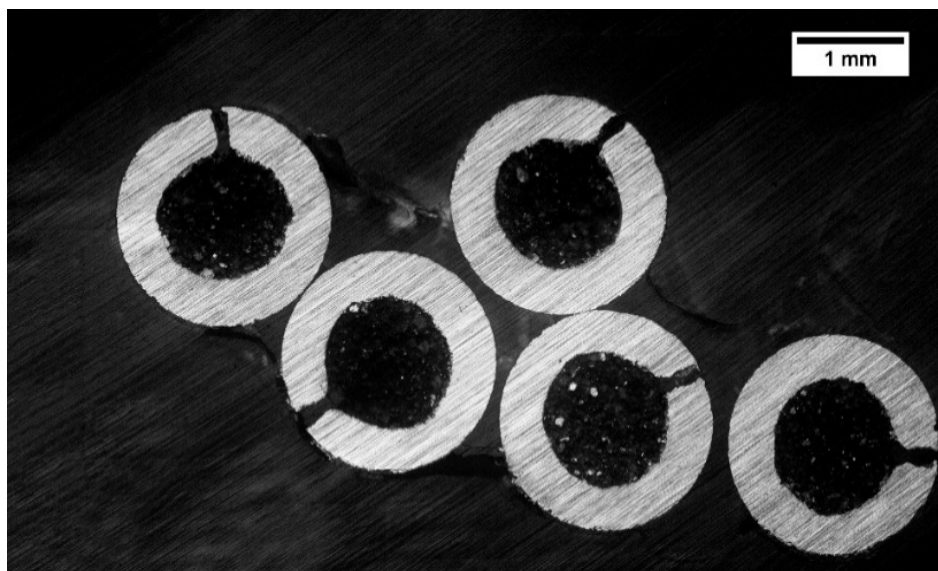
Por otro lado en la Figura 9, obtenida con microscopio óptico (Aumento=25x) de los 10 cortes transversales, se muestra una imagen característica de electrodos sin costura (cierre tipo “topo”) [17] en el cual se evidenció en todos los casos, áreas con una circularidad notoria, teniendo diámetro próximo al de un alambre perfectamente circular de sección transversal igual a 2 mm , demostrando que el proceso de fabricación utilizado en laboratorio es muy eficaz, permitiendo así que el electrodo fabricado cuente con propiedades geométricas óptimas que ayuden al desarrollo normal del proceso FCAW, evitando atascamiento en el sistema de soldadura, producto de discontinuidades en el alambre.

**Tabla 2. Promedio de valores obtenidos de tasa de relleno en las 5 muestras de 8,00 cm de longitud**

Muestras	Masa Alambre con flujo (gramos)	Masa Alambre sin flujo (gramos)	Masa de Flujo (gramos)	Taza de relleno (Porcentaje)	Media (Porcentaje)
1	1,964	1,583	0,381	19,399	18,241
2	1,931	1,591	0,340	17,607	
3	1,953	1,601	0,352	18,024	
4	1,972	1,612	0,360	18,256	
5	1,959	1,608	0,351	17,917	
				Desviación Estándar: 0,688	

Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Secciones transversales obtenidas del electrodo (Aumento= 25x)



Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

Este trabajo demostró por primera vez en Colombia, resultados satisfactorios de la aplicación de alambre autoprotegido en soldadura submarina húmeda, siendo a su vez, el primer electrodo fabricado en latino américa con estas características. Además, esta investigación muestra la soldadura con alambre tubular autoprotegido como una alternativa promisorio al electrodo revestido en el país, pues al presentar características de estabilidad operacional similares, su posible automatización lo revelan como un proceso altamente productivo, disminuyendo a su vez costos en reparación en las industrias off-shore y oil & gas, permitiendo la consecución de estructuras soldadas con características mecánicas y metalúrgicas especiales, al tener la posibilidad de adicionar distintos elementos en el fundente. Asimismo, los oscilogramas de tensión, corriente y ciclograma de potencia, permitieron demostrar que el alambre tubular autoprotegido mantiene un comportamiento similar al electrodo revestido bajo condiciones subacuáticas, permitiendo a su vez afirmar que el proceso FCAW puede ser utilizado en la soldadura submarina húmeda con total éxito, siempre y cuando se establezcan las condiciones de proceso adecuadas. Considerando a su vez la geometría de los cordones obtenidos, exhibiéndose secciones transversales sin poros o grietas por hidrogeno, reflejando la importancia de los constituyentes del fundente, los cuales causaron una buena protección por parte de los gases producidos en la fusión del alambre tubular.

## Referencias bibliográficas

1. A. M. Moreno, A. Q. Bracarense, E. C. Pessoa and V. Santos, "Influência da Polaridade Sobre a Estabilidade do Processo de Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Revestido", *Soldagem & Inspeção*, vol. 22, no. 4, pp. 429-441, Dec. 2017. DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2204.13>
2. H. Chen, N. Guo, X. Shi, Y. Du, J. Feng and G. Wang, "Effect of water flow on the arc stability and metal transfer in underwater flux-cored wet welding", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 31, pp. 103-115, Jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.11.010>.
3. E. W. Teichmann, "Contribuição ao Desenvolvimento da Soldagem Molhada com Arames Tubulares", M.S. thesis, PPGMEC, UFSC, Florianópolis, Brazil, 2000. [Online]. Available: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/78639>.
4. C. M. Starling, P. J. Modenesi and T. M. Donizete, "Caracterização do Cordão na Soldagem FCAW com um Arame Tubular "Metal Cored"", *Soldagem & Inspeção*, vol. 16, no. 3, pp. 285-300, Sep. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-92242011000300010>.
5. P. V. Marques, P. J. Modenesi and A. Q. Bracarense, *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*, 4th ed. Brazil: Elsevier, 2017.
6. G.C. Silva, "Análise Comparativa do Cordão de Solda Gerado pelos Processos de Soldagem FCAW e SMAW na Soldagem de Aços de Baixo Teor de Carbono", M.S. Thesis, FEUFJF, UFJF, Juiz de Fora, Brazil, 2016. [Online]. Available: <http://www.ufjf.br/mecanica/files/2016/07/TCC-GULLIVER-20162.pdf>.
7. E. C. Castro, "Avaliação de Soldas Produzidas por Arames Tubulares Desenvolvidos em Laboratório do Tipo Básico com Adição de Polímero como Ingrediente do Fluxo", M.S. Thesis, POSMAT, CEFET-MG, Belo Horizonte, Brazil, 2015. [Online]. Available: [http://www.posmat.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Eliana\\_Castro.pdf](http://www.posmat.cefetmg.br/wpcontent/uploads/sites/120/2017/08/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Eliana_Castro.pdf).
8. P. J. Modenesi, P. V. Marques and D. B. Santos, "Introdução à Metalurgia da Soldagem". DEMET-UFMG. <https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> (accessed Nov. 30, 2019).
9. C. T. Vaz and A. Q. Bracarense, "Influência do uso de PTFE como aglomerante em eletrodos revestidos básicos sobre a formação de ferrita acicular no metal de solda", *Soldagem & Inspeção*, vol. 19, n.2, pp. 177-189, Jun. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI1902.10>.
10. Y. Zhang, C. Jia, B. Zhao, J. Hu and C. Wu, "Heat input and metal transfer influences on the weld geometry and microstructure during underwater wet FCAW", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 238, pp. 373-382, Dec. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.024>.
11. N. Guo, W. Guo, Y. Du, Y. Fu and J. Feng, "Effect of boric acid on metal transfer mode of underwater flux-cored wire wet welding", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 223, pp. 124-128, Sep. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.04.002>.
12. G. Pereira and V. A. Ferraresi, "Avaliação da Presença de Defeitos em Soldas Realizadas pelo Processo de Soldagem FCAW na Posição Plana", in *CONEM 2016-40th Annu. Conf.*, Fortaleza, Brazil, Aug. 2016. [Online]. Available: <https://ssl4799.websiteseguro.com/swge5/PROCEEDINGS/PDF/CON-2016-0143.pdf>.
13. G. S. Hugo and B. J. Santos, "Desenvolvimento de Eletrodo Revestido impermeável para Soldagem Subaquática Molhada", in *CREEM 2010- 17th Annu. Conf.*, Viçosa, Brazil, Aug 2010. [Online]. Available: <http://abcm.org.br/anais/creem/2010/TRABALHOS/FP/FP-05.pdf>.
14. American Welding Society, *Welding Process Handbook*, 8th ed., Miami: AWS, 1991.
15. A. Q. Bracarense. (2000). Processo de Soldagem por Arame Tubular – FCAW [support material].

16. J. C. Dutra, "MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco", *Soldagem & Inspeção*, vol. 13, no. 1, pp. 19-24, Jan. 2008. [Online]. Available: [https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/artigos/2008\\_si\\_dutra.pdf](https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/artigos/2008_si_dutra.pdf).
17. J. F. Lancaster, *The Physics of Welding*, 2th ed. USA: Pergamon, 1986.
18. E. Bauné, C. Bonnet and S. Liu, "Assessing metal transfer stability and spatter severity in flux cored arc welding" *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 6, no. 3, pp. 139-148, Dec 2001. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217101101538677>.
19. S. Ando and T. Asahani, "A Study on the Metallurgical Properties of Steel Welds with Underwater Gravity Welding, Underwater Welding", in *IIW Pergamun Press Conf.*, Trondheim, Norway, Aug 1983. [Online]. Available: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9459962>.
20. D. Henao - león, A. Camilo Báez - Alarcón, y J. Bethsaid Pedroza - Rojas, "Metodología para determinar la viabilidad de generación de energía eléctrica por medio del recurso eólico", *Revista Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 6, n°. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.6.2.3108>
21. F. Oliveira, W. X. Pereira, M. C. M. Costa and C. A. C. Castro, "Characterization of the Parameters in FCAW Welding Process in Alloy Steel Using Statistics", in *WCW 2016 Conf.*, London, U.K., Jun 2016. [Online]. Available: [http://www.iaeng.org/publication/WCE2016/WCE2016\\_pp1112-1115.pdf](http://www.iaeng.org/publication/WCE2016/WCE2016_pp1112-1115.pdf).