

DOI: <https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2025-107>

# COMPORTAMIENTO OPERACIONAL DE LA SOLDADURA HÚMEDA POR ARCO CON NÚCLEO DE FUNDENTE A BASE DE NÍQUEL

**Castellanos Gonzalez, Orlando Mauricio**

Universidad Federal de Santa Catarina, LABSOLDA  
Florianópolis, Brasil

mauricio.castellanos@posgrad.ufsc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7885-4490>

**Moreno Uribe, Andrés Mauricio**

Leibniz Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde (Materials Science)  
Hanover, Alemania

uribe@iw.uni-hannover.de

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6717-0782>

**Rodríguez Arias, Ariel**

Universidad Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Brasil

arielra@demec.ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6213-0076>

**Gonçalves e Silva, Regis Henrique**

Universidad Federal de Santa Catarina, LABSOLDA  
Florianópolis, Brasil

regis.silva@ufsc.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0660-6495>

**Sanchez Quintana, Duvan**

Universidad Federal de Santa Catarina, LABSOLDA  
Florianópolis, Brasil

dsanchezq@ufpso.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2971-3453>

**Sanchez Lobo, Eduardo Jose**

Universidad Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Brasil

ejsanchezl@ufpso.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5094-2499>

## RESUMEN

El crecimiento sostenido de la industria petrolera brasileña ha incrementado el interés en los procesos de soldadura subacuática, impulsado por la necesidad de construcción y reparación de estructuras marinas. En particular, la soldadura húmeda destaca por permitir la ejecución de uniones en contacto directo con el agua, lo que contribuye a reducir costos y tiempos operativos. En este contexto, la soldadura por arco con alambre tubular con núcleo de fundente (FCAW) se presenta como una alternativa viable para trabajos de mantenimiento submarino que requieren

alta productividad y calidad. Con este propósito, en el presente estudio se desarrolló un alambre tubular autoprotegido con un 60% de níquel en peso, y se realizaron cordones de soldadura utilizando una fuente de tensión constante. El diseño experimental adoptado consideró dos factores con dos niveles: profundidad (0.3 m y 30 m) y polaridad (directa e inversa). Los resultados mostraron que la estabilidad del arco se deteriora con el aumento de la profundidad, especialmente bajo polaridad directa. Asimismo, un modelo de regresión reveló mayores valores de hidrógeno difusible en la polaridad directa y en corrientes más altas. En conclusión, el alambre tubular con núcleo de fundente desarrollado demostró calidad superficial aceptable en aguas poco profundas y menor contenido de hidrógeno difusible respecto a consumibles reportados en la literatura.

**Palabras clave:** Alambre tubular autoprotegido, consumible austenítico, hidrógeno difusible, polaridad, presión hidrostática.

### ABSTRACT

The sustained growth of the Brazilian oil industry has increased interest in underwater welding processes, driven by the need to construct and repair marine structures. In particular, wet welding stands out for enabling joints in direct contact with water, thereby reducing costs and operational time. In this context, flux-cored arc welding (FCAW) emerges as a promising alternative for underwater maintenance operations that demand high productivity and weld bead quality. For this purpose, a self-shielded flux-cored wire containing 60 wt. % nickel was developed, and weld beads were produced using a constant voltage source. The experimental design considered two factors at two levels: depth (0.3 m and 30 m) and polarity (direct and reverse). The results showed that arc stability deteriorated with increasing depth, especially under direct polarity. Furthermore, a regression model revealed higher diffusible hydrogen levels under direct polarity and at higher welding currents. In conclusion, the developed flux-cored wire demonstrated acceptable surface quality in shallow water and lower diffusible hydrogen content compared to consumables reported in the literature.

**Keywords:** Austenitic consumable, diffusible hydrogen, polarity, hydrostatic pressure, self-shielded tubular wire.

## 1. INTRODUCCIÓN

La soldadura subacuática húmeda constituye una tecnología esencial para la reparación y mantenimiento de estructuras en contacto directo con el agua, ya que, elimina la necesidad de aislamiento del entorno, a diferencia de la soldadura en seco. Esta característica reduce costos y tiempos operativos, aunque plantea desafíos como la presencia de hidrógeno y oxígeno disociados del agua, altas tasas de enfriamiento e inestabilidad del arco eléctrico. Ante estas limitaciones, se han propuesto alternativas que mejoren la eficiencia y calidad del proceso. En este contexto, la soldadura por arco con núcleo de fundente a base de níquel se presenta como una opción prometedora, gracias al uso de un alambre tubular continuo y autoprotegido que aumenta la productividad, conserva la calidad del cordón y reduce el hidrógeno difusible en el metal de soldadura. Este estudio evalúa la influencia de la polaridad y la profundidad en el desempeño de un alambre tubular experimental con 60% de níquel, con el fin de analizar su potencial en aplicaciones de reparación subacuática.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

La soldadura manual con electrodo revestido (SMAW) es la técnica más común en ambientes subacuáticos húmedos, pero la sustitución frecuente del electrodo en función de su consumo, disminuye la productividad y puede afectar la uniformidad del cordón (Cisquini et al., 2024). En este sentido, la soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW) surge como alternativa prometedora, respaldada por un número creciente de investigaciones y aplicaciones (Castellanos-Gonzalez et al., 2024). Este método emplea un alambre tubular autoprotegido de

alimentación continua, lo que incrementa la productividad y mantiene la calidad del cordón (Castellanos-Gonzalez et al., 2022). Además, ofrece la posibilidad de automatización, lo que facilita su uso a mayores profundidades y mejora la seguridad en proyectos de reparación (Castellanos-Gonzalez et al., 2025). Al igual que el electrodo revestido, el alambre tubular permite modificar la composición del fundente para añadir elementos que confieran propiedades específicas al metal de soldadura (Castellanos-Gonzalez et al., 2021). Entre ellos, el níquel ha demostrado gran relevancia. Según Li et al. (2016), este elemento favorece la formación de austenita a temperatura ambiente, la cual presenta mayor solubilidad de hidrógeno que la ferrita, reduciendo el riesgo de agrietamiento en frío (Gonçalves, 2016). Asimismo, la adición de níquel mejora tanto las propiedades metalúrgicas como las mecánicas de las uniones soldadas (Martin et al., 2011; Vaccari et al., 2025).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

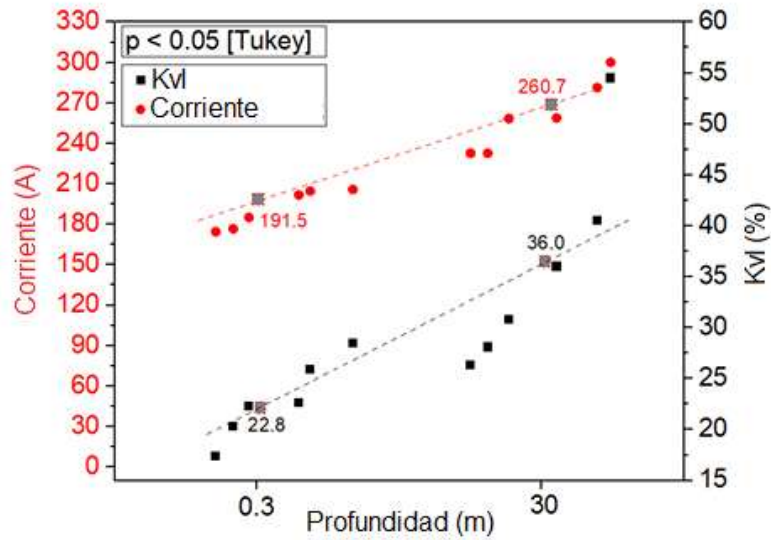
Este estudio fue de tipo experimental, con enfoque cuantitativo y alcance correlacional, orientado a analizar la influencia de la profundidad y la polaridad en la estabilidad del proceso de soldadura húmeda. Los cordones se depositaron en posición plana dentro de una cámara hiperbárica con agua dulce, simulando profundidades de 0.3 m y 30 m. Se utilizó un dispositivo semiautomático para controlar la velocidad de soldadura y alimentación del alambre, manteniendo la antorcha a 90° respecto al metal base, conforme a la bancada experimental descrita por Assunção & Bracarense (2023). El consumible fue un alambre tubular autoprotegido de 1.6 mm, desarrollado en laboratorio con un 60% de níquel en el fundente. Como metal base se emplearon placas de acero ASTM AH36 de 19 mm de espesor, cuya composición química está reportada por Castellanos-Gonzalez (2024). El diseño experimental adoptado consideró los factores de profundidad (0.3 m y 30 m) y polaridad (directa e inversa). Los parámetros fijos fueron: tensión del arco de 28 V, alimentación de 4.4 m/min, velocidad de soldadura de 25 cm/min y stick-out de 30 mm. Las señales de corriente y tensión del arco se registraron para evaluar la estabilidad, y el hidrógeno difusible fue analizado mediante regresión lineal múltiple siguiendo la metodología de Castellanos-Gonzalez (2024).

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que la profundidad influye de manera significativa en la estabilidad del arco y en la calidad de la soldadura. Al aumentar de 0.3 m a 30 m, la corriente media se incrementó en un 36%, mientras que el coeficiente de variación de la corriente (KvI), indicador de inestabilidad, aumentó de 22.8% a 36%. Este fenómeno se atribuye a la constricción del arco debido al aumento de la presión hidrostática, lo que deteriora la estabilidad del proceso (Moreno-Urbe et al., 2020). Asimismo, los ciclogramas U-I permitieron evaluar la estabilidad comparando las áreas de dispersión de puntos. El área I corresponde a la extinción del arco, el área II a la combustión estable y el área III a la región de cortocircuito (Suban & Tusek, 2003). A mayor profundidad, se observó una expansión del área III y una mayor dispersión en el área II, evidenciando inestabilidad, especialmente bajo polaridad directa a 30 m. Los cordones obtenidos a 0.3 m presentaron buena calidad superficial, sin porosidad y con adecuado ángulo de humectabilidad en ambas polaridades. Sin embargo, a 30 m se registró mayor socavado y defectos superficiales, principalmente con polaridad DCEN. Estos resultados coinciden con lo reportado por Cheng et al. (2018), quienes relacionaron el incremento de profundidad con la pérdida de calidad del cordón de soldadura.

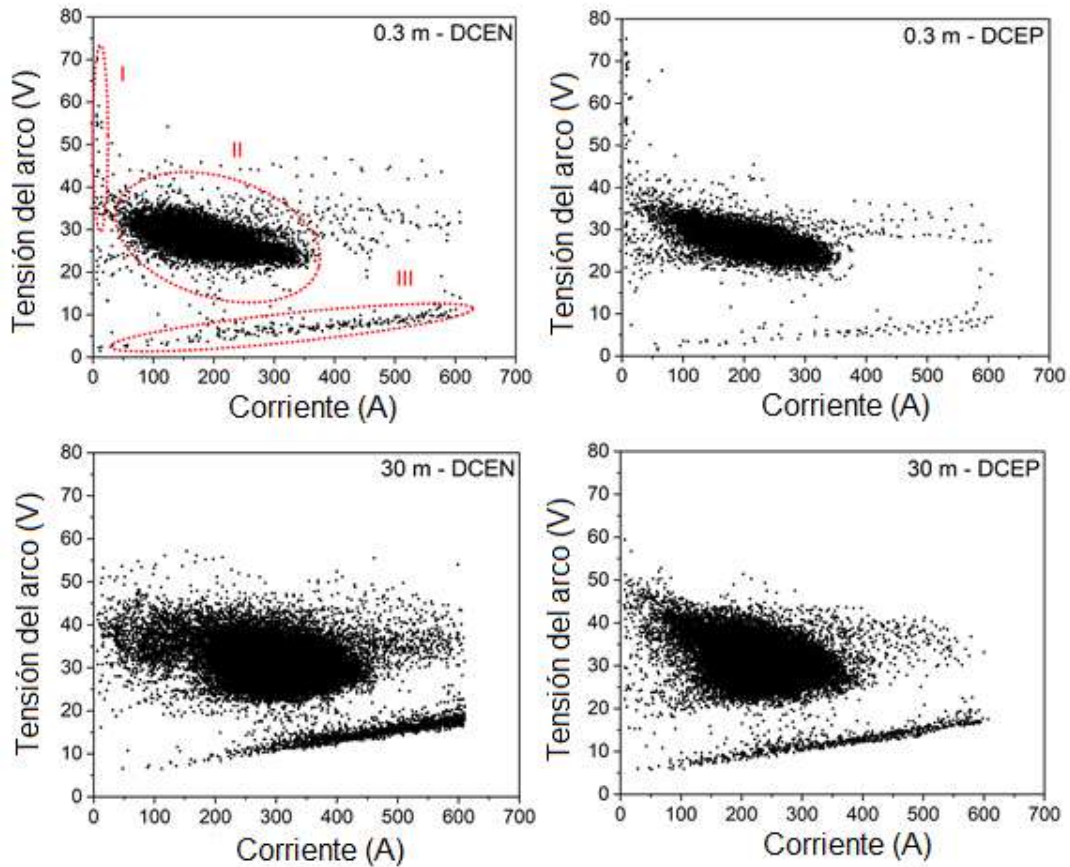
#### Figura 1

*Efecto de la profundidad en los valores medios de la corriente y coeficiente de variación de la corriente (KvI)*



**Figura 2**

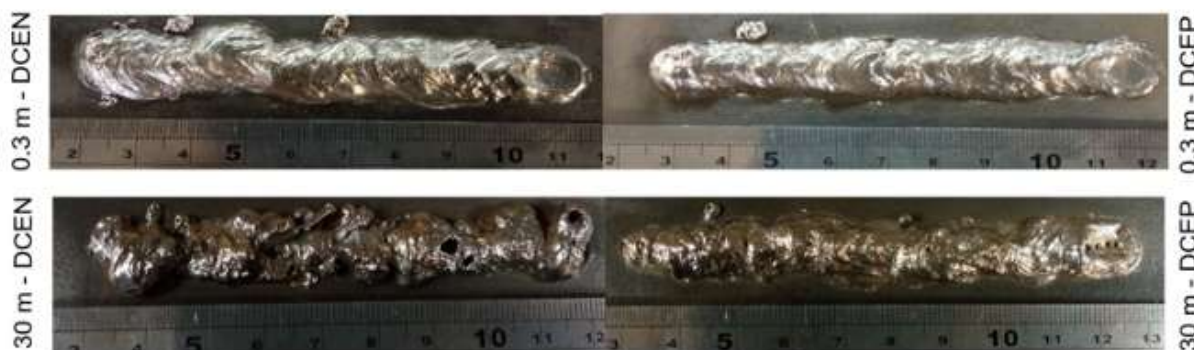
Ciclogramas U-I por cada combinación de profundidad y polaridad investigadas.



Nota. Se realizaron 12 ensayos (2 factores  $\times$  2 niveles  $\times$  3 réplicas), sin embargo, solo se presenta un ciclograma U-I representativo por combinación de profundidad y polaridad, a fin de simplificar el análisis. DCEN: Polaridad directa, DCEP: Polaridad inversa.

**Figura 3**

Cordones de soldadura por cada combinación de profundidad y polaridad investigadas.



*Nota.* Se realizaron 12 ensayos, pero solo se presenta un cordón de soldadura representativo por cada combinación de profundidad y polaridad para simplificar el análisis.

El análisis de regresión identificó la polaridad como el factor más influyente: al pasar de polaridad directa a inversa, el hidrógeno difusible se redujo en promedio para la misma corriente. Corrientes más altas, en cambio, incrementaron su contenido (Ecuación 1). A pesar del tamaño limitado de la muestra, el modelo alcanzó un  $R^2 = 0,807$ . Los valores obtenidos con el alambre tubular desarrollado (Tabla 1) fueron inferiores a los reportados para consumibles rutilicos y básicos (Klett et al., 2020; Ozaki et al., 1977), y comparables a los de electrodos austeníticos (Klett & Hassel, 2020). Estos resultados confirman que la adición de níquel es eficaz para reducir el hidrógeno difusible, ofreciendo potencial en soldadura húmeda.

$$H_{dif} = 13.64 - 4.053 * Polaridad + 0.0478 * Corriente \quad (1)$$

**Tabla 1**

Contenido de hidrógeno difusible en el metal de soldadura

Profundidad	Polaridad	Hidrógeno difusible (mL/100g)	
		Valor medio	Desviación estándar
0.3	DCEN	26.3	2.8
0.3	DCEP	18.4	2.0
30	DCEN	31.1	0.3
30	DCEP	22.0	2.3

## 5. CONCLUSIONES

La profundidad operativa mostró ser un factor decisivo en el desempeño de la soldadura húmeda con alambre tubular a base de níquel. A 30 m, la estabilidad del proceso se vio fuertemente comprometida, reflejada en un aumento de la corriente media y del coeficiente de variación. No obstante, el consumible desarrollado logró niveles de hidrógeno considerablemente inferiores a los de electrodos registrados por otros investigadores. Además, la polaridad inversa redujo el hidrógeno difusible en relación a la directa, consolidando el potencial de este consumible para reparaciones subacuáticas, especialmente en aguas poco profundas.

## REFERENCIAS

- Assunção, M., & Bracarense, A. (2023). A novel strategy to improve melting efficiency and arc stability in underwater FCAW via contact tip air chamber. *Journal of Manufacturing Processes*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.054>
- Castellanos-Gonzalez, O. M. (2024). *A study of the effect of pulsed current parameters in wet welding with a coated electrode* [Monografía de maestría, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil]. <http://hdl.handle.net/1843/73872>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Rodríguez, A., & Jácome, J. (2022). Particularidades de la transferencia metálica y la aplicación de corriente pulsada en soldadura submarina. *Revista UIS Ingenierías*, 21(4), 1–14. <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022001>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Moreno-Uribe, A. M., Sanchez-Lobo, E., Rodriguez, A., Silva, R. H. G., & Hassel, T. (2025). Pulsed shielded metal arc welding: A new approach for underwater applications. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-02095-2>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Prada, G., Moreno-Uribe, A. M., Rodríguez, A., & Jácome, J. (2021). Manufactura de alambre tubular autoprotegido y evaluación de condiciones operacionales en soldadura submarina. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(1), 167–179. <https://doi.org/10.17081/invinno.9.1.4015>.
- Castellanos-Gonzalez, O. M., Sanchez-Lobo, E. J., Fydrych, D., Silva, B., Fagundes, J. G., & Moreno-Uribe, A. M. (2024). Operational performance and weld bead characteristics of experimental tubular-wires for underwater welding. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 18(8), 433–447. <https://doi.org/10.12913/22998624/193525>.
- Chen, H., Guo, H., Shi, X., Du, Y., Feng, J., & Wang, G. (2018). Effect of hydrostatic pressure on protective bubble characteristic and weld quality in underwater flux-cored wire wet welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.037>.
- Cisquini, P., Sanchez-Lobo, E., Moreno-Uribe, A., Pessoa, E. C. P., Bracarense, A. Q., & Lins, V. F. C. (2024). Corrosion resistance of underwater wet welds produced with a new oxyrutile electrode: Influence of polarity, welding current, and depth. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46, 601. <https://doi.org/10.1007/s40430-024-05178-1>.
- Gonçalves, A. (2016). *Análise exploratória das características metalúrgicas de soldas subaquáticas molhadas realizadas com eletrodos inoxidáveis austeníticos em aço estrutural* [Monografía de maestría, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil].
- Klett, J., & Hassel, T. (2020). Reducing the risk of hydrogen-induced cold cracks in hyperbaric wet welding of high strength steels by using austenitic welding consumables. *Welding and Cutting*, 19(1), 54–60.
- Klett, J., Mattos, I., Hans, J., Gonçalves, R., & Hassel, T. (2020). Control of the diffusible hydrogen content in different steel phases through the targeted use of different welding consumables in underwater wet welding. *Materials and Corrosion*, 72(2), 504–516. <https://doi.org/10.1002/maco.202011963>
- Li, H. L., Liu, D., Yan, Y. T., Guo, N., & Feng, J. C. (2016). Microstructural characteristics and mechanical properties of underwater wet flux-cored wire welded 316L stainless steel joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.001>
- Martin, M., Weber, S., Izawa, C., Wagner, S., Pundt, A., & Theisen, W. (2011). Influence of machining-induced martensite on hydrogen-assisted fracture of AISI type 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(17), 11195–11206.

- Moreno-Urbe, A. M., Bracarense, A. Q., & Pessoa, E. C. (2020). The effect of polarity and hydrostatic pressure on operational characteristics of rutile electrode in underwater welding. *Materials*, 13(21), 5001. <https://doi.org/10.3390/ma13215001>
- Ozaki, H., Naiman, J., & Masubuchi, K. (1977). A study of hydrogen cracking in underwater steel welds. *Welding Journal*, 56(8), 231s–237s.
- Suban, M., & Tusek, J. (2003). Methods for the determination of arc stability. *Journal of Materials Processing Technology*, 143, 430–437.
- Vaccari, L., Klett, J., Scheithauer, T., Hassel, T., & Maier, H. (2025). Development of a carbon equivalent formula for underwater wet welding. *Welding in the World*, 69, 751–760.

---

Los autores del trabajo autorizan a la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología (UNICYT) a publicar este resumen en extenso en las Actas del Congreso IDI-UNICYT 2025 en Acceso Abierto (Open Access) en formato digital (PDF) e integrarlos en diversas plataformas online bajo la licencia CC: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

La Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología y los miembros del Comité Organizador del Congreso IDI-UNICYT 2025 no son responsables del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en este artículo.