

Particularidades de la transferencia metálica y la aplicación de corriente pulsada en soldadura submarina

Particularities of metal transfer and the application of pulsed current in underwater welding

Orlando Mauricio Castellanos-González ^{1a}, Ariel Rodríguez-Arias ^{1b}, Andrés Mauricio Moreno-Uribe ^{2a}, José Leonardo Jácome-Carrascal ³

¹ Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación, Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil. Correos electrónicos: mauriciocg@ufmg.br ^a, arielra@demec.ufmg.br ^b Orcid: 0000-0002-7885-4490 ^a, 0000-0002-6213-0076 ^b

² Centro Universitário Newton Paiva, Brasil. Correo electrónico: andres.uribe@newtonpaiva.br Orcid: 0000-0001-6717-0782

² Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Correo electrónico: jose.jacome@ufps.edu.co Orcid: 0000-0002-6022-6891

Recibido: 12 mayo, 2022. Aceptado: 7 julio, 2022. Versión final: 15 octubre, 2022.

Resumen

En este trabajo son expuestos los tipos de transferencia metálica presentes en soldadura a arco eléctrico con alambre tubular y las principales características de la técnica de corriente pulsada aplicada en soldadura submarina húmeda. Para esto, fue fundamental recopilar y analizar la información de diferentes investigaciones, condensadas en artículos de carácter técnico-científico. Este documento se divide en dos secciones: en un primer momento, se dilucida el efecto que tienen los parámetros y condiciones del proceso, sobre el tipo de transferencia de metal. Además, es presentada la aplicación de la corriente pulsada, y su efecto sobre el control del tamaño de las gotas de metal, así como su frecuencia y modo de desprendimiento desde el electrodo, hasta el charco de soldadura.

Palabras clave: arco eléctrico; transferencia por corto circuito; transferencia globular repelida; transferencia metálica mixta; alambre tubular; corriente pulsada; soldadura submarina húmeda; parámetros de proceso; frecuencia de desprendimiento de gotas; tamaño de las gotas; estabilidad del proceso.

Abstract

In this work, the types of metallic transfer present in electric arc welding with tubular wire and the main characteristics of the pulsed current technique applied in underwater wet welding are exposed. For this, it was essential to collect and analyze the information from different investigations, condensed into technical-scientific articles. This document is divided into two sections: first, the effect that the parameters and conditions of the process have on the type of metal transfer is elucidated. In addition, the application of the pulsed current is presented, and its effect on the control of the size of the metal drops, as well as its frequency and mode of detachment from the electrode to the weld pool.

Keywords: electric arc; short circuit transfer; globular repelled transfer; mixed metal transfer; tubular wire; pulsed current; underwater wet welding; process parameters; droplet detachment frequency; droplet size; process stability.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: O. M. Castellanos-González, A. Rodríguez-Arias, A. M. Moreno-Uribe, J. L. Jácome-Carrascal, "Particularidades de la transferencia metálica y la aplicación de corriente pulsada en soldadura submarina," *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 4, pp. 1-14, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n4-2022001>.

1. Introducción

La soldadura submarina (Underwater Welding – UW) es utilizada en la reparación y mantenimiento de construcciones sumergidas, como tuberías, plataformas petrolíferas en alta mar (offshore), centrales nucleares, entre otros [1]. Las técnicas de soldadura submarina se pueden dividir en dos tipos principales, método húmedo y método seco [2]. En comparación con el método seco o de hábitat, el método húmedo no requiere de equipo relativamente complejo, como una cámara hiperbárica, dispositivo de drenaje, etc. [3]. El proceso se ejecuta en contacto directo con el agua, lo que permite soldar incluso estructuras con geometrías de gran complejidad [4]. Sin embargo, el hecho de no existir ninguna barrera entre el medio acuoso y el arco eléctrico, sumado a la presión hidrostática en el local de trabajo, hacen que el proceso sea inestable [5]. Asimismo, la disociación de la molécula de agua aumenta la cantidad de oxígeno e hidrogeno, induciendo el surgimiento de porosidad y grietas en el metal de soldadura y en la Zona Térmicamente Afectada (ZTA) [6]. De este modo, el estudio de la física del arco y los mecanismos metalúrgicos involucrados, son de gran importancia para la industria y los investigadores que trabajan con mantenimiento y desempeño estructural [7].

Tal como lo establecen Grubbs et al. [8], los procesos más utilizados en la soldadura submarina húmeda están relacionados con el empleo de electrodo revestido (SMAW) y alambre tubular (FCAW). No obstante, considerando que se han ejecutado con alta frecuencia diversos estudios del comportamiento de electrodos revestidos en el ambiente subacuático [9], [10], [11], [12], [13], [14], el alambre tubular ha despertado un interés importante en la industria, debido a la mayor posibilidad de automatización del proceso de soldadura [15].

La soldadura con alambre tubular permite la unión de juntas metálicas a través de la aplicación localizada del arco eléctrico establecido entre el electrodo y las piezas de trabajo a ser unidas (comúnmente denominada como metal base) [16], [17]. El alambre-electrodo es un consumible de geometría tubular, y difiere del alambre sólido utilizado en el proceso GMAW [18], por causa de un fundente compactado incorporado en su núcleo [19].

Es importante destacar que existen dos variantes de este proceso: un modo en que la protección necesaria para la ionización del arco eléctrico y la protección del charco de soldadura es generada por la fusión del propio fundente en el núcleo, denominado alambre tubular autoprotegido, y otro en que la protección es suministrada por un gas

externo, generalmente CO₂ [16]. Así, se evidencia la importancia de desarrollar alambre tubular autoprotegido principalmente en soldadura submarina húmeda, adicionando elementos de naturaleza química diversa, tal como se evidencia en la literatura [20], [21], [22], [23], [24].

2. Transferencia metálica en soldadura submarina húmeda

Meneses et al. [25] establecen que el proceso de transferencia metálica juega un papel fundamental en la estabilidad del arco eléctrico, las salpicaduras generadas y la formación del cordón de soldadura. Guo et al. [26] demostraron en experimentos desarrollados a una profundidad simulada de 0.5 metros, que los tipos de transferencia metálica predominantes son globular repelida y corto circuito. Además, en los experimentos ejecutados por Guo et al. [27] fue posible evidenciar que en la soldadura submarina húmeda es factible encontrar transferencia mixta, cuando existen valores de tensión y corriente de soldadura específicos.

2.1. Transferencia globular repelida

Así cómo es posible observar este tipo de transferencia metálica para la técnica ejecutada al aire, cuando usado 100% CO₂ como protección gaseosa [28], mezcla 80% Argón + 20% CO₂ [29] y en atmosferas ricas en Helio y Nitrógeno [30], [31], [32]; en soldadura submarina húmeda es común la ocurrencia de transferencia globular repelida, la cual se divide de acuerdo al ángulo de desprendimiento formado entre el eje del alambre y la gota (Transferencia de ángulo obtuso y ángulo agudo) [26], [33].

2.1.1. Transferencia globular repelida de ángulo obtuso

La figura 1 muestra un esquema de los resultados experimentales de Guo et al. [33]. Durante el proceso de transferencia metálica (de 5.0595 s a 5.3025 s), la gota que se forma en la punta del electrodo es repelida violentamente desde el eje del alambre por las fuerzas repulsivas y gira alrededor de la punta debido a la variación de las fuerzas gravitacional y repulsiva. Una vez que la gota crece hasta su tamaño máximo, se desprende de la punta del alambre bajo la acción de fuerzas repulsivas que aumentan en 5.3025 s, con un ángulo de desprendimiento mayor de 90°. Mientras tanto, el voltaje del arco aumenta de 38.2 V a 42.4 V y la corriente de soldadura disminuye de 172.1 A hasta 101.4 A. La gota fundida es repelida repetidamente durante su formación y las señales eléctricas oscilan

considerablemente, indicando la poca estabilidad de este proceso de transferencia metálica.

2.1.2. Transferencia globular repelida de ángulo obtuso

Así mismo, la **figura 2** muestra los experimentos realizados por Guo et al. [33]. De 8.6290 s a 8.7955 s, la gota creciente repelida por las fuerzas repulsivas pasa por diferentes etapas: ascenso y descenso, similar a lo observado en la transferencia globular repelida de ángulo obtuso. En 8.7955 s, la gota que alcanza su tamaño máximo se separa de la punta del alambre bajo la acción de la “auto-gravedad” y el ángulo de desprendimiento es menor que 90° . Después de que la gota se transfiere a el charco de soldadura, el voltaje del arco aumenta de 37.1 V a 38.2 V y la corriente de soldadura disminuye de 219.7 A hasta 205.3 A.

2.2. Transferencia por corto-circuito

Además de ser evidenciada en experimentos desarrollados en la condición “al aire”, y para valores de tensión y corriente de soldadura relativamente bajos en diferentes formulaciones de electrodos tubulares [34], [35]; la transferencia por corto-circuito es observada en

soldadura submarina húmeda, pudiendo ser dividida en transferencia por tensión superficial y explosiva.

2.2.1. Transferencia metálica por tensión superficial

La **figura 3** muestra el proceso de transferencia metálica por tensión superficial. De 15.3815 s a 15.5760 s, la gota repelida crece gradualmente y la señal eléctrica fluctúa continuamente, similar al proceso de transferencia globular repelida de ángulo agudo. En 15.5760 s, la gota entra en contacto con el charco de soldadura, formando un puente líquido entre esta y la punta del alambre. Asimismo, ocurre un “estrangulamiento” en ese puente líquido y el voltaje del arco disminuye de 39.3 V a 6.8 V, mientras que la corriente de soldadura aumenta de 114.7 A hasta 400.1 A. Bajo la acción combinada de la gravedad, la tensión superficial y la fuerza electromagnética, la gota se transfiere para el charco de soldadura hasta que el puente líquido se quiebra en 15.5905 s, y el voltaje del arco y la corriente de soldadura regresen a su valor original. Este tipo de transferencia metálica recibe esta denominación debido a que la gota metálica hace contacto con el charco de soldadura bajo el efecto de la tensión superficial.

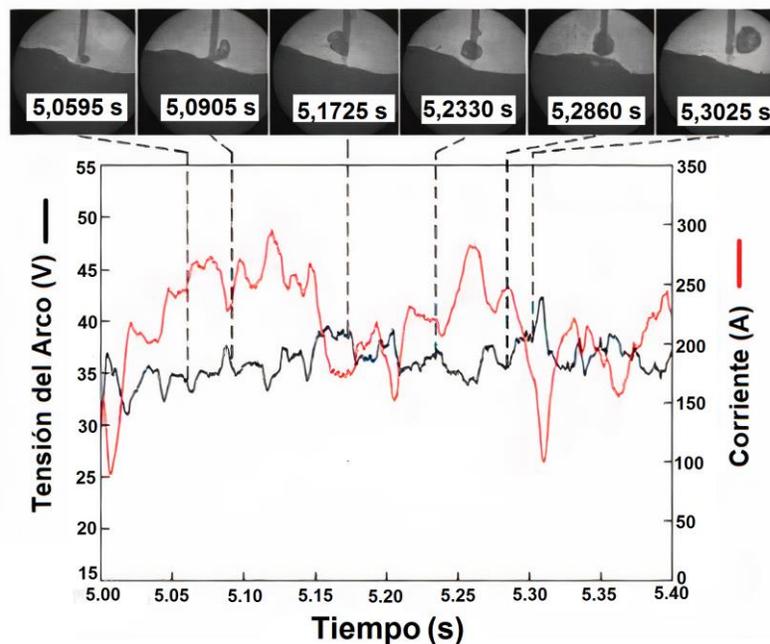


Figura 1. Imágenes capturadas con filmación de alta velocidad (superior) y oscilogramas de tensión y corriente de soldadura (inferior) evidenciando la transferencia repelida de ángulo obtuso. Fuente: adaptado de [33].

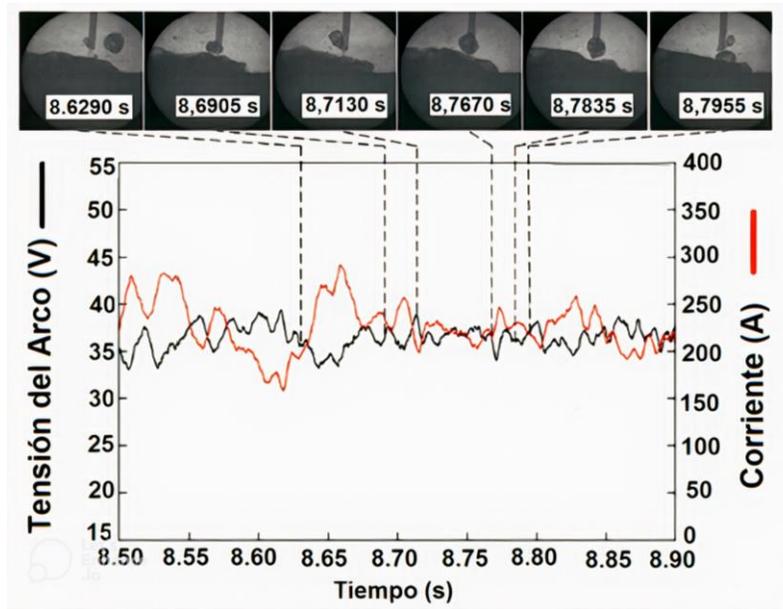


Figura 2. Imágenes capturadas con filmación de alta velocidad (superior) y oscilogramas de tensión y corriente (inferior) evidenciados en transferencia repelida de ángulo agudo. Fuente: adaptado de [33].

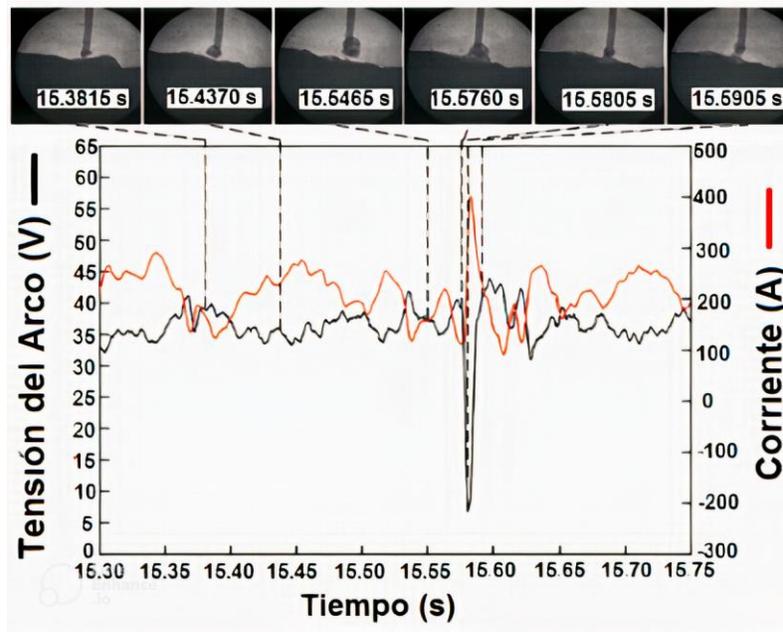


Figura 3. Imágenes capturadas a alta velocidad (superior) y oscilogramas de tensión y corriente (inferior) evidenciados en transferencia de tensión superficial. Fuente: adaptado de [33].

Debido a que el proceso es estable y no presenta salpicadura, este comportamiento es identificado en la literatura como un tipo de transferencia de masa ideal en la soldadura húmeda con alambre tubular [33].

2.2.2. Transferencia explosiva

La figura 4 muestra el proceso de transferencia explosiva. En 26.9595 s, la gota toca la superficie del charco de soldadura y no se transfiere directamente, sino que es

repelida nuevamente por las fuerzas repulsivas en 26.9955 s. A continuación, el alambre toca la superficie del charco de soldadura y, como consecuencia, la corriente de soldadura se eleva de 218.5 A hasta 497,8 A, provocando que la gota y el charco exploten violentamente y se produzca una gran cantidad de salpicaduras. Después de que ocurre esta explosión, la tensión del arco eléctrico excede los 80 V y la corriente de soldadura se reduce a cerca de 0 A en el rango de tiempo de 27.0120s a 27.0425s, lo que indica la extinción del arco en este período. Debido a la aparición de salpicaduras y señales eléctricas inestables, es indeseable este tipo de transferencia en la soldadura submarina húmeda con alambre tubular [33].

2.3. Transferencia metálica de arco sumergido

Debido al efecto de la fuerza del arco sobre la superficie del charco de soldadura, el metal líquido es empujado hacia un lado y se forma una cavidad directamente debajo del arco. En consecuencia, cuando la longitud del arco se acorta, la punta del alambre entra en la cavidad comprimida. Por lo tanto, el proceso de transferencia de metal no se puede observar claramente en las imágenes capturadas a alta velocidad, por lo que este modo es denominado transferencia metálica de arco sumergido [27], tal como muestra la figura 5.

2.4. Transferencia metálica mixta

En la soldadura submarina húmeda, el modo de transferencia de metal no se comporta de una única manera, ya que puede estar presente un modo de transferencia mixto, en función de los parámetros del proceso. Como el modo de transferencia explosiva rara vez se observa, el modo de transferencia mixto consta principalmente de tres modos fundamentales diferentes, a saber, el modo de transferencia globular repelida, el modo de transferencia de tensión superficial y el modo de transferencia de arco sumergido. Tal como muestra la figura 6, el modo de transferencia mixta está relacionada con los valores de los parámetros del proceso [27].

3. Experimentación y resultados

El uso de corriente pulsada se ha desarrollado desde los años 80, aplicándose a materiales ferrosos y no ferrosos, electrodos tubulares y sólidos, revestimientos de acero inoxidable, aleaciones de aluminio, entre otros [36].

Como se muestra en la figura 7, la soldadura con arco eléctrico y corriente pulsada es un proceso que tiene como objetivo alternar periódicamente el valor de corriente entre dos niveles (corriente base y corriente pico), cada uno con una duración en el tiempo (tiempo pico y tiempo base), con el fin de controlar la transferencia metálica [37].

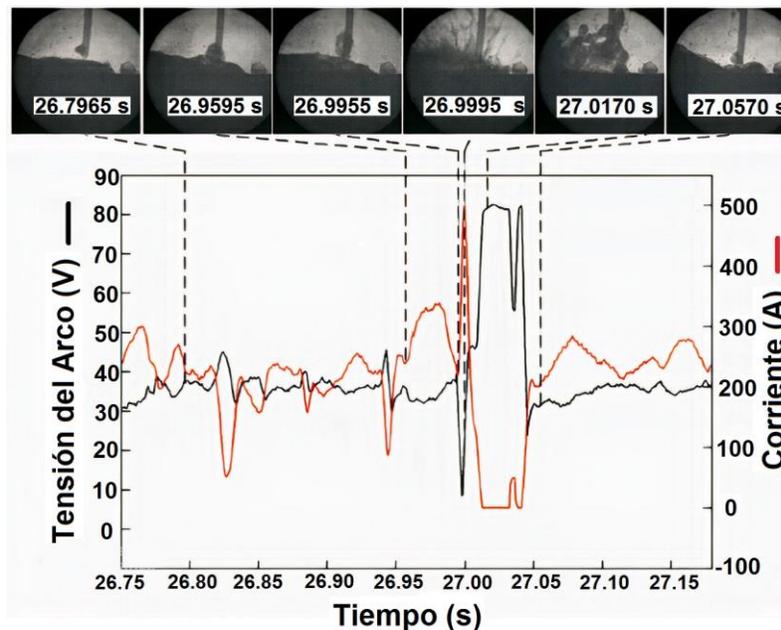


Figura 4. Imágenes capturadas con filmación de alta velocidad (superior) y oscilogramas de tensión y corriente (inferior) evidenciados en transferencia explosiva. Fuente: adaptado de [33].

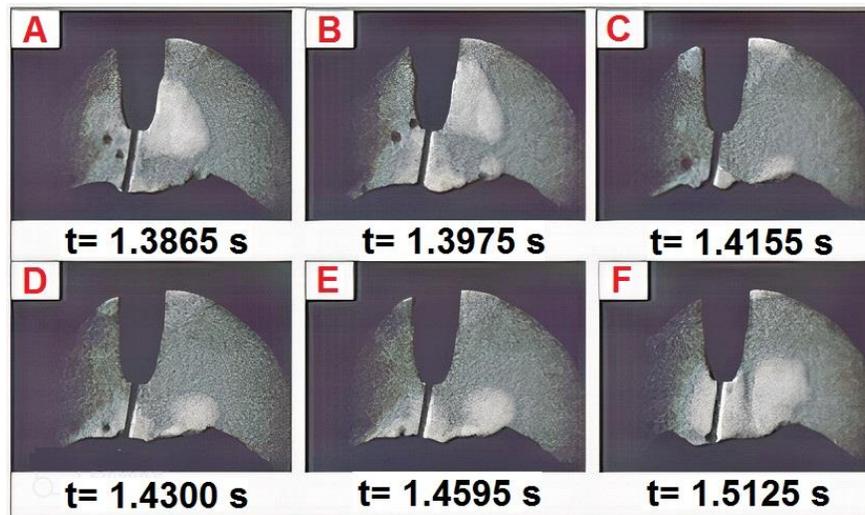


Figura 5. Imágenes capturadas con filmación de alta velocidad evidenciando transferencia de arco sumergido. Fuente: adaptado de [27].

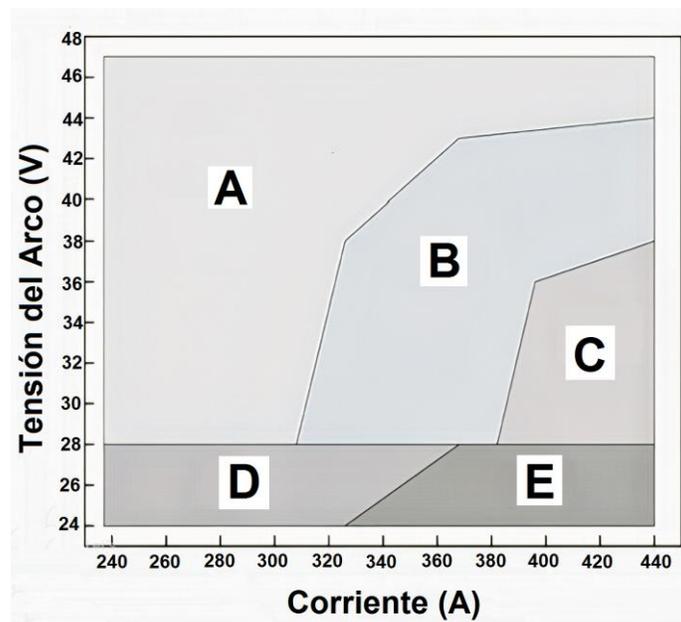


Figura 6. Diagrama de Tensión-Corriente de soldadura que ilustra la distribución de los modos de transferencia mixta: A - Transferencia globular repelida, transferencia de tensión superficial; B - Transferencia globular repelido, transferencia de tensión superficial y transferencia de arco sumergido; C - Transferencia de arco sumergido; D - Transferencia de tensión superficial y transferencia de arco sumergido; E- No se pudo realizar la soldadura. Fuente: adaptado de [27].

Para la aplicación de corriente pulsada con alambre tubular al aire, Vergara et al. [39] realizaron experimentos con alambre tubular rutilico E71T-1M de 1.6 mm de diámetro. Observaron que, para gotas con un diámetro menor al diámetro del electrodo, fue posible obtener la mayor energía de soldadura (12.6 KJ/cm), utilizando un DBCP (Distancia desde el bocal de

contacto eléctrico hasta la pieza de trabajo) de 24 mm, lo que permitió incrementar el ancho y penetración del cordón de soldadura. Torrano [40], analizó el comportamiento de las características geométricas y el rendimiento de la soldadura utilizando un alambre tubular AWS E71T-11 con un diámetro de 1.1 mm y corriente pulsada. Como principales resultados, se

observó que el aumento de la frecuencia del pulso (número de ciclos en un segundo) generó una reducción en el ancho del cordón y una mayor penetración y tasa de deposición. Asimismo, la corriente pulsada ha sido utilizada en experimentos usando alambre macizo; Por ejemplo, Gonçalves et al. [41] utilizaron corriente pulsada en el proceso GMAW con el fin de evaluar su aplicación en pases de raíz. También, Dutra et al. [42] emplearon el principio de corriente pulsada con el fin de modificar el modelo de onda para obtener un desprendimiento periódico de las gotas metálicas en GMAW con alambre de aluminio 4043. Así mismo, Bernardi [43] empleó corriente pulsada en soldadura submarina húmeda con electrodo revestido, logrando demostrar que es posible contribuir a la mejora de la transferencia metálica y de aspectos geométricos del cordón de soldadura.

Con el objetivo de discutir particularidades de la tecnología de corriente pulsada en UW, se presentan tres investigaciones que permiten comparar la aplicación de corriente pulsada con alambre tubular en soldadura submarina húmeda.

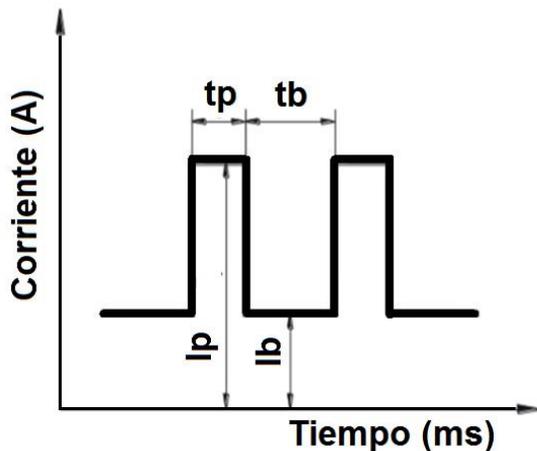


Figura 7. Variables en corriente pulsada: t_p – Tiempo de pico; t_b – Tiempo de base; I_p – Corriente de pico; I_b – Corriente de base. Fuente: adaptado de [38].

3.1. Variación de la frecuencia de pulso, ciclo de carga y corriente de pico

Guo et al. [44] realizaron deposiciones con un alambre tubular con sistema de escoria $TiO_2-CaF_2-CaO-SiO_2$, de diámetro igual a 1.6 mm, que operó con una velocidad de soldadura (1.5 mm/s) y velocidad de alimentación (55 mm/s). Este trabajo analizó el efecto que la frecuencia de pulso (F), el ciclo de carga (D) y la corriente de pulso (I_p) tiene sobre el comportamiento de la transferencia de metal en la soldadura submarina.

Además de la corriente promedio (I_a) de 200 A, se definieron otros parámetros para los diferentes experimentos, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros utilizados en corriente pulsada de alambre tubular en soldadura submarina húmeda

Exp.	Frecuencia de pulso (Hz)	Ciclo de carga (D)	Corriente de pico (A)
1	20	0.05	250
2	20	0.15	300
3	20	0.25	350
4	50	0.05	300
5	50	0.15	350
6	50	0.25	250
7	100	0.05	350
8	100	0.15	250
9	100	0.25	300
10	-	1	200

Fuente: adaptado de [44].

Mediante el uso de una cámara de alta velocidad sincronizada a las señales eléctricas del arco (Tensión y corriente de soldadura), fueron observados los modos de transferencia globular repelida y transferencia por tensión superficial. Determinado como un proceso de transferencia metálica estable, la transferencia repelida de ángulo agudo y la transferencia por tensión superficial mejoran la estabilidad del proceso y la calidad del cordón [44].

En la figura 8 se muestra que en el experimento 3 y con el uso de tecnología FCAW-P (Flux cored arc welding - Pulse), se obtuvieron las mejores condiciones, presentando ángulos de desprendimiento menores en comparación con el experimento 10, el cual demarca el proceso FCAW convencional.

3.2. Establecimiento de la forma de onda

Además de ser investigados los diferentes tipos de formas de onda en corriente pulsada en la soldadura de alambre macizo al aire [45], [46], Jia et al. [47] consiguieron establecer un modelo que mejoró la estabilidad del proceso de soldadura con alambre tubular en ambiente subacuático, mediante el control de la corriente y con el objetivo de realizar ajustes en la transferencia metálica, permitiendo una mayor frecuencia de desprendimiento de las gotas y disminuyendo su tamaño, cuando comparado con el proceso convencional.

En la **figura 9**, se muestran los oscilogramas de tensión y corriente de soldadura antes y después de aplicar el sistema de control de longitud del arco eléctrico. De este modo, el sistema mantuvo la tensión del arco dentro de un rango y como resultado, no se produjeron

interrupciones o extinciones en el arco de larga duración. El nivel de corriente de pulso promedio fue ajustado por el controlador PI híbrido. Esto indicó que la longitud del arco fue bien controlada en el FCAW utilizado en UWW.

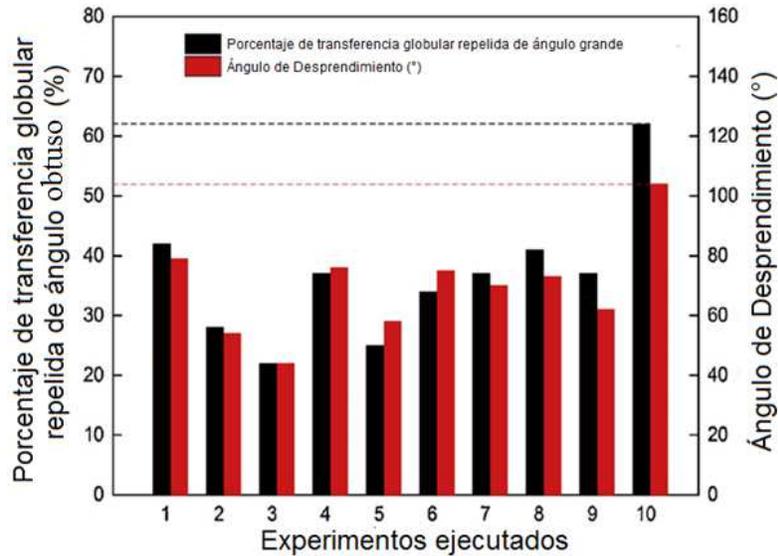


Figura 8. Ángulo de desprendimiento y porcentaje de transferencia global repelida de ángulo obtuso para los experimentos de soldadura con alambre tubular. Fuente: adaptado de [44].

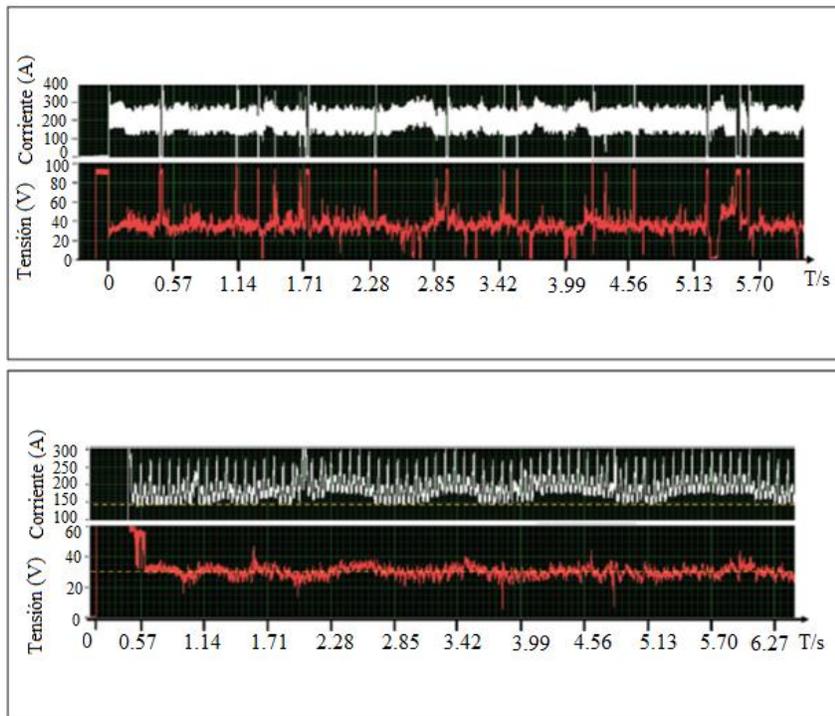


Figura 9. Señales de corriente de y tensión recolectadas del alambre tubular usado en soldadura submarina usando corriente antes (superior) y después (inferior) de la aplicación del control de longitud del arco. Fuente: adaptado de [47].

En la **figura 10 (a)** se muestra que, para el instante de 4.472 s, la gota creció hasta un diámetro máximo de 2.5 mm, el cual es menor en comparación con los 7.2 mm de diámetro en la gota reportados para la soldadura submarina utilizando alambre tubular convencional. Se calculó que la transferencia metálica ocurrió de 4.361 a 4.518 s, lo que tomó 157 ms en total. En la **figura 10 (b)**, se observó una pequeña gota recién formada en la punta del alambre, para el instante de 4582 s. Posteriormente creció hasta un diámetro de 2.8 mm, momento en el cual tocó el charco de soldadura. El periodo de transferencia fue de 152 ms, permitiendo determinar que el comportamiento de las gotas fue similar.

El análisis de estabilidad del proceso indicó que, en la corriente de pulso ejecutada en el proceso de alambre tubular en soldadura submarina, de modo general no hubo transferencia metálica de tipo cortocircuito, ni transferencia por tensión superficial. La frecuencia de extinción temporal del arco se redujo en gran medida, mientras que se mejoró la estabilidad del proceso. El rendimiento del FCAW en UWW utilizando la corriente de pulso fue nítidamente mejor si comparado al proceso convencional, evitando la extinción frecuente del arco, las salpicaduras y el deterioro de la estabilidad del proceso.

3.3. Optimización de la forma de onda

Ju et al. [48] realizaron estudios sobre la técnica de soldadura submarina húmeda con alambre tubular y corriente pulsada, con el fin de optimizar la forma de onda y analizar el comportamiento de las burbujas en el proceso. En este trabajo utilizaron una frecuencia de

pulso de 20 Hz (una gota cada 50 ms), justificando en el hecho de que, al reducir la frecuencia, la periodicidad de la variación de corriente disminuye al mismo tiempo. De este modo, al reducir el grado de variación del arco, las burbujas fueron más regulares y se presentaron menos fragmentaciones, por lo que pudieron regularse.

La **figura 11(a)** muestra el mecanismo de separación completo de dos burbujas, y la **figura 11(b)** evidencia el modo de adhesión de burbujas, en el que las dos burbujas no estaban completamente separadas. Durante el proceso de corriente de pulso, las diferentes formas de burbujas en los dos modos de separación llevaron a diferentes fuerzas de arrastre que actúan sobre las gotas. Las burbujas, en el modo de separación completa, están completamente separadas de la burbuja anterior: eran elipsoidales bajo la acción de la presión del agua. En este punto, el flujo de gas interno se muestra de forma esquemática por los autores en la sección a. En el modo de desprendimiento de adherencia, como se muestra en la **figura 11(b)**, las nuevas burbujas se conectaron a la anterior cuando inicia la separación de la región de fusión. El gas generado en las nuevas burbujas fluyó hacia arriba a través del canal de gas común entre dos burbujas y entró en el espacio de crecimiento de la anterior burbuja. La forma de las burbujas era cilíndrica y tiende a expandirse hacia arriba. Bajo la influencia de la presión del agua y la resistencia del agua al movimiento de las burbujas, estas tendieron a expandirse horizontalmente.

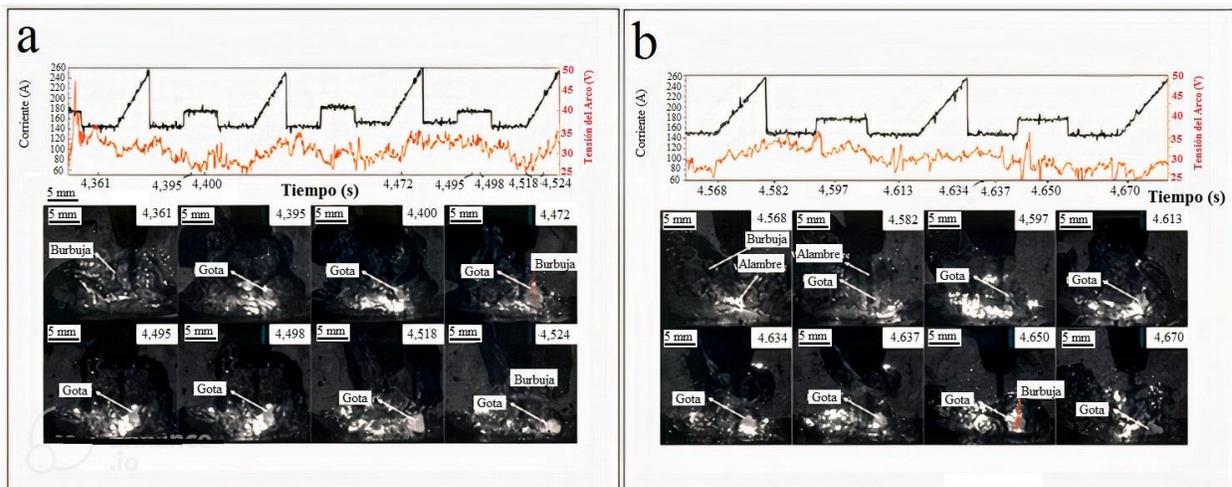


Figura 10. Transferencia metálica típica en soldadura húmeda con alambre tubular utilizando corriente pulsada. Fuente: adaptado de [47].

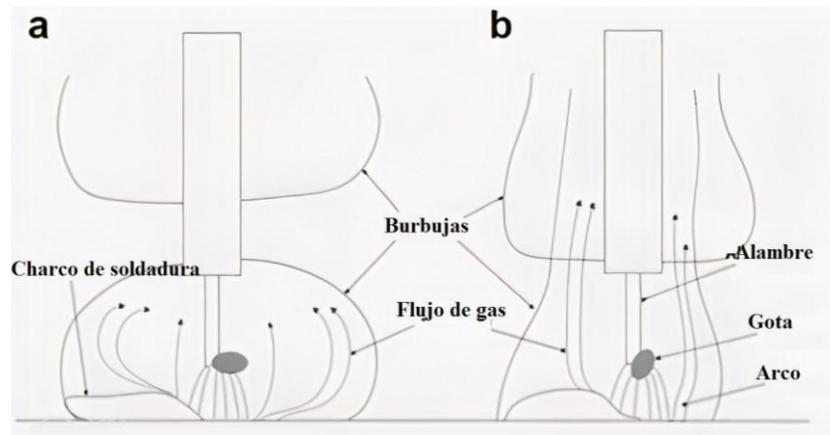


Figura 11. Modos de separación de las burbujas: a- separación completa; b – Por adhesión. Fuente: adaptado de [48].

Según la observación sincrónica del comportamiento de burbujas y de las gotas, se encontró que dos modos de separación de las burbujas tenían diferentes influencias en la transferencia metálica de la siguiente manera: en el modo de separación por adhesión, las gotas se sometieron no solo al impacto del flujo de gas dentro de las nuevas burbujas, sino también a la fuerza de arrastre producida por el flujo intenso de gas dentro del canal de unión entre las dos burbujas. Las fuerzas resultantes mantuvieron las gotas que caían e incluso las empujaron fuera de las burbujas. La fuerza de resistencia aplicada a las gotas fue relativamente pequeña en el modo de separación completa, lo que favoreció una transferencia más suave de las gotas.

La **figura 12** muestra la optimización de la forma de onda utilizada en la corriente pulsada, que consta básicamente de 4 etapas:

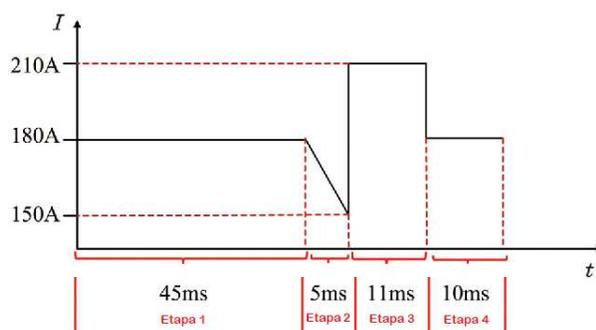


Figura 12. Optimización de forma de onda en corriente pulsada. Fuente: adaptado de [48].

De acuerdo con el análisis previo del proceso de transferencia de metal realizado por Jia et al. [47], el tiempo para la formación de la gota (es decir, la etapa inicial, el crecimiento y la desviación) fue de alrededor de 60-70 ms, y el tiempo para la generación de la gota

grande fue de unos 40-50 ms. Lo ideal entonces, es reducir ese tiempo de desvío de gotas grandes. La primera sección de la forma de onda (45 ms) se utilizó para cubrir las etapas de formación de gotas. Se usó un valor de corriente de soldadura adecuado (210 A) para proporcionar suficiente soporte de energía para fundir el alambre de manera rápida y constante. En la segunda sección (después de 5 ms), las gotas fluctuaron cuando la corriente disminuyó y luego se trasladaron a la etapa de gotas pequeñas que se desviaron antes de tiempo. Al mismo instante, debido al cambio repentino en el estado de combustión del arco, las burbujas sucumbieron precipitadamente. En la tercera etapa, la corriente aumentó abruptamente (11 ms) con la amplitud de variación de 60 A (desde 150 A a 210 A). Finalmente, en el paso 4, se observa la estabilidad de la corriente a 180 A durante 10 ms.

Los autores concluyeron que la forma de onda optimizada en la corriente de pulso permitió un proceso de transferencia de gotas más estable si comparado con el original. Además, fue posible regular y controlar eficazmente la transferencia de metal, así como los procesos de evolución de las burbujas.

4. Conclusiones

En la actualidad, el estudio del alambre tubular en soldadura submarina húmeda ha despertado el interés de investigadores en el área, debido a la posibilidad de automatizar y adicionar elementos al fundente, los cuales permitan obtener metales de soldadura con propiedades metalúrgicas y mecánicas especiales. De esta manera, es necesario caracterizar los modos de transferencia metálica y su influencia sobre la estabilidad del proceso y el formato final del cordón de soldadura.

En soldadura submarina húmeda es posible evidenciar distintos modelos de transferencia metálica (Globular repelida, Corto-circuito, arco sumergido y transferencia mixta), los cuales describen diferentes formas en que la gota se desprende del alambre tubular hacia el charco de soldadura.

La aplicación de corriente pulsada permite modificar la manera en que se transfieren las gotas hacia el charco de soldadura, controlando así aspectos relacionados con la estabilidad del proceso, cantidad de salpicaduras, modificación en las características geométricas del cordón de soldadura, entre otros.

El modelo de optimización de la forma de onda aplicado en corriente pulsada y expuesto en la literatura, permitió un proceso de transferencia de gotas más estable. De este modo, fue posible regular y controlar eficazmente la transferencia de metal, así como la dinámica y evolución de las burbujas.

Referencias

- [1] J. Łabanowski, “Development of under-water welding techniques,” *Weld. Int.*, vol. 25, no. 12, pp. 933–937, Dec. 2011, doi: <http://doi.org.10.1080/09507116.2010.540847>
- [2] M. Rowe, S. Liu, “Recent developments in underwater wet welding,” *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 6, no. 6, pp. 387–396, Dec. 2001, doi: <http://doi.org.10.1179/stw.2001.6.6.387>
- [3] J. Wang, Q. Sun, Y. Jiang, T. Zhang, J. Ma, J. Feng, “Analysis and improvement of underwater wet welding process stability with static mechanical constraint support,” *J. Manuf. Process.*, vol. 34, pp. 238–250, Aug. 2018, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmapro.2018.06.007>
- [4] J. A. E. Mazzaferro, I. G. Machado, “Study of arc stability in underwater shielded metal arc welding at shallow depths,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 223, no. 3, pp. 699–709, Mar. 2009, doi: <http://doi.org.10.1243/09544062JMES1067>
- [5] J. Wang, Q. Sun, S. Zhang, C. Wang, L. Wu, J. Feng, “Characterization of the underwater welding arc bubble through a visual sensing method,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 251, pp. 95–108, 2018, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmatprotec.2017.08.019>
- [6] V. R. Santos et al., “Development of an oxyrutile electrode for wet welding,” *Weld. J.*, vol. 91, no. 12, pp. 319–328, 2012.
- [7] C. E. Grubbs, A. Bertelmann, S. L. S. Ibarra, D. J. Marshall, D. L. Olson, *Welding Handbook Material and Applications*. Miami: AWS, 2011.
- [8] A. M. M. Uribe, A. Q. Bracarense, E. C. P. Pessoa, V. R. dos Santos, “Influência da Polaridade Sobre a Estabilidade do Processo de Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodo Revestido,” *Soldag. Inspeção*, vol. 22, no. 4, pp. 429–441, 2017, doi: <http://doi.org.10.1590/0104-9224/si2204.13>
- [9] A. R. Arias, A. Q. Bracarense, “Fatigue crack growth rate in underwater wet welds: out of water evaluation,” *Weld. Int.*, vol. 31, no. 5, pp. 348–353, 2017, doi: <http://doi.org.10.1080/09507116.2016.1218607>
- [10] N. M. Fonseca, P. J. Modenesi, A. R. Arias, “Caracterização por Reconstrução Tridimensional da Superfície de Fratura Gerada por Fadiga em Soldas Subaquáticas Molhadas,” *Soldag. Inspeção*, vol. 23, no. 2, pp. 143–156, 2018, doi: <http://doi.org.10.1590/0104-9224/si2302.03>
- [11] A. R. Arias, “Avaliação da propagação de trinca por fadiga em soldas subaquáticas molhadas,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- [12] A. Q. Bracarense et al., “Estudo comparativo de eletrodos comerciais para soldagem subaquática molhada,” *Soldag. Inspeção*, vol. 15, no. 4, pp. 325–335, 2010, doi: <http://doi.org.10.1590/S0104-92242010000400010>
- [13] A. M. Moreno-Uribe, A. Q. Bracarense, E. C. P. Pessoa, “The Effect of Polarity and Hydrostatic Pressure on Operational Characteristics of Rutile Electrode in Underwater Welding,” *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 21, p. 5001, 2020, doi: <http://doi.org.10.3390/ma13215001>
- [14] J. Emuejevoke Omajene, “Intelligent Control Mechanism for Underwater Wet Welding,” *Int. J. Mech. Eng. Appl.*, vol. 3, no. 4, p. 50, 2015, doi: <http://doi.org.10.11648/j.ijmea.20150304.11>
- [15] P. V. Marques, *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG, 2005.
- [16] 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,” Trab. Conclusão Curso apresentado a Fac. Eng. da Univ. Fed. Juiz Fora, 2016.

- [17] O. M. Castellanos-González, A. M. Moreno-Uribe, S. A. Ramón-Ramón, J. L. Jácome, “Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 3, 2021, doi: <http://doi.org.10.18273/revuin.v20n3-2021003>
- [18] C. M. D. Starling, P. J. Modenesi, T. M. D. Borba, “Caracterização do cordão na soldagem FCAW com um arame tubular ‘metal cored,’” *Soldag. Inspeção*, vol. 16, no. 3, pp. 285–300, 2011, doi: <http://doi.org.10.1590/S0104-92242011000300010>
- [19] A. M. Moreno Uribe, O. M. Castellanos González, G. carolina Prada Botia, J. L. Jácome Carrascal, A. Rodríguez Arias, “Manufactura De Alambre Tubular Autoprotegido Y Evaluación De Condiciones Operacionales En Soldadura Submarina,” *Investig. e Innovación en Ing.*, vol. 9, no. 1, pp. 167–179, 2021, doi: <http://doi.org.10.17081/invinno.9.1.4015>
- [20] E. C. Amaral, A. M. Moreno-Uribe, A. Q. Bracarense, “Effects of PTFE on operational characteristics and diffusible H and O contents of weld metal in underwater wet welding,” *J. Manuf. Process.*, vol. 61, pp. 270–279, 2021, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmapro.2020.11.018>
- [21] M. M. Simões, F. M. Liberato, A. Q. Bracarense, “Development of a tubular wire with aisi 1006 carbon steel strip and metallic flux containing nickel, chromium and iron powder for FCAW,” in *74o ABM Annual Congress*, 2019, pp. 886–894.
- [22] M. M. S. Ferreira et al., “Fabricação de eletrodo arame tubular auto protegido composto por tubo de aço carbono e fluxo contendo Fe-Cr-Ni para a formação de aço inoxidável como metal de solda na soldagem subaquática de aço carbono A36,” trabalho de grado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2020.
- [23] H. L. Li, D. Liu, Y. T. Yan, N. Guo, J. C. Feng, “Microstructural characteristics and mechanical properties of underwater wet flux-cored wire welded 316L stainless steel joints,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 238, pp. 423–430, 2016, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmatprotec.2016.08.001>
- [24] V. A. de Meneses, J. F. P. Gomes, A. Scotti, “The effect of metal transfer stability (spattering) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 7, pp. 1388–1397, 2014, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmatprotec.2014.02.012>
- [25] N. Guo, M. Wang, Y. Du, W. Guo, J. Feng, “Metal transfer in underwater flux-cored wire wet welding at shallow water depth,” *Mater. Lett.*, vol. 144, pp. 90–92, 2015, doi: <http://doi.org.10.1016/j.matlet.2015.01.033>
- [26] N. Guo et al., “Classification of metal transfer mode in underwater wet welding,” *Weld. J.*, vol. 95, no. 4, pp. 133S–140S, 2016.
- [27] C. M. Starling, P. J. Modenesi, *Estudo da transferência de metal de um arame tubular metal cored*. 2005.
- [28] F. Cheng, S. Zhang, X. Di, D. Wang, J. Cao, “Arc Characteristic and Metal Transfer of Pulse Current Horizontal Flux-Cored Arc Welding,” *Trans. Tianjin Univ.*, vol. 23, no. 2, pp. 101–109, 2017, doi: <http://doi.org.10.1007/s12209-017-0039-0>
- [29] E. Uddin, U. Iqbal, N. Arif, S. R. Shah, “Analysis of metal transfer in gas metal arc welding,” *AIP Conference Proceedings*, p. 030019, doi: <http://doi.org.10.1063/1.5114003>
- [30] L. F. Defize, *Metal transfer in gas-shielded arcs*. Physics of the welding Arc. London: The institute of welding, 1962.
- [31] T. B. Hazlett, G. M. Gordon, “Studies of welding arcs using various atmospheres and power supplies,” *Weld. J.*, vol. 36, no. 8, pp. 382–385, 1957.
- [32] N. Guo, Y. Fu, Y. Wang, Y. Du, J. Feng, Z. Deng, “Effects of welding velocity on metal transfer mode and weld morphology in underwater flux-cored wire welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 239, pp. 103–112, 2017, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmatprotec.2016.08.019>
- [33] C. I. de Souza, V. A. Ferraresi, “Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal,” *Soldag. Inspeção*, vol. 18, no. 3, pp. 268–280, 2013, doi: <http://doi.org.10.1590/S0104-92242013000300009>
- [34] J. Norrish, *Advanced welding processes*. Springer Science & Business Media, 1992.
- [35] C. J. Allum, “Welding technology data: pulsed MIG welding sheet 65,” *Weld. Met. Fabr.*, vol. 53, no. 1, pp. 24–30, 1985.

- [36]P. K. Palani, N. Murugan, “Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 172, no. 1, pp. 1–10, 2006, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmatprotec.2005.07.013>
- [37]“Manual da Inversal 300, fabricante: IML/LABSOLDA/UFSC,1995.”
- [38]V. V. Díaz, F. F. Acevedo, T. V. da Cunha, “Uma Contribuição na Determinação das Variáveis da Corrente Contínua Pulsada para o Arame Tubular E71T-1M,” *Soldag. Inspeção*, vol. 23, no. 3, pp. 340–349, 2018, doi: <http://doi.org.10.1590/0104-9224/si2303.04>
- [39]F. R. T. Corrêa, “Efeito dos parâmetros de pulso sobre as características geométricas e desempenho da soldagem com arame tubular autoprottegido e corrente pulsada,” Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006.
- [40]R. H. Gonçalves, C. Godinho, K. Correa, L. Colares, M. Skowronski, R. Bernardi, “Soldagem MIG/MAG com corrente pulsada para aplicação em passe de raiz,” 2017, [Online]. Available: https://labsolda.ufsc.br/publicacoes/artigos/2017_cobef_mateus.pdf.
- [41]J. C. Dutra, C. Marques, R. H. G. e Silva, “Consonâncias e dissonâncias interpretativas no inter-relacionamento das variáveis da corrente pulsada aplicada à soldagem com arame de alumínio 4043,” *Soldag. Inspeção*, vol. 17, no. 3, pp. 201–209, 2012, doi: <http://doi.org.10.1590/S0104-92242012000300004>
- [42]R. A. Bernardi “Investigações de ordem operacional e implementação de tecnologias para soldagem subaquática molhada com eletrodos revestidos,” trabalho de grado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- [43]N. Guo, Q. Cheng, Y. Fu, Y. Du, X. Zhang, J. Feng, “Investigation on the mass transfer control, process stability and welding quality during underwater pulse current FCAW for Q235,” *J. Manuf. Process.*, vol. 46, pp. 317–327, 2019, doi: <http://doi.org.10.1016/j.jmapro.2019.08.022>
- [44]L. M. Cirino, “Análise crítica de formas de onda de corrente e métodos de controle no processo MIG/MAG pulsado CC/CA,” tesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- [45]A. R. Gonzalez, “Efeito da Forma da Onda sobre as Características de Fusão na Soldagem MIG/MAG com Corrente Pulsada,” tesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.
- [46]C. JIA, J. WU, Y. HAN, Y. ZHANG, Q. YANG, C. WU, “Underwater Pulse-Current FCAW - Part 1: Waveform and Process Features,” *Weld. J.*, vol. 99, no. 05, pp. 135s-145s, 2020, doi: <http://doi.org.10.29391/2020.99.013>
- [47]J. Wu, Y. Han, C. Jia, Q. Yang, C. Wu, “Underwater Pulse-Current FCAW - Part 2: Bubble Behaviors and Waveform Optimization,” *Weld. J.*, vol. 99, no. 12, pp. 303s-311s, 2020, doi: <http://doi.org.10.29391/2020.99.028>
- [48] J. F. Wu, Y. Hang, C. Jia, Q. Yang, C. Wu, “Underwater Pulse-Current FCAW — Part 2: Bubble Behaviors and Waveform Optimization”, *Welding Journal*, vol. 99, p. 303- 311. 2020, doi: <https://doi.org/10.29391/2020.99.028>