

Análisis de la corriente continua pulsada para un alambre tubular autoprotegido (FCAW-P)

Pedro Cerda Villegas¹, Víctor Vergara Díaz¹

¹Laboratorio de Procesos de Soldadura (LPS), Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Antofagasta, Chile.
Email: victor.vergara@uantof.cl

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de las variables de la corriente continua pulsada en el proceso de soldadura FCAW-P. Los resultados muestran que, independiente del diámetro de gota metálica producida, puede ser declarado de forma cualitativa que todos los ensayos presentan algún grado de salpicaduras cuando se emplea la corriente continua pulsada. Además, las secciones transversales de los cordones de soldadura revelaron que están libres de socavaciones, porosidades y falta de fusión. De acuerdo con los datos obtenidos a partir de los parámetros geométricos del cordón de soldadura se puede concluir que el ancho del cordón (L) y la penetración (P) muestran una leve influencia para variaciones de diámetro de gota menor en comparación a los demás ensayos. Por otro lado, para los ensayos con un diámetro de gota mayor se observa una ligera influencia sobre el refuerzo (R) del cordón de soldadura en contraste al resto de los ensayos.

Palabras clave: Diámetro de gota; FCAW-P; corriente continua pulsada; transferencia metálica.

Abstract

This work aims to analyze the influence of pulsed direct current variables in the FCAW-P welding process. The results show that, independent of the produced metal drop diameter, it can be stated qualitatively that all tests have some degree of splashing when pulsed direct current is used. In addition, the cross sections of the weld seams revealed that they are free from undercuts, porosities and lack of fusion. According to the data obtained from the geometric parameters of the weld bead, it can be concluded that the bead width (L) and penetration (P) show a slight influence for smaller droplet diameter variations compared to the other tests. On the other hand, for the tests with a larger drop diameter a slight influence is observed on the reinforcement (R) of the weld bead in contrast to the rest of the tests.

Keywords: Drop diameter; FCAW-P; pulsed continuous current; metallic transfer.

1. Introducción

El proceso de soldadura al arco con núcleo de fundente (FCAW - Flux Cored Arc Welding), es aquel capaz de generar la coalescencia entre metales mediante la fusión del material base y un electrodo continuo de tipo tubular, el cual en su interior posee diversos materiales pulverizados [1]. El fundente o flux durante el proceso de soldadura es vaporizado permitiendo proteger la poza fundida mediante la formación de una atmósfera protectora que desplaza al aire circundante y por la escoria que cubre las gotas de metal fundido [2]. Esta es la variante autoprotegida, la cual no em-

plea gas de protección externa y que es motivo de estudio para este artículo.

Gracias al avance de la tecnología, la introducción de la corriente pulsada fue posible, permitiendo alcanzar una corriente media con valores más bajos que los del método de corriente continua convencional (menor aporte térmico) [3]. De esta manera, se pueden soldar chapas de menor espesor, reducir o eliminar la cantidad de salpicaduras, alcanzar una soldadura de mejor calidad respecto a la corriente convencional, entre otras características, logrando así aumentar el rango de utilización del proceso de soldadura FCAW [4]. Actualmente se cuenta con el levantamiento de pará-

metros de soldadura realizados en laboratorio para el alambre tubular con protección gaseosa E71T-1M empleando corriente continua pulsada con excelentes resultados en cuanto a la estabilidad del arco y la morfología de los cordones de soldadura [5].

El propósito de este trabajo es establecer las variables de la corriente continua pulsada para el proceso de soldadura FCAW-P, las cuales permitan caracterizar un alambre tubular autoprotegido (E71T-11) sobre la morfología del cordón de soldadura y de esta manera contribuir a enriquecer el conocimiento en temas necesarios a los procesos de fabricación.

2. Materiales y métodos

Se implementó un banco de ensayos constituido por una máquina de soldar multiproceso modelo DIGIPLUS A7. La torcha utilizada es refrigerada con agua con una capacidad de corriente de 450 A instalada en un sistema de desplazamiento con cuatro grados de libertad. El monitoreo de la corriente de soldadura y de la tensión del arco se realizaron con el sistema de adquisición propio de la máquina de soldar. Los cordones de soldadura se ejecutaron en la posición plana con un ángulo de ataque de la torcha de 90°, utilizando como material base probetas con dimensiones de 5x50x216 mm del acero SAE 1015. El material de aporte empleado fue el AWS E71T-11 de 1,2 mm de diámetro. Se analizó la influencia del diámetro de gota metálica igual, mayor y menor al diámetro del electrodo. Las variables de respuesta fueron la estabilidad del proceso, la morfología y aspecto superficial de los cordones de soldadura como también el grado de salpicaduras. El patrón de aceptación será la obtención de cordones de soldadura libre de discontinuidades tales como salpicaduras, refuerzo excesivo y bajos ángulos de mojado. Este procedimiento consta de dos etapas y se realizó de acuerdo al método empleado por Nogueira et al. (2015) [6], el cual permite determinar los parámetros para la ocurrencia de una transferencia metálica estable por el modo pulsado para una determinada corriente media de soldadura.

2.1. Identificación de la corriente de transición para determinar las variables de la corriente pulsada

El primer paso consiste en alcanzar una transferencia metálica entre globular - goticular para determinar la corriente media, por lo cual es necesario realizar ensayos preliminares. Conocida la corriente de transición, se procede a determinar la constante de consumo $K(A \cdot m/min)$ por medio de la ecuación 1.

$$V_a = K \cdot I_m \quad (1)$$

Posteriormente, se selecciona una corriente de pulso superior a la corriente de transición. Se adoptó un tiempo de pulso, por lo que, utilizando la ecuación 2 se tiene una constante de desprendimiento $D (A^n s)$ para Una Gota Por Pulso (UGPP). Se considera $n = 2$.

$$I_p^n \cdot t_p = D \quad (2)$$

2.2. Estudio de la influencia del diámetro de gota sobre la estabilidad del proceso de soldadura

El cálculo del periodo $T (ms)$ de la corriente continua pulsada es el tiempo necesario para obtener un determinado diámetro de gota $D_g (mm)$ cuando se utiliza cierta velocidad de alambre $V_a (m/min)$ y diámetro del electrodo $D_e (mm)$. La ecuación 3, permite el cálculo del periodo en que el volumen de alambre fundido que avanza durante un periodo de tiempo se transforma en una gota.

$$T = t_p + t_b = \frac{40 \cdot D_g^3}{V_a \cdot D_e^2} \quad (3)$$

Seguidamente, se determina el tiempo de base, a través de $T = (t_p + t_b) (ms)$. Finalmente, por medio de la ecuación 4, que define la corriente media, se determina la corriente de base $I_b (A)$.

$$I_m = \frac{I_p \cdot t_p + I_b \cdot t_b}{T} \quad (4)$$

Los parámetros son programados en la máquina de soldar y los cordones ejecutados de forma mecanizada y monitoreados por el sistema de adquisición de datos. El estudio considera un (01) ensayo realizado con diámetro de gota metálica igual al diámetro del electrodo, cuatro (04) ensayos con diámetro de gota mayor al del electrodo y cuatro (04) ensayos con diámetro de gota menor al del electrodo, considerando respectivamente 5 centésimas de milímetro de diferencia a partir del diámetro igual al electrodo.

3. Resultados

3.1. Resultados de ensayos preliminares para identificar la corriente de transición

El ensayo preliminar seleccionado para este estudio (véase Tabla 1), que considera una transferencia combinada globular repelida – goticular, permite obtener una mejor continuidad del proceso y tiene un valor de corriente media de 169 A. Al obtener la corriente de transición mediante el oscilograma, se determina la constante de consumo K que corresponde en este estudio a un valor de 0,033 ($m/A \cdot min$).

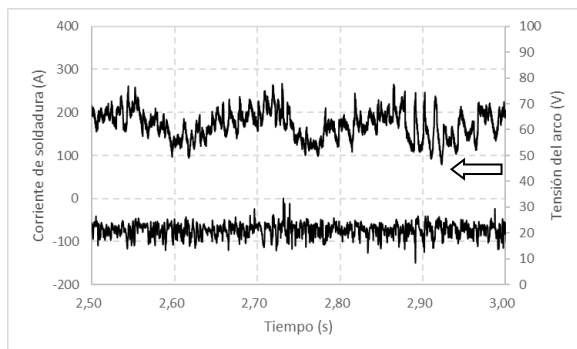
Tabla 1. Parámetros seleccionados en FCAW autoprotegido para transferencia globular-goticular.

Tipo de alambre	E71T-11
Diámetro de alambre (mm)	1,2
Posición	Plana
DTP (mm)	20
Ur (V)	21
It (A)	169
Vs (cm/min)	20
Va (m/min)	5,5

DTP: distancia tobera pieza; Ur: tensión de referencia; It: corriente de transición; Vs: velocidad de soldadura; Va: velocidad de alambre.

Fuente: elaboración propia.

La Figura 1, presenta los oscilogramas de corriente - tensión con mejor continuidad obtenidos en los ensayos preliminares. Se observa una curva similar a la presentada en el trabajo de [7], el que muestra una combinación entre la transferencia globular y goticular al emplear el proceso de soldadura MIG, por lo que para este estudio probablemente también ocurra el mismo fenómeno, esta vez, una combinación entre la transferencia globular repelida y la goticular. La diferencia con el estudio mencionado más arriba radica en que según la cita [8] la transferencia lograda mediante el proceso de soldadura tubular autoprotegido es la de globular repelida. En el oscilograma de corriente se indica con una flecha una disminución de la intensidad, aumentando la resistencia del arco, generando una transferencia globular repelida. Conforme la intensidad aumenta, y la resistencia del arco disminuye, se obtiene una transferencia goticular con valor superior a la corriente de transición.

**Figura 1.** Oscilogramas corriente - tensión del ensayo preliminar seleccionado (Ur = 21 V; Va = 5,5 m/min).

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resultados de la influencia del diámetro de la gota utilizando corriente continua pulsada

La tabla 2 presenta las variables de entrada y los parámetros de pulso (T, tb y Ib) obtenidos mediante las ecuaciones 3 y 4 para diámetros de gota metálica igual, mayor y menor al diámetro del electrodo tubular autoprotegido E71T-11.

Tabla 2. Variables de entrada y de pulso.

Ip (A)			250		
tp (ms)			2		
D (A ² *ms)			125		
Im (A)			92,18		
Va (m/min)			3		
Vs (cm/min)			20		
DTP (mm)			20		
Nº Ensayo	Tamaño de gota (mm)		T (ms)	tb (ms)	Ib (A)
01	Dg = De	1,20	16	14	69,64
02	Dg > De	1,25	18,08	16,08	72,56
03	Dg > De	1,30	20,34	18,34	74,97
04	Dg > De	1,35	22,78	20,78	76,99
05	Dg > De	1,40	25,41	23,41	78,70
06	Dg < De	1,15	14,08	12,08	66,06
07	Dg < De	1,10	12,32	10,32	61,61
08	Dg < De	1,05	10,72	8,72	55,98
09	Dg < De	1,00	9,26	7,26	48,70

Fuente: elaboración propia.

3.3. Energía de soldadura, tensión media del arco y dilución para diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo

La Figura 2, muestra la energía de soldadura y tensión media del arco para deposiciones con diámetros de gotas (D_g) mayores al diámetro del electrodo (D_e). Se observa que conforme aumenta el diámetro de gota metálica la energía de soldadura presenta una disminución. Esta disminución en la energía de soldadura es originada por una tendencia a la baja de la tensión media del arco. El descenso de la tensión media del arco se debe a tener una menor longitud de arco producto de un mayor diámetro de gota metálica. Así también la dilución se ve reducida conforme aumenta el diámetro de gota metálica, como se muestra en la Figura 3.

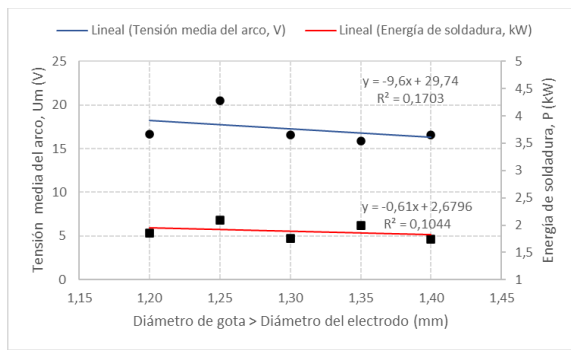


Figura 2. Energía de soldadura y tensión media del arco para deposición de $D_g > D_e$. Fuente: elaboración propia.

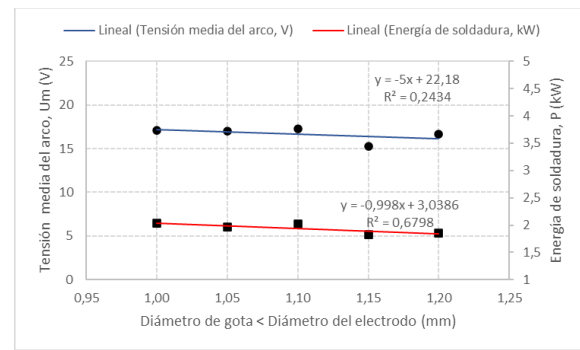


Figura 4. Energía de soldadura y tensión media del arco para deposición de $D_g < D_e$. Fuente: elaboración propia.

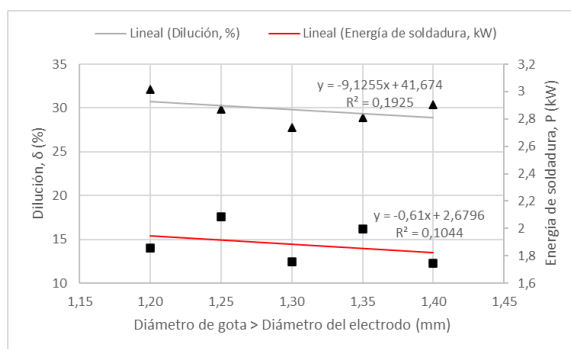


Figura 3. Energía de soldadura y dilución para deposición de $D_g > D_e$. Fuente: elaboración propia.

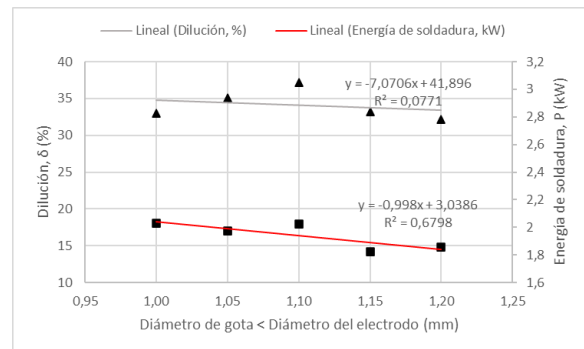


Figura 5. Energía de soldadura y dilución para deposición de $D_g < D_e$. Fuente: elaboración propia.

3.4. Energía de soldadura, tensión media del arco y dilución para diámetro de gota menor al diámetro del electrodo

La Figura 4, muestra la energía de soldadura y tensión media del arco para deposiciones con diámetros de gotas (D_g) menores a la del electrodo. Se revela que a medida que hay una disminución del diámetro de gota existe una tendencia al ascenso de la energía de soldadura. Este aumento en la energía de soldadura es originado por una tendencia al alza de la tensión media del arco. El ascenso de la tensión media del arco se debe a tener una mayor longitud de arco producto de un menor diámetro de gota metálica. Así también la dilución se ve aumentada conforme disminuye el diámetro de gota metálica, como se muestra en la Figura 5.

En este estudio, los mayores valores de energía de soldadura fueron encontrados para el caso de diámetro de gota menor al diámetro del electrodo, o sea, cuando la transferencia metálica ocurre en mayores frecuencias de desprendimientos de gotas. Revelando que cuando existe un aumento en la frecuencia de pulso, se tiene un aumento en la tensión del arco y como consecuencia un aumento en la energía del mismo.

3.5. Diámetro de gota igual al diámetro del electrodo

El ensayo 01 revela mediante el oscilograma de tensión la dificultad que hay para distinguir los desprendimientos de gotas metálicas por pulso (fenómeno que se repite en todo el estudio) y junto a ello se observa la formación repentina de un pulso central en el espacio correspondiente a la base de la corriente continua pulsada, indicado por una flecha, como se aprecia en la Figura 6. Esta irregularidad se debe a que la tasa de alimentación del electrodo es mayor que la tasa de fusión del mismo, por lo que la longitud del electrodo aumenta generando la ocurrencia de cortos circuitos. Sin embargo, esta irregularidad no afectó al acabado superficial del cordón de soldadura, aunque si hay la presencia de salpicaduras y escoria metálica, como se observa en la Figura 8. Este tipo de singularidades totalmente indeseables acusan algún grado de inestabilidad durante la ejecución para los cordones de soldadura. Mientras que por medio del ciclograma (ver Figura 7) se revela una alta dispersión de la línea de datos producto de la propia inestabilidad del proceso. La falta de repetitividad en los pulsos de corriente y la irregularidad presente en la tensión de arco son indicadores de una menor continuidad de la transferencia metálica.

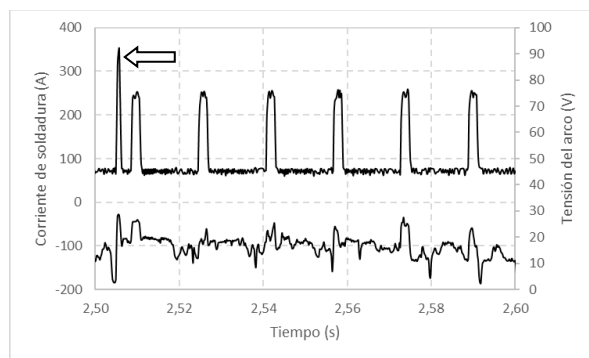


Figura 6. Oscilogramas el ensayo 01 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 69,64$ A y $t_b = 14$ ms). Fuente: elaboración propia.

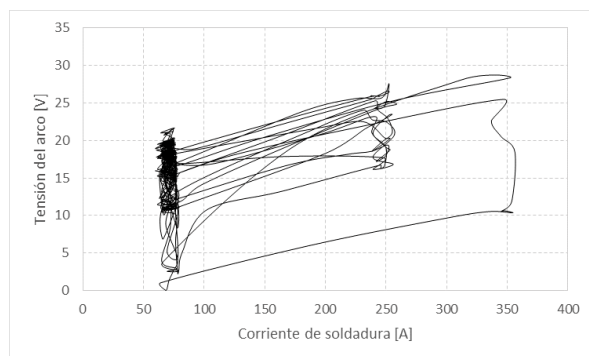


Figura 7. Ciclograma para el ensayo 01 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 69,64$ A y $t_b = 14$ ms). Fuente: elaboración propia.



Figura 8. Aspecto superficial del ensayo 01. Fuente: elaboración propia.

3.6. Diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo

Los oscilogramas de corriente y tensión revelan que los ensayos 02, 03 y 04 (véase Figura 9) presentan un comportamiento irregular debido a la aparición de cortos circuitos durante el periodo de base de la corriente y una tensión marcada por la falta de continuidad. La presencia del alto número de cortos circuitos es producto a que existe un desequilibrio instantáneo entre la velocidad de alimentación y la tasa de fusión. Este desequilibrio ocasiona que el electrodo se aproxime a la poza fundida y, por consiguiente, haya una reducción de la longitud del arco. El ensayo 05 muestra los oscilogramas de corriente y tensión con una mejor continuidad de los pulsos que los indicados previamente, lo cual es

producto a que hay un mayor equilibrio entre la velocidad de alimentación del alambre y la tasa de fusión del mismo. Por este motivo el cordón presenta un mejor aspecto en su acabado superficial respecto sus pares y una menor cantidad de salpicaduras no exento de la escoria característica de los electrodos tipo básico del proceso de soldadura FCAW autoprotegido. Esto último es producto de la gasificación de elementos presentes en el fundente del electrodo tubular autoprotegido como son el manganeso y el silicio. La escoria puede reaccionar químicamente, ya que esta encontrándose fundida se desplaza a través de la poza fundida actuando como un magneto, el que se combina químicamente con impurezas que arrastra a la superficie produciendo la escoria.

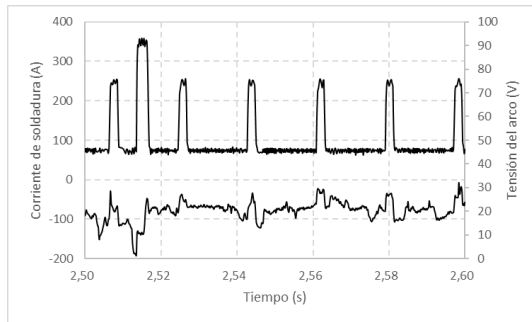
3.7. Diámetro de gota menor al diámetro del electrodo

Los oscilogramas de corriente y tensión de los ensayos 06 y 07 (véase Figura 10) revelan la aparición de cortos circuitos. Estas alteraciones, presentadas en los oscilogramas son producidas durante el período de arco y se pueden asociar a perturbaciones debido a una transferencia metálica inestable de la gota para alcanzar el material base. Sin embargo, los oscilogramas de corriente y tensión obtenidos para los ensayos 08 y 09 presentan una mejor regularidad en su proyección, pues teniendo una mayor frecuencia de pulso se tiene una mayor estabilidad del arco voltaico. La estabilidad puede ser explicada debido al aumento de la frecuencia de pulso, producto de tener una transferencia metálica con menor diámetro de gota, lo que conlleva a obtener una mayor longitud de arco, así como también una alta energía introducida. Sin embargo, se debe considerar que el aumento de energía puede traer como consecuencia una pérdida de la calidad del acabado superficial, en virtud de la presencia de una mayor cantidad de salpicaduras, lo que se debe a un aumento de la velocidad con que las gotas metálicas son proyectadas hacia la poza fundida durante el proceso de transferencia metálica. Todos los ensayos de este ítem revelan la escoria metálica característica presentada por alambres tubulares autoprotegidos, la cual tiene como ventaja cubrir el metal fundida durante la etapa de solidificación, impidiendo así que el calor de la soldadura se escape rápidamente hacia el aire ambiente, y de esta manera aporta en el retardo de la velocidad de enfriamiento. Posteriormente la escoria metálica debe ser retirada para dejar al descubierto el cordón de soldadura.

3.8. Ciclogramas obtenidos para estudio de la influencia del diámetro de gota metálica

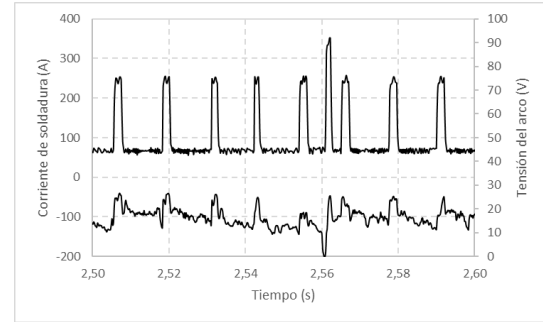
La Figura 11 presenta los ciclogramas para deposición con diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo,

$$D_g > D_e$$

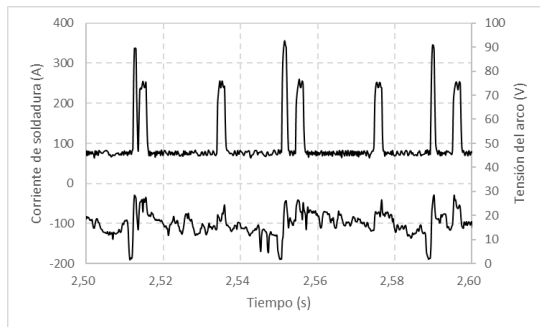


Ensayo 02. ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 72,56$ A y $t_b = 16,08$ ms). Fuente: elaboración propia.

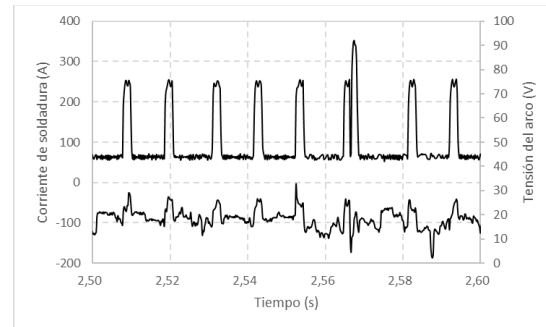
$$D_g < D_e$$



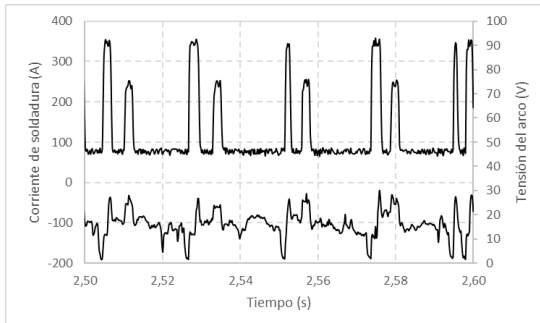
Ensayo 06 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 66,06$ A y $t_b = 12,08$ ms). Fuente: elaboración propia.



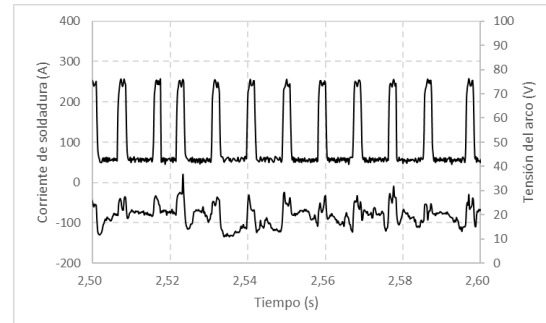
Ensayo 03. ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 74,97$ A y $t_b = 18,34$ ms). Fuente: elaboración propia.



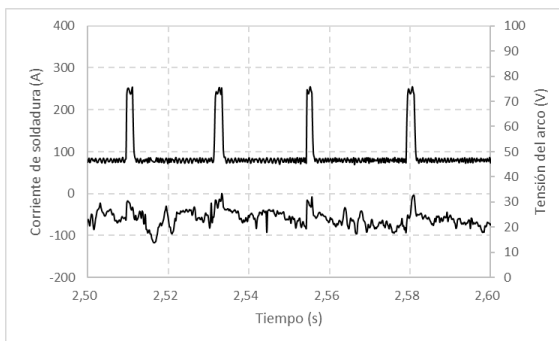
Ensayo 07 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 61,61$ A y $t_b = 10,32$ ms). Fuente: elaboración propia.



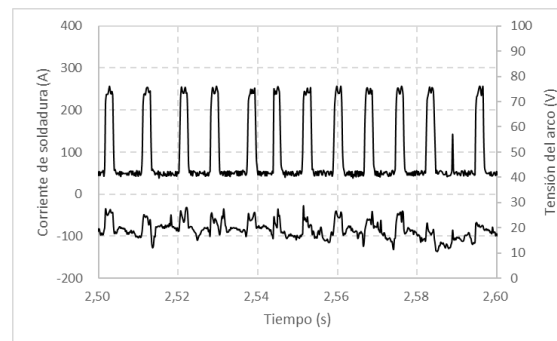
Ensayo 04. ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 76,99$ A y $t_b = 20,78$ ms). Fuente: elaboración propia.



Ensayo 08 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 55,98$ A y $t_b = 8,72$ ms). Fuente: elaboración propia.



Ensayo 05. ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 78,70$ A y $t_b = 23,41$ ms). Fuente: elaboración propia.

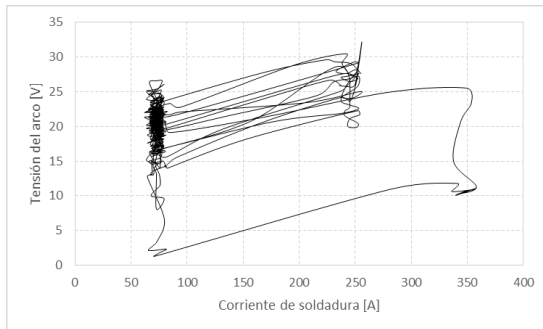


Ensayo 09 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 48,70$ A y $t_b = 7,26$ ms). Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Oscilogramas de corriente y tensión de ensayos con diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo.

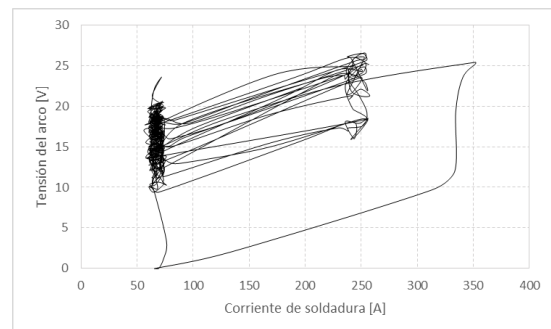
Figura 10. Oscilogramas de corriente y tensión de ensayos con diámetro de gota menor al diámetro del electrodo.

$$D_g > D_e$$

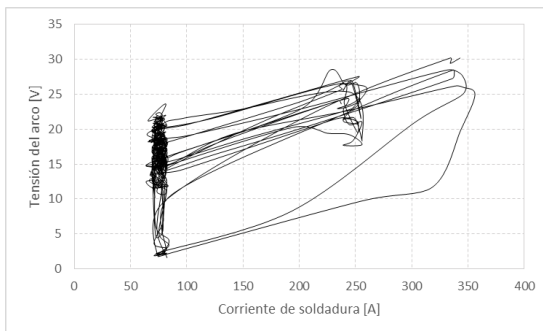


Ensayo 02 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 72,56$ A y $t_b = 16,08$ ms). Fuente: elaboración propia.

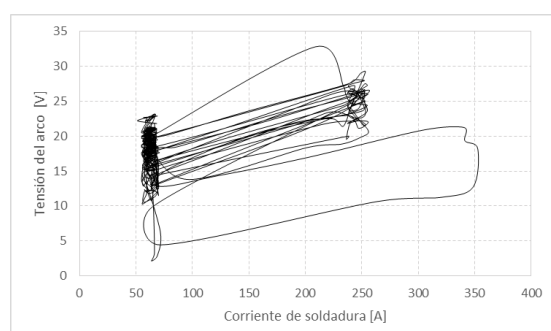
$$D_g < D_e$$



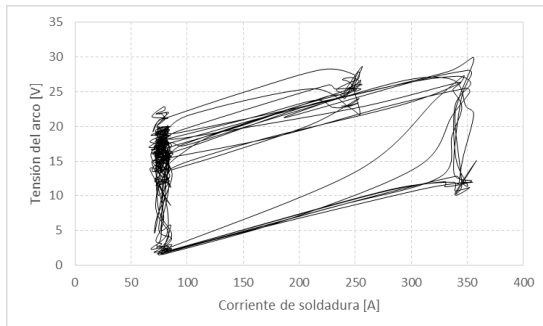
Ensayo 06 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 66,06$ A y $t_b = 12,08$ ms). Fuente: elaboración propia.



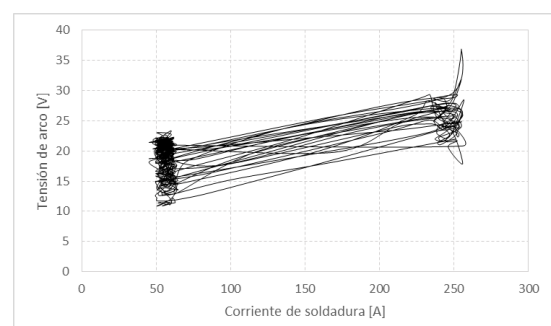
Ensayo 03 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 74,97$ A y $t_b = 18,34$ ms). Fuente: elaboración propia.



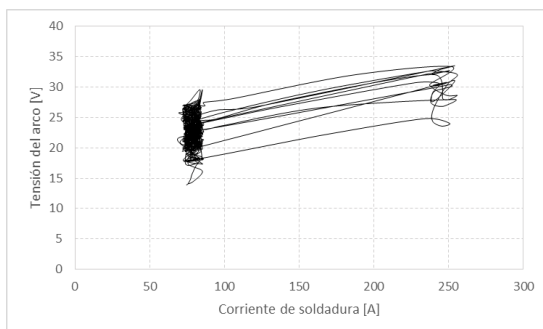
Ensayo 07 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 61,61$ A y $t_b = 10,32$ ms). Fuente: elaboración propia.



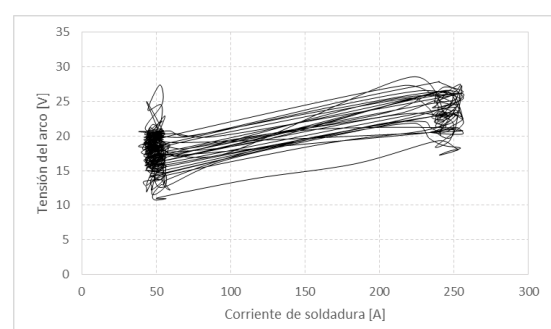
Ensayo 04 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 76,99$ A y $t_b = 20,78$ ms). Fuente: elaboración propia.



Ensayo 08 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 55,98$ A y $t_b = 8,72$ ms). Fuente: elaboración propia.



Ensayo 05 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 78,70$ A y $t_b = 23,41$ ms). Fuente: elaboración propia.



Ensayo 09 ($I_p = 250$ A; $t_p = 2$ ms; $I_b = 48,70$ A y $t_b = 7,26$ ms). Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Ciclogramas para ensayos con diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo.

Figura 12. Ciclogramas para ensayos con diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo.

los cuales revelan una mayor dispersión de los datos producto de tener una mayor inestabilidad del proceso. La Figura 12 presenta los ciclogramas para una deposición con diámetro de gota metálica menor al diámetro del electrodo, los cuales muestran una mayor concentración de los datos para los ensayos 08 y 09 producto de tener un proceso más estable respecto al obtenido con una deposición de gota metálica con diámetro mayor al diámetro del electrodo.

3.9. Parámetros geométricos de los cordones de soldadura

En la Figura 13 son presentados los valores para los parámetros geométricos de ancho, refuerzo y penetración para los cordones de soldadura realizados con diámetros de gota metálica igual, mayor y menor al diámetro del electrodo. Se observa que el ancho y la penetración de los cordones de soldadura obtenidos en los ensayos con diámetro de gota menor al diámetro del electrodo presentan una sutil tendencia al alza en contraste con los ensayos ejecutados con diámetro de gota mayor respecto al diámetro del electrodo, lo cual es producto a la mayor velocidad alcanzada por la gota metálica de menor diámetro desde el momento en que se desprende del electrodo hasta impactar en la poza fundida. Por otro lado, los valores obtenidos para el refuerzo son levemente superiores para los ensayos con diámetro de gota mayor en comparación al resto de ensayos.

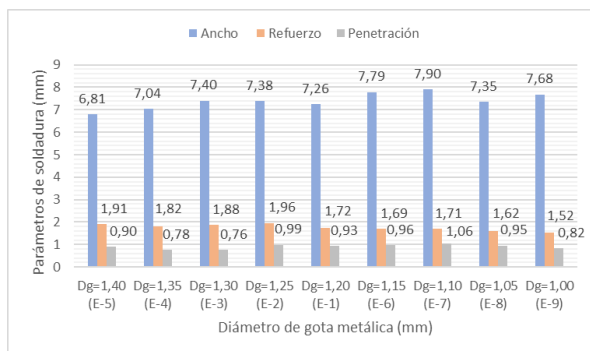


Figura 13. Ancho, refuerzo y penetración de los cordones de soldadura para todos los diámetros de gota analizados. Fuente: elaboración propia.

3.10. Macrografías obtenidas de las soldaduras

El cordón de soldadura realizado con transferencia metálica combinada globular repelida - goticular (ver Figura 14, ensayo 00) presenta un mayor ancho del cordón de soldadura y una mayor zona afectada por el calor cuando se compara al cordón realizado con corriente continua pulsada con un diámetro de gota igual al diámetro del alambre tubular, correspondiente al ensayo 01. Esto se debe al menor aporte térmico

cuando se emplea la corriente continua pulsada (5,6 kJ/cm) en relación a la transferencia globular repelida - goticular (10, 593 kJ/cm).

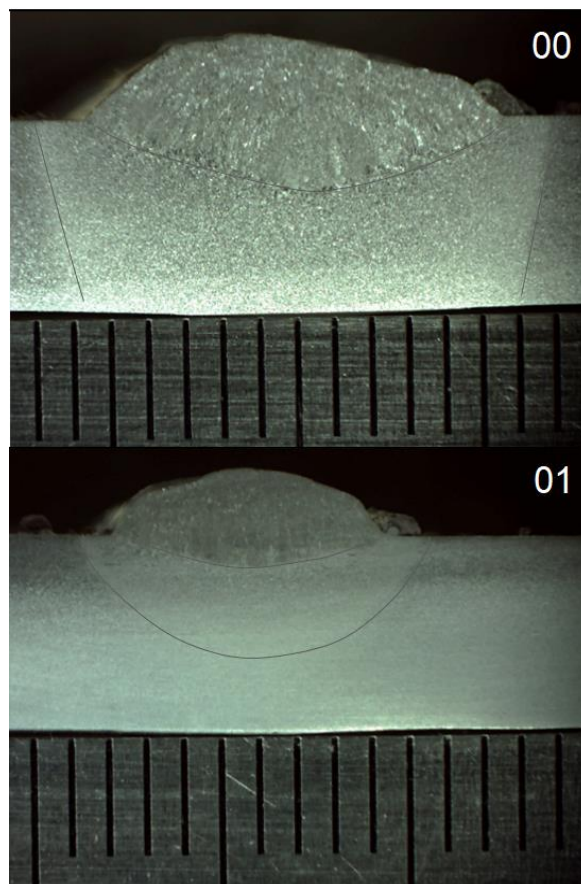
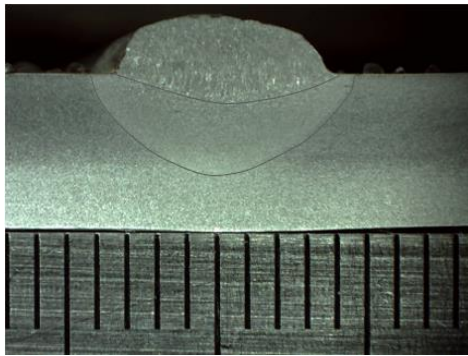


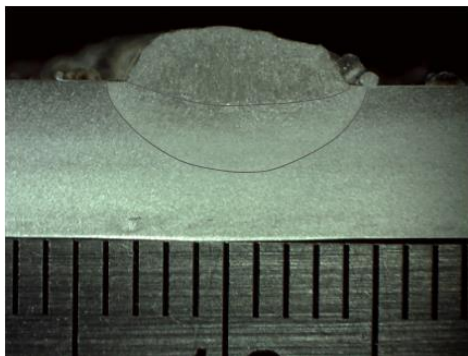
Figura 14. Macrografías para el ensayo preliminar seleccionado (ensayo 00) y el ensayo 01 ($D_g = D_e$). Fuente: elaboración propia.

La Figuras 15 y 16 presentan las macrografías para los ensayos con una deposición del diámetro de gota mayor y menor al diámetro del electrodo, respectivamente. Un análisis cualitativo realizado a las macrografías de este estudio, considera que para un diámetro de gota mayor al diámetro del electrodo se tiene un mayor ángulo de mojado que el observado para un diámetro de gota menor al diámetro del electrodo. Además, todos los ensayos logran un ángulo de mojado inferior a 90° , lo cual demuestra que no hay falta de fusión en los cordones. Por otro lado, no hay un cambio significativo en el ancho y la penetración de los cordones de soldadura respecto al tipo de diámetro de gota utilizada. Se presenta una mayor ZAC para los ensayos con un menor diámetro de gota metálica debido a la mayor energía del arco. Esto se explica con el apoyo del análisis realizado a los gráficos de la Figuras 2 y 4 (sección 3.3 y 3.4) que corresponden a la energía de soldadura y a la tensión media del arco para diámetros de gota mayor y menor respecto al diámetro del alambre tubular.

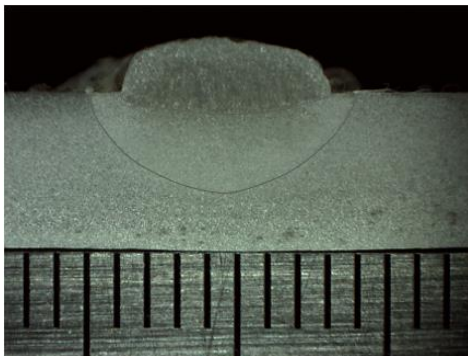
$$D_g > D_e$$



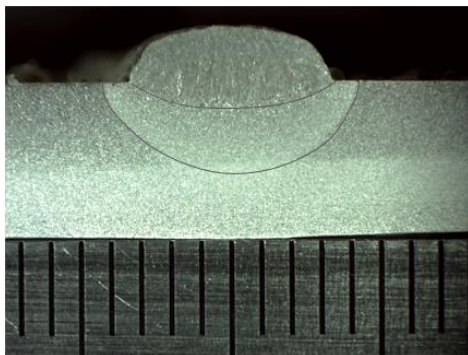
02. $D_g = 1,25 \text{ mm}$



03. $D_g = 1,30 \text{ mm}$



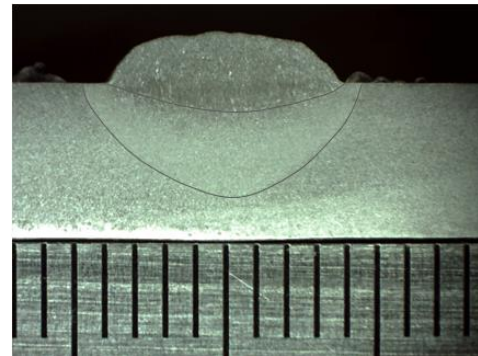
04. $D_g = 1,35 \text{ mm}$



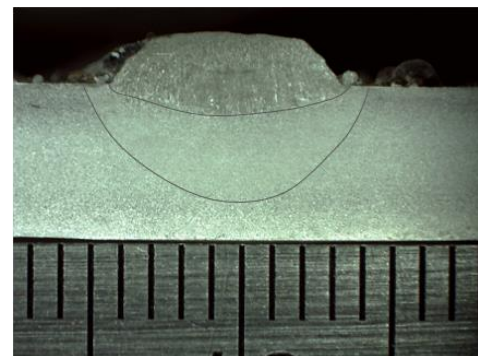
05. $D_g = 1,40 \text{ mm}$

Figura 15. Macrografías para los ensayos 02 al 05. Fuente: elaboración propia.

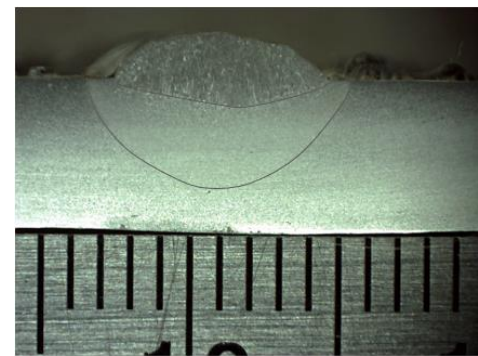
$$D_g < D_e$$



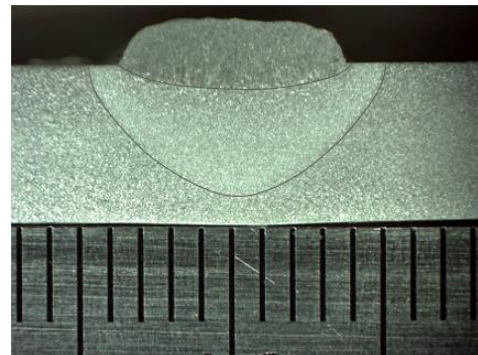
06. $D_g = 1,15 \text{ mm}$



07. $D_g = 1,10 \text{ mm}$



08. $D_g = 1,05 \text{ mm}$



09. $D_g = 1,00 \text{ mm}$

Figura 16. Macrografías para los ensayos 06 al 09. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Con base en los resultados alcanzados, se concluye:

1. Se observa que para un $D_g > D_e$ la energía de soldadura presenta una disminución. Esta disminución en la energía de soldadura es originada por una tendencia a la baja de la tensión media del arco. El descenso de la tensión media del arco se debe a la menor longitud del arco producto de un mayor diámetro de gota metálica.

2. Considerando un $D_g < D_e$ se presentó que conforme hay una disminución del tamaño de gota metálica existe un aumento de la energía de soldadura. Este aumento es provocado por un aumento de la tensión media producto de una mayor longitud de arco, lo cual se debe a un menor diámetro de gota metálica.

3. El oscilograma correspondiente al ensayo 01, utilizando $D_g = D_e$, presenta una falta de repetitividad en los pulsos e irregularidad del proceso de transferencia metálica, lo cual queda al descubierto por la aparición de un pulso correspondiente a un corto circuito en la etapa de la corriente de base y a la dificultad que hay para distinguir los desprendimientos de gotas metálicas. El análisis del ciclograma evidencia una alta dispersión de los datos, lo que es producto de tener inestabilidad del proceso.

4. Los oscilogramas con un $D_g > D_e$, revelan la ocurrencia de cortos circuitos debido a que no existe un equilibrio entre la alta velocidad de alimentación respecto a la tasa de fusión. El análisis de los ciclogramas revela una falta de concentración de los datos, lo que indica que existe inestabilidad del proceso.

5. Para los ensayos con un $D_g < D_e$, se evidencia menor presencia de cortos circuitos, donde los ensayos 08 y 09 presentan los mejores resultados de todo el estudio. Esto se justifica producto de tener una alta frecuencia de pulsación demostrada por la continuidad de los pulsos del oscilograma y la estabilidad presentada en el ciclograma.

6. Independientemente del diámetro de gota metálica se declara que todos los ensayos presentan algún grado de salpicaduras utilizando corriente continua pulsada, la cual es de un grado similar que el obtenido para una transferencia metálica globular repelida – goticular, contrario a lo que menciona la bibliografía. Las macrografías revelan cordones exentos de socavaciones, porosidades y falta de fusión.

7. Se demostró experimentalmente que es factible obtener una baja corriente media y una baja energía

de aporte cuando se emplea la corriente continua pulsada. Los resultados traen consigo los beneficios mencionados por la bibliografía consultada de la tecnología de la soldadura.

8. Se declara la falta de estabilidad de la técnica aplicada en alambres tubulares autoprotegidos. Sin desmedro a lo anterior la corriente continua pulsada se puede emplear a nivel industrial debido a las bondades que presenta.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a Minetec Ltda. – Chile por el apoyo en la ejecución de esta investigación y a IMC Soldagem por el apoyo en el área técnica.

6. Referencias

- [1] Castro, Elina (2015). Avaliação de soldas produzidas por arames tubulares desenvolvidos em laboratório do tipo básico com adição de polímero como ingrediente do fluxo [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: Centro Federal de educação Tecnológica de Minas Gerais.
- [2] AWS, W. H. Flux Cored Arc Welding. Miami-USA. American.
- [3] Nascimento, A. S. (2005). Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem com arame metal cored [dissertação de mestrado]. Belém: Universidade Federal do Pará.
- [4] Godoy, W. L. D. (2008). Efeito da temperatura de pré-aquecimento e características do pulso na microestrutura de aço estrutural de alta resistência e baixa liga soldado com arco elétrico e proteção gasosa.
- [5] Díaz, VV, Acevedo, FF, & Cunha, TVD (2018). Un aporte a la determinación de variables de corriente continua pulsada para el alambre tubular E71T-1M. Soldadura e inspección, 23, 340-349.
- [6] Nogueira, R. M. U., Bohórquez, C. E. N., & Zanella, I. G. (2015). Comparação da estabilidade do arco e da variabilidade da geometria de soldas obtidas pelos processos MIG/MAG e arame tubular. Soldagem & Inspeção, 20, 191-204.
- [7] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. (2012). A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding. Journal of materials processing technology, 212(6), 1406-1413.
- [8] Norrish, J. (2006). Advanced welding processes. Woodhead publishing limited.