

# Evaluación de la transferencia metálica y estabilidad del proceso GMAW

---

## Evaluation of the metal transfer and stability of GMAW process

Orlando Mauricio Castellanos<sup>1a</sup>, Andrés M. Moreno-Uribe<sup>1b</sup>,  
Sergio Andrés Ramón-Ramón<sup>2a</sup>, José Leonardo Jácome<sup>2b</sup>

<sup>1</sup> Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil. Correos electrónicos: <sup>a</sup> mauriciocastellanosufmg@gmail.com, <sup>b</sup> andresmauriciomu@ufmg.br. Orcid: <sup>a</sup> 0000-0002-7885-4490, <sup>b</sup> 0000-0001-6717-0782

<sup>2</sup> Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Correos electrónicos: <sup>a</sup> sergioandresra@ufps.edu.co, <sup>b</sup> jose.jacome@ufps.edu.co. Orcid: <sup>a</sup> 0000-0002-1310-9182, <sup>b</sup> 0000-0002-6022-6891

Recibido: 21 junio, 2020. Aceptado: 18 diciembre, 2020. Versión final: 4 mayo, 2021.

### Resumen

La transferencia metálica, como particularidad del proceso con electrodos consumibles, ejerce influencia directa sobre variados aspectos del proceso de soldadura; de este modo, el desempeño operacional de la técnica se ve afectado por un mayor o menor nivel de salpicaduras y, en general, por la estabilidad con que los fenómenos eléctricos ocurren. En el presente artículo fue establecida una metodología que permitió comparar técnicas para la definición de la estabilidad, en los tipos de transferencia metálica presentados en el proceso GMAW. Para esto, se realizaron ensayos de soldadura en la posición plana, estableciendo parámetros y variando el voltaje entre un rango de 14 a 32 V. Además, fue analizado el comportamiento del proceso, mediante el uso de histogramas, índices de estabilidad y la caracterización de la geometría del cordón. Como resultado, se obtuvo alta inestabilidad del proceso y salpicaduras en bajas tensiones, mejorando estas condiciones para las tensiones más altas. En conclusión, en el punto de mayor frecuencia de cortos circuitos se establecen las mejores condiciones para el proceso de soldadura, exhibiendo un mínimo de salpicaduras y el cordón de soldadura con mejor formato.

**Palabras clave:** GMAW; estabilidad; procesos de soldadura; transferencia metálica; factor de corto circuito.

### Abstract

The metal transfer, as a particularity of the process with consumable electrodes, has a direct influence on different aspects of the welding process. Hence, the operation performance is affected by the quantity of spatter and mostly, in the stability where the electrical phenomena happen. This work established a methodology to compare techniques for the definition of stability in the forms of metal transfer presented in the GMAW process. For that, welding tests were carried out in the flat position, establishing parameters, and modifying the voltage between a range of 14 to 32 V. In addition, it was analyzed the behavior of the process using histograms, stability indicators, and weld bead geometry characterization. As a result, high process instability and splashing of low voltages were obtained, improving these conditions for higher voltages. In conclusion, the best conditions for the welding process are established at the point with the highest frequency of short circuits, exhibiting a minimum of spatter and the best welding bead.

**Keywords:** GMAW; stability; welding process; metal transfer; short-circuit factor.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: O. M. Castellanos, 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, pp. 47-60, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n3-2021003](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021003)

## 1. Introducción

### 1.1. Generalidades del proceso GMAW

El proceso GMAW (*gas metal arc welding*), también denominado soldadura por arco eléctrico con gas de protección, puede ser descrito como la unión de piezas metálicas producidas por el calentamiento de estas, por medio de un arco eléctrico establecido entre un electrodo metálico sólido consumible y la pieza de trabajo [1], [2]. Como en otros procesos en donde la coalescencia es formada mediante la fusión localizada del material —tales como SMAW, FCAW, SAW, entre otros—, el arco, el charco de soldadura y el cordón resultante necesitan ser protegidos contra la contaminación de elementos presentes en la atmósfera, lo cual es realizado por un gas o mezcla de gases [3], [4]. El proceso es denominado MIG (*metal inert gas*), cuando el gas de protección utilizado es inerte, por ejemplo, argón o helio [5]. Por otro lado, en el proceso MAG (*metal active gas*), la protección se realiza con la ayuda de un gas activo, tales como  $O_2$  o  $CO_2$ , pudiendo también contener mezclas ricas de estos [3], [6]. El proceso GMAW es ilustrado en la figura 1.

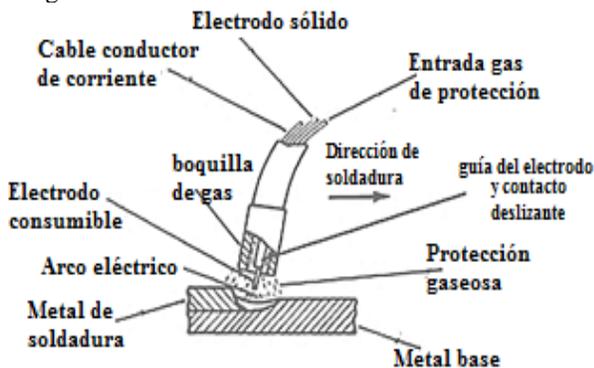


Figura 1. Esquema del proceso GMAW. Fuente: adaptado [12].

El proceso GMAW es extremadamente versátil debido a la variedad de aleaciones soldables, espesores, productividad elevada y viabilidad en relación con otras técnicas [7], [8]. Este sistema ha presentado un mayor crecimiento en términos de uso en los últimos años, lo cual es respuesta a la tendencia de substituir la soldadura manual por sistemas mecanizados y hasta robotizados [9].

Asimismo, la soldadura por arco eléctrico con gas de protección se caracteriza por sus modos de transferencia metálica, los cuales tienen aplicaciones específicas en cuanto a espesor del material base y posición de soldadura [10]. Con todo, esta técnica es extremadamente sensible a cambios en los parámetros de operación, lo

cual puede comprometer el nivel de estabilidad requerido en el arco eléctrico. Por consiguiente, condiciones asociadas a un arco inestable como extinciones del arco, elevado nivel de salpicaduras o transferencia metálica con grandes fluctuaciones ocasionan discontinuidades o irregularidades en el cordón de soldadura resultante [11], [12]. Asimismo, la distribución no uniforme de la temperatura, además de favorecer la fusión localizada de material, permite la ocurrencia de fenómenos indeseables, como el surgimiento de tensiones residuales [11], [13].

La presente investigación consistió en la realización de soldaduras de cordón sobre chapa (posición plana), mediante la definición de un conjunto de parámetros iniciales, generando gradualmente modificaciones sobre aquellas variables con la finalidad de obtener diferentes condiciones de estudio para los fenómenos involucrados.

### 1.2. Tipos de transferencia metálica en GMAW

Hay tres formas principales de transferencia de metales en el proceso GMAW, tal como se muestra en la figura 2: transferencia por corto circuito, transferencia globular y transferencia en aerosol. Además, utilizando equipos capaces de proporcionar corriente con pulsos de alto valor, es posible soldar con una transferencia en aerosol con valores de corriente relativamente bajos (transferencia por pulsos) [14].

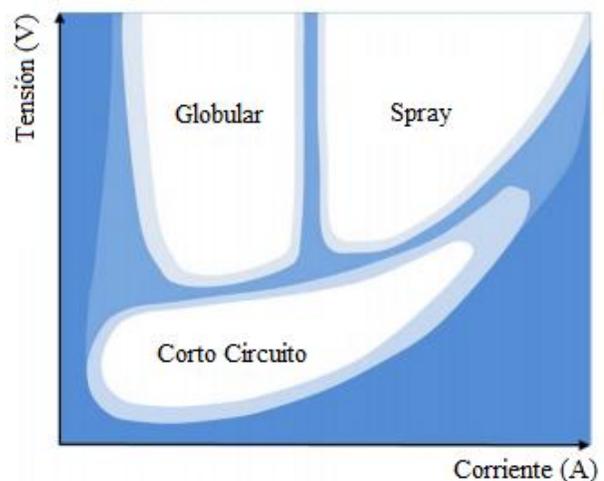


Figura 2. Condiciones de corriente y voltaje para las diferentes formas de transferencia para la soldadura GMAW con un gas de protección a base de argón.

Fuente: [14].

#### 1.2.1. Transferencia por corto circuito

Este tipo de transferencia ocurre en tensiones y corrientes bajas. Es caracterizado por el toque periódico de la gota, que tiene un tamaño aproximado al diámetro del

electrodo [15], [16]. En cada contacto del consumible con el metal base ocurre la extinción del arco, lo que provoca un corto circuito y, posteriormente, la transferencia metálica, siendo aproximadamente entre 20 y 200 gotas por segundo [17], [18] y [19].

Este tipo de transferencia es utilizado para la unión de chapas de menor espesor, debido a que la fusión otorgada genera un pequeño charco de soldadura que provocaría mordedura y otros defectos superficiales en piezas de mayor espesor, debido a la falta de fusión localizada [20].

### 1.2.2. Transferencia globular

Este tipo de transferencia ocurre en tensiones y corrientes moderadas. Es caracterizada por el desprendimiento de gotas, usualmente del doble del diámetro del electrodo, debido a la fuerza de gravedad. Se estima que opera bajo una frecuencia de 1 a 10 gotas por segundo [15], [21]. Este tipo de transferencia metálica no es utilizada industrialmente.

### 1.2.3. Transferencia *spray*

Este tipo de transferencia ocurre en altas corrientes, polaridad positiva, tensiones elevadas y en una atmósfera a base de argón. Es caracterizada por el desprendimiento de gotas de diámetro semejante al del consumible, con una frecuencia de más de 200 gotas por segundo [14]. Debido a que produce charcos de soldadura voluminosos, es aplicable para la unión de piezas de gran espesor, generando, a su vez, menor probabilidad de salpicaduras y defectos superficiales [20].

## 2. Metodología

La tabla 1 muestra los parámetros iniciales que fueron seleccionados, como la configuración de polaridad, la distancia desde la boquilla de contacto hasta la pieza, la velocidad de alimentación del alambre electrodo y el tiempo de adquisición de datos.

Con el uso de un sistema mecanizado de soldadura fue garantizada la velocidad del desplazamiento sobre la chapa metálica. A continuación, se realizaron soldaduras variando la tensión entre los siguientes valores: 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28 y 32 V; y mediante el uso de un sistema de adquisición de datos fueron obtenidas las señales de tensión y corriente para la evaluación del comportamiento del proceso. De este modo, el tratamiento de los datos experimentales fue realizado a través de índices que permitieron comparar e identificar la variabilidad del proceso.

Además, mediante el uso del software Sinal, desarrollado en el Laboratorio de Robótica, Soldadura y Simulación (LRSS) de la Universidad Federal de Minas Gerais UFMG, fueron evaluadas las señales.

Tabla 1. Parámetros iniciales del proceso

Parámetros	Configuración inicial
Posición de la soldadura y característica	Posición plana y soldadura tipo cordón sobre chapa ( <i>bead on plate</i> ).
Tiempo y tasa de adquisición de datos	6 s de adquisición y 10.000 puntos por segundo.
Fuente	Inversal 300 IMC
Gas de protección	Argón con 18 % CO <sub>2</sub>
Flujo volumétrico	15 L min <sup>-1</sup>
Alambre electrodo	ER70S6 de 1,2 mm
Velocidad de alimentación del alambre electrodo	4 m min <sup>-1</sup>
Distancia de la boquilla de contacto hasta la pieza	15 mm
Polaridad	DCEP (electrodo positivo)

Fuente: elaboración propia.

## 3. Resultados

### 3.1. Variación en el comportamiento del proceso GMAW debido al cambio gradual de la tensión

Inicialmente, es mantenida la configuración de polaridad (DCEP), la distancia desde el punto de contacto deslizante hasta la pieza DBCP (15 mm), la velocidad de alimentación del alambre (4 m min<sup>-1</sup>) y el tiempo de adquisición de datos en 6 s.

De este modo, 60.000 puntos obtenidos mediante el sistema de adquisición son representados por un método de tratamiento de datos experimental de uso común por investigadores: histogramas. Esta herramienta científica y matemática suministra informaciones sobre el carácter de repetitividad de los fenómenos de transferencia metálica [22].

Con todo, fueron fusionados los histogramas para las 8 variaciones de tensión, tal como se puede observar en la figura 3. En función del incremento de la tensión (longitud del arco), el número de observaciones en el rango de valores de cortos circuitos (tensión de 0 a 10 V) disminuye. Así, el tiempo de arco abierto aumenta y, con esto, cambia el tipo de transferencia (a partir de 28 V).

También, del lado derecho del gráfico son detallados dos picos fijos en 60 V, estos puntos son representaciones de extinciones del arco (tensión en vacío de la fuente), que clasifican el proceso de soldadura para estas tensiones como inestables. Además, en la tabla 2 son presentados los análisis cuantitativos de las señales. Para los ensayos, la tensión fue configurada de 14 a 32 V (véase figura 3).

En la figura 4 se refleja que la tensión de soldadura es la media aritmética de todos los puntos del oscilograma, siendo, por esta razón, la variación que ha ocurrido, en función de las fluctuaciones del sistema.

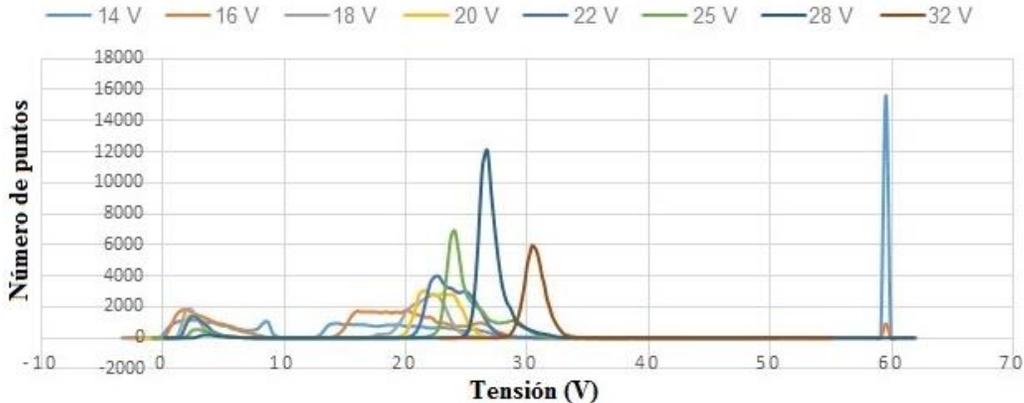


Figura 3. Histograma de tensión para configuraciones de 14 a 32 V. Fuente: elaboración propia.

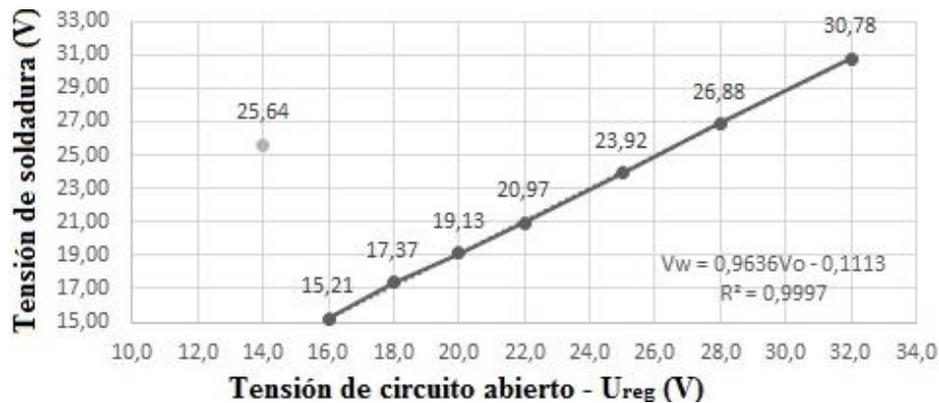


Figura 4. Relación entre la tensión de soldadura y la tensión de circuito-abierto. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Análisis cuantitativo de las señales para las tensiones de operación de 14 a 32 V

U <sub>reg</sub> (V)	DCEP	OBCP (mm)	Tiempo (s)	Tensión (V)				Corriente (A)				Valor Corte	Tiempo (ms)			Fcc (%)	fcc
				V <sub>prom</sub>	Desvío	Eficaz	Kv(U)	A <sub>prom</sub>	Desvío	Eficaz	Kv (I)		periodo	arco	corto		
14,0	+	15,0	6,0	25,64	21,64	33,55	84,40%	134,87	144,32	199,63	107,01%	11,50	42,73	29,42	13,31	31,2	0,02
16,0	+	15,0	6,0	15,21	8,59	17,47	56,51%	154,13	116,31	193,08	75,46%	12,00	24,89	17,22	7,67	30,8	0,04
18,0	+	15,0	6,0	17,37	8,20	19,21	47,22%	151,12	45,86	157,93	30,35%	14,00	13,54	10,39	3,16	23,3	0,07
20,0	+	15,0	6,0	19,13	7,89	20,70	41,25%	155,99	40,49	161,16	25,95%	15,00	16,32	13,21	3,11	19,1	0,06
22,0	+	15,0	6,0	20,97	7,52	22,28	35,84%	161,94	47,89	168,87	29,51%	16,00	20,44	17,45	2,99	14,7	0,05
25,0	+	15,0	6,0	23,92	5,88	24,64	24,60	159,18	62,88	171,15	39,50%	18,00	52,40	48,63	3,77	7,20	0,02
28,0	+	15,0	6,0	26,88	3,45	27,10	12,84%	169,56	37,73	173,71	22,25%	18,50	88,75	86,97	1,78	2,01	0,01
32,0	+	15,0	6,0	30,78	0,97	30,80	3,14%	176,81	23,38	178,35	13,22%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

U<sub>reg</sub>: tensión configurada en la fuente, V<sub>prom</sub>: tensión promedio, A<sub>prom</sub>: corriente promedio, Kv: coeficiente de variación, Fcc (%): factor de corto circuito, fcc: frecuencia de corto circuito. Fuente: elaboración propia.

Para el punto que no se encuentra incluido en la línea, la tensión del ensayo fue de 14 V. Sin embargo, el promedio de esta magnitud tiene un valor de 25,64 V, siendo este el resultado de la alta inestabilidad del proceso en bajas tensiones, tal como se muestra en la figura 5.

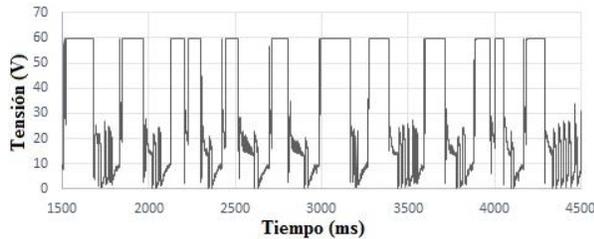


Figura 5. Oscilograma para 14 V en el rango de 1,5 a 4,5 s. Fuente: elaboración propia.

De este modo, instantes en que el arco eléctrico se encuentra en extinción (tensión en vacío) constituyen una porción representativa de la alta tensión en promedio. Además, al relacionar los picos de tensión con el oscilograma de corriente, se evidencia la presencia de puntos de corriente con un valor en cero, fomentando así el apagamiento del arco eléctrico. La figura 6 presenta la vista lateral y superior del cordón resultante de la configuración anterior.

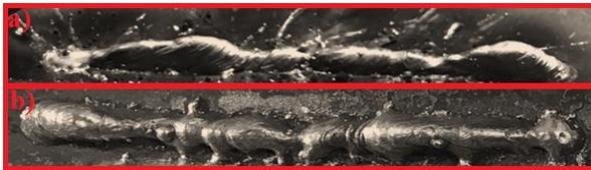


Figura 6. Cordón realizado con una tensión de 14 V (a) vista lateral, (b) vista superior. Fuente: elaboración propia.

Por su parte, la desviación estándar (véase la tabla 2), la cual permite identificar y comparar la variabilidad en muestras (dispersión estadística), decrece en función del incremento de la tensión. El hecho anterior refleja que el sistema alcanza niveles más estables, donde las oscilaciones de tensión y de corriente durante la soldadura son menores.

Sin embargo, en general, no es posible categorizar la estabilidad de todo el proceso únicamente haciendo uso de la desviación estándar de los puntos que representan en tiempo total de soldadura. Muchos fenómenos son únicamente observados en los oscilogramas de tensión y corriente; de este modo, para el proceso configurado en 18 V, el sistema presenta una tensión promedio de 17,37 V y una desviación estándar de 8,20 V, no obstante, el oscilograma de tensión, mostrado en la figura 7, apunta a variaciones importantes en el periodo de transferencia metálica (T). Como es bien sabido, la transferencia metálica afecta la geometría resultante del cordón de soldadura: si la transferencia de metal es estable, con ella la distribución de calor para la soldadura también lo es, y, así, la geometría del cordón y las transformaciones metalúrgicas serán constantes. De este modo, las ondas características del refuerzo exponen el historial de solidificación y son el parámetro inicial de evaluación de la calidad de la soldadura (por medio de inspección visual).

Es posible relacionar, entonces, el aumento en el periodo de transferencia metálica en un determinado rango del proceso con los defectos sobre las ondas del refuerzo, evidenciado en la figura 8.



Figura 8. Cordón de soldadura obtenido para una tensión de 18 V. Fuente: elaboración propia.

Aunque el refuerzo sea descartado en los procesos reales de aplicación de soldadura (relleno de junta), este permite evaluar la interligación de parámetros eléctricos del arco (corriente, tensión y polaridad) y las características del proceso (tipo de gas de protección, diámetro del electrodo, posición de soldadura, velocidad de soldadura, etc.). Además, como respuesta al fenómeno anterior, se puede relatar que el mayor periodo de transferencia metálica puede estar relacionado a una característica del proceso, como lo sería una deficiencia en la alimentación del electrodo o la dinámica propia del charco de soldadura y las gotas de metal líquido.

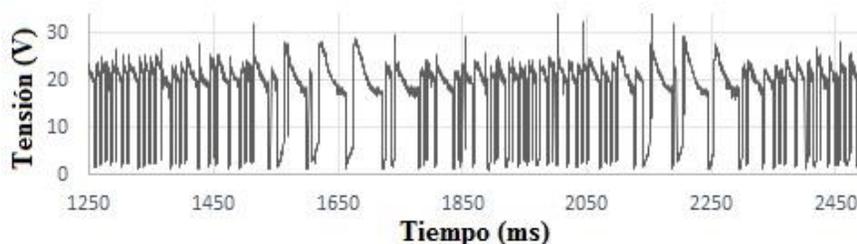


Figura 7. Oscilograma para tensión de 18 V. Fuente: elaboración propia.

Con todo, algunos autores ejemplifican el uso de otros factores, como en el caso del coeficiente de variación (Kv) [23]; es relatado que este índice es más útil en la tarea de medir la dispersión en términos relativos. En la figura 9 es presentada la variación del índice descrito anteriormente y la tensión promedio del proceso. El gráfico refleja que entre más corto el arco eléctrico, mayor es el valor del índice KvU. Lo anterior puede ser explicado por el hecho de que cuando el arco es más corto, se tiene una mayor probabilidad de que la gota toque el charco de fusión durante su formación y desprendimiento.

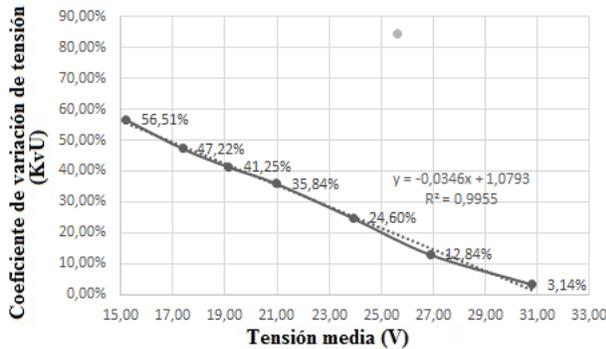


Figura 9. Coeficiente de variación de tensión vs. tensión media. Fuente: elaboración propia.

Nuevamente, el punto excluido de la recta representa la mayor inestabilidad (tensión media= 25,64 V; KvU= 84,40 %). Es interesante resaltar que estos índices tienen aplicación en la evaluación de la transferencia metálica por corto circuito, donde las fluctuaciones son mayores. También, otros autores evaluaron la estabilidad del proceso con índices. El factor de corto circuito (Fcc) [24] cuantifica la presencia de “cortos circuitos” durante la soldadura. Para esto, fue definida, entonces, una tensión de referencia, la cual será llamada “valor de corte” (véase figura 10).

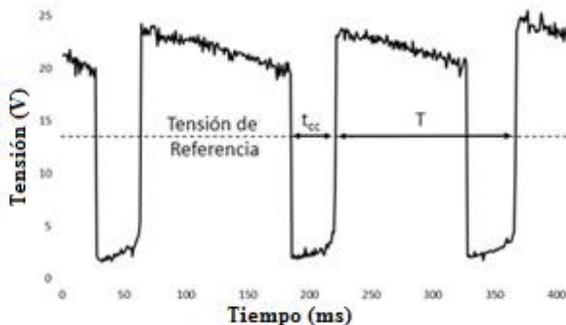


Figura 10. Definición del periodo de transferencia metálica (T) y el tiempo de corto circuito (tcc). Fuente: adaptado [24].

Asimismo, en la figura 11, se evidencia que el Fcc disminuye con el aumento de la tensión del arco eléctrico, indicando que la ocurrencia de los eventos de corto circuito es reducida con la longitud del arco. Además, cuando el proceso cambia de modo de transferencia con el aumento de la tensión, este factor no tiene relevancia (véase tabla 2). Por último, la figura 12 expone una condición que generalmente representa el punto de estabilidad del proceso GMAW en corto circuito, en el cual, el periodo y la tensión tienen los valores de 13,54 ms y 17 V, respectivamente. Según la literatura, el valor mínimo del periodo de transferencia corresponde a gotas de metal de adición transferidas y con menor diámetro posible, llevando en consideración las menores oscilaciones en la corriente de corto circuito [23].

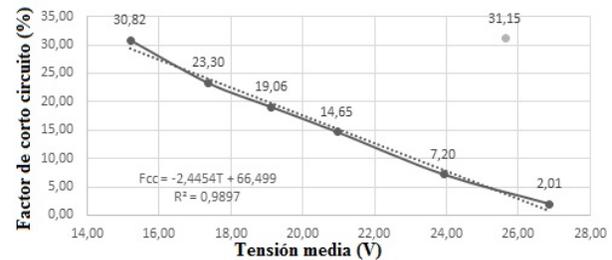


Figura 11. Variación de factor de corto circuito con la tensión media para un electrodo ER70S6 de 1,2 mm, con gas de protección: Ar-18 % CO<sub>2</sub>. Fuente: elaboración propia.

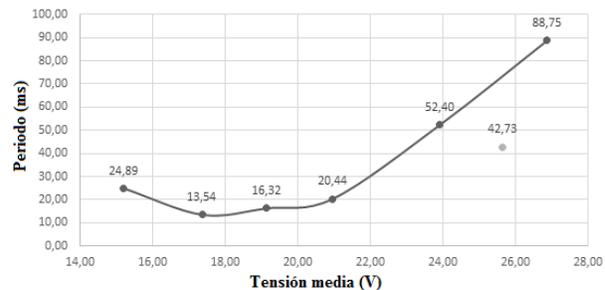


Figura 12. Variación del periodo medio de transferencia de metal con la tensión media para un electrodo ER70S6 de 1,2 mm y gas de Protección: Ar-18 % CO<sub>2</sub>. Fuente: elaboración propia.

La figura 13 presenta la relación entre la frecuencia de cortos circuitos (definida como  $f_{cc} = 1/T$ ) y la tensión media del proceso. Es considerado [23] que la estabilidad es mayor en el punto de máxima frecuencia de cortos circuitos, como resultado de una menor generación de salpicaduras en el proceso para estas condiciones.

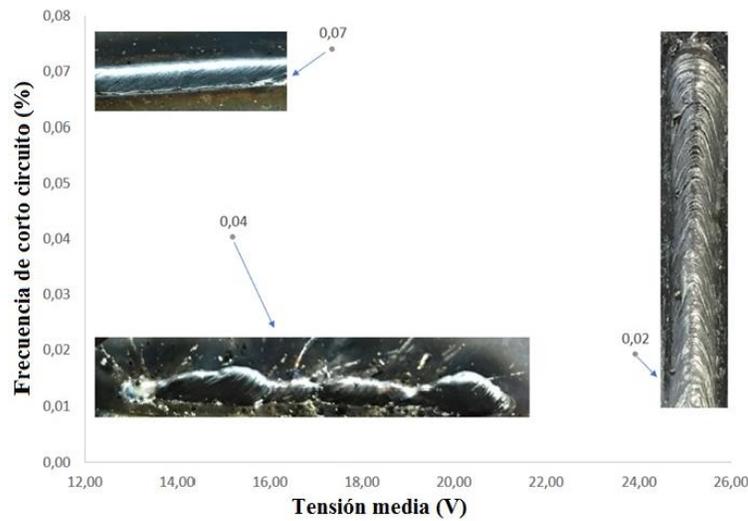


Figura 13. Puntos seleccionados del trazado de frecuencia de cortos circuitos vs. tensión media de soldadura, y su relación con el aspecto del cordón. Fuente: elaboración propia.

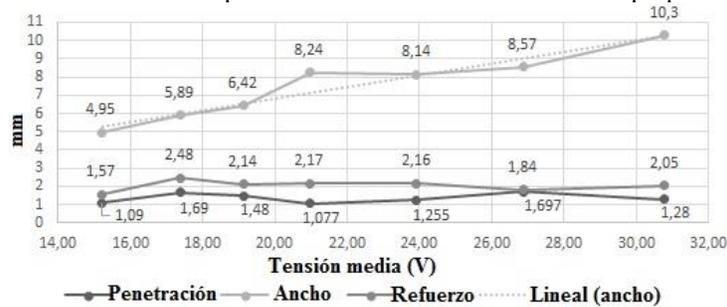


Figura 14. Morfología del cordón en función de la tensión media de soldadura. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos después de cortar secciones transversales del centro del cordón de soldadura y lijarlas hasta granulometría 600, para, posteriormente, ser atacadas con nital 5 %. Cabe resaltar que con el uso del *software* libre ImageJ fue medido el formato del cordón.

Tabla 3. Morfología del cordón de soldadura para valores de tensión de 14 hasta 32 V

Tensión de referencia (V)	Morfología del cordón (mm)		
	Ancho	Refuerzo	Penetración
14	4,450	2,550	0,461
16	4,950	1,570	1,090
18	5,890	2,480	1,690
20	6,420	2,140	1,480
22	8,240	2,170	1,077
25	8,140	2,160	1,255
28	8,570	1,840	1,697
32	10,300	2,050	1,280

Fuente: elaboración propia.

Asimismo, al analizar la figura 14, se puede determinar el aumento en el ancho del cordón de soldadura con el incremento de la tensión media (como es ampliamente relatado en la literatura [25]), presentando una relación casi lineal. Sin embargo, este comportamiento no es observado para el refuerzo o la penetración.

También es interesante discutir que la penetración y el refuerzo son máximos en el punto de mayor frecuencia de cortos circuitos (o menor periodo medio de transferencia metálica), indicando condiciones óptimas de estabilidad: menor pérdida de metal de adición como resultado de una menor cantidad de salpicaduras.

También, una representación de las variaciones en el formato del cordón de soldadura con el incremento de la tensión es exhibido en la figura 15. Igualmente, son presentados los tiempos de corto circuito en función del incremento de la tensión media. En este punto, es interesante evaluar que, para las tensiones de circuito abierto (U<sub>reg</sub>) de 18, 20 y 22 V (tensiones medias de 17,37; 19,13; y 20,97 V, respectivamente), el tiempo de corto circuito (tcc) es “casi constante” (véase figura 16).

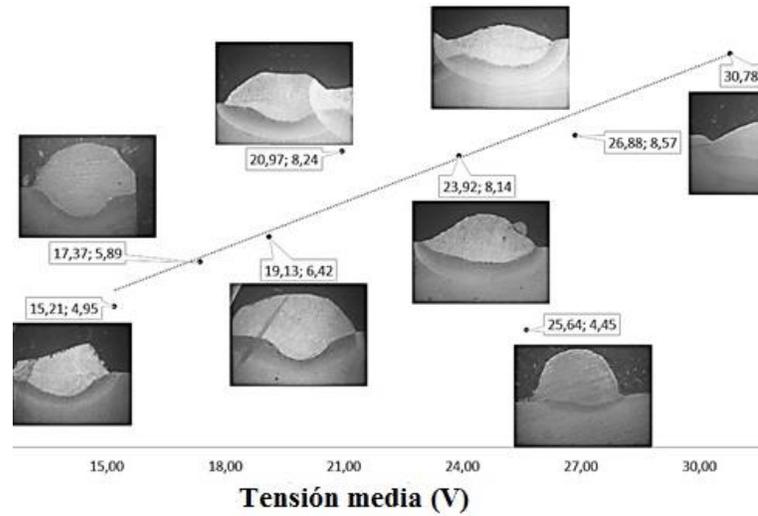


Figura 15. Morfología del cordón de soldadura en función de la tensión media. Fuente: elaboración propia.

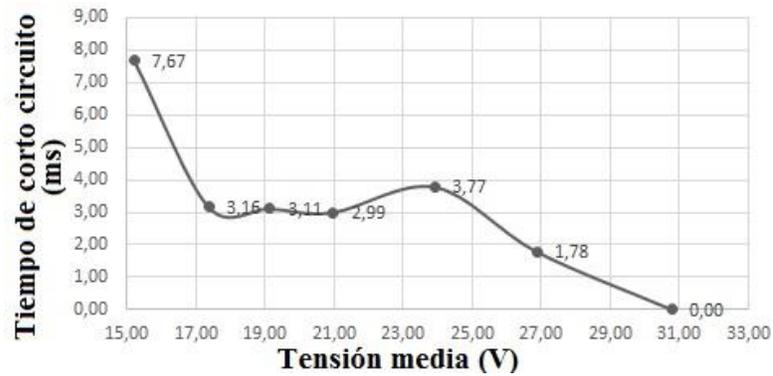


Figura 16. Variación del tiempo de corto circuito con la tensión de soldadura. Fuente: elaboración propia.

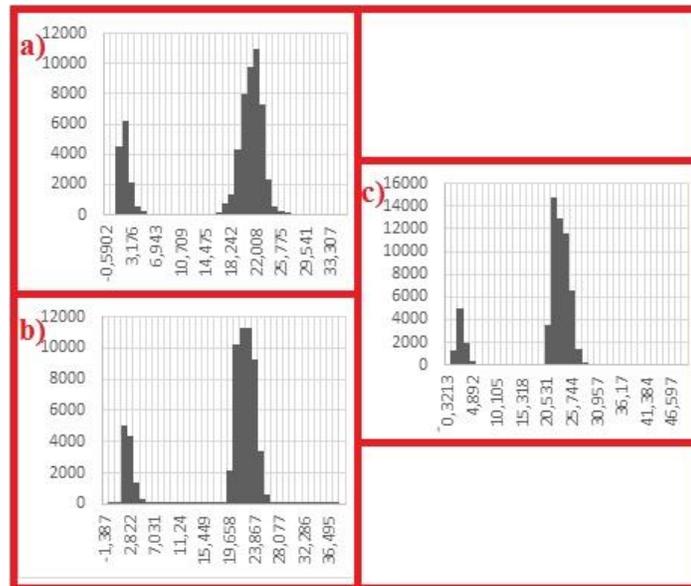


Figura 17. Histogramas de la variación de la penetración en función del tiempo de corto circuito. (a) 18 V, (b) 20 V, (c) 22 V. Fuente: elaboración propia.

Así, las principales variaciones se presentan en tiempo de arco abierto, como demuestran los histogramas elaborados en la figura 17. El número de ocurrencias de la tensión en arco abierto pasa de 46.009 puntos para 48.535 y 51.118 con el incremento de la tensión.

La primera idea que se tendría dentro del tipo de transferencia por corto circuito es que un tiempo de arco mayor da una penetración resultante mayor como consecuencia; sin embargo, esta hipótesis no está sustentada experimentalmente. Pese a que se entiende que cuando sucede un corto circuito, el arco se extingue, es de suponer que una mayor cantidad de “extinciones” no permitirían el suministro de energía necesario para resultar en una buena penetración.

Por lo tanto, la frecuencia máxima de cortos y un tiempo de duración alto en estos generan una penetración destacada, como se muestra en la figura 18.

La ocurrencia de perturbaciones en el proceso de soldadura, conocidas como cortos circuitos rápidos, causa fuertes alteraciones en el arco y representa una importante fuente de salpicaduras [26]. Este factor reduce la estabilidad y, de esta manera, si el tiempo de arco es mayor, la probabilidad de que sucedan cortos circuitos rápidos aumenta para este tipo de transferencia (además, en función del tipo de gas de protección, consumible, etc.).

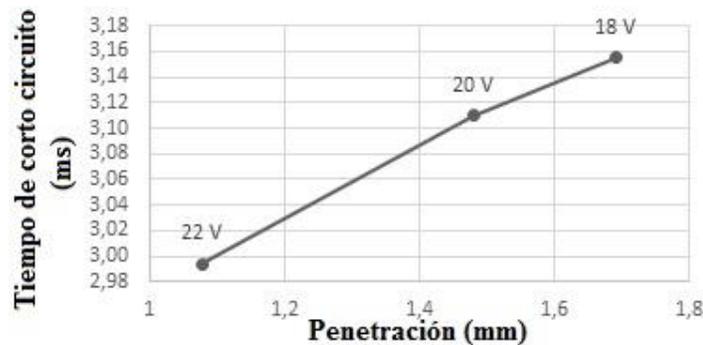


Figura 18. Variación de la penetración con el tiempo de corto circuito. Fuente: elaboración propia.

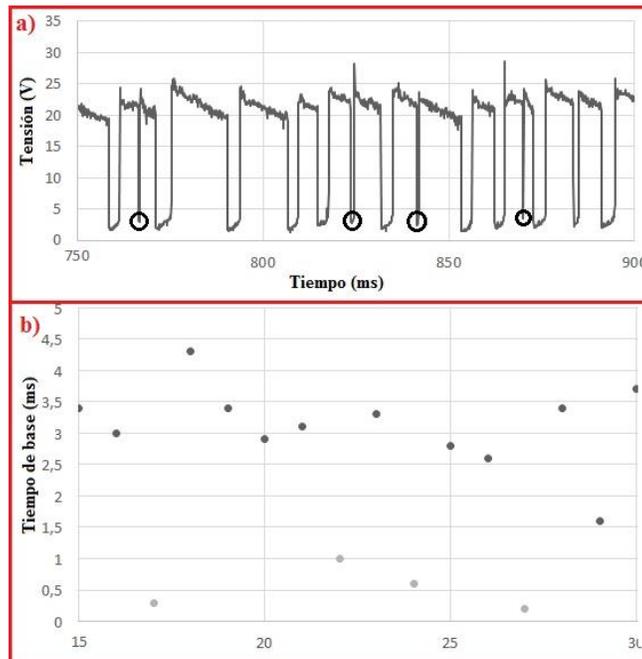


Figura 19. (a) Ocurrencia de cortos circuitos rápidos para un oscilograma de tensión entre 750 y 900 ms; (b) cortos circuitos rápidos representados en el tiempo base (duración del fenómeno de transferencia). Fuente: elaboración propia.

Como ejemplo, el oscilograma correspondiente al ensayo realizado con un tensión de 18 V es exhibido en la figura 19.

En el rango de 750 a 900 ms, es posible evidenciar la ocurrencia de cuatro perturbaciones (señaladas por círculos). Utilizando la misma metodología para la definición del periodo de transferencia y el tiempo de corto circuito, un corte es realizado para un valor de referencia de 10 V, posibilitando la obtención de los datos de tiempo base de los cortos circuitos. Como es presentado, los picos negativos de corriente son mostrados, evidenciando tiempos bases menores a 1 ms (cortos circuitos rápidos).

**3.2. Variaciones en el comportamiento del proceso GMAW generadas por cambios en las características operacionales del proceso**

La tabla 4 muestra los análisis cuantitativos de las señales obtenidas durante las soldaduras. Desde este punto en adelante, los cambios en las características operacionales del proceso serán comparados con el ensayo para una tensión de 20 V.

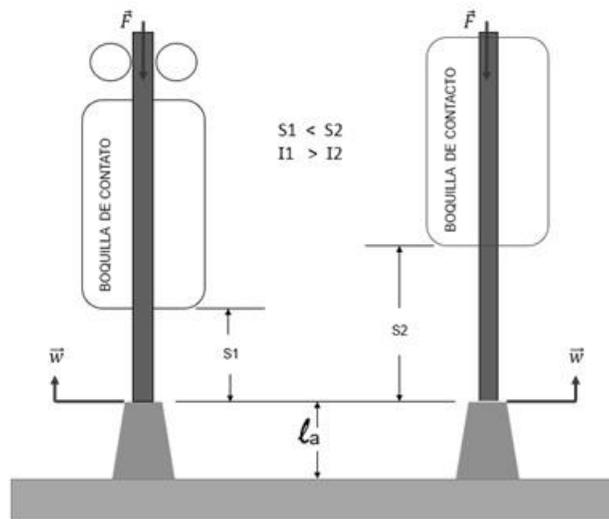
En primer lugar, fue comparado el incremento en 10 mm de la distancia desde la boquilla de contacto hasta la pieza. Los oscilogramas de tensión y corriente no presentan diferencias significativas; sin embargo, la corriente media en la señal de referencia (tensión de 20 V, resaltado de gris en la tabla 4) es mayor en comparación con la misma grandeza correspondiente a una DBCP de 25 mm.

Lo anterior es una clara respuesta a la necesidad de mantener la tensión constante como característica de la fuente y, también, como resultado de mantener la tasa de fusión y la tasa de alimentación “constantes” ( $w \rightarrow (f) \rightarrow$ ), tal como es mostrado en la figura 20. Por el hecho de aumentar la DBCP, el *stick-out* (que está en relación directa) aumenta y, así, la tensión en el alambre electrodo energizado incrementa para un resistor mayor en 25 mm, resultando en una caída de tensión registrada en el arco (véase figura 21). Como consecuencia, para una configuración de DBCP de 25 mm, se presenta un mayor número de cortos circuitos y una menor estabilidad.

Tabla 4. Análisis cuantitativo de las señales para la tensión de 20 V y variaciones en las características operacionales

U <sub>reg</sub> (V)	Polaridad	DBC p (mm)	Tiempo (s)	Tensión (V)				Corriente (A)				Valor Corte	Tiempo (ms)			Fcc (%)	fcc	Resistencia (U/A)	Potencia (U*A)	w (m/min)	U <sub>arc</sub> (V)	I <sub>arc</sub> (A)	U <sub>corto</sub> (V)	I <sub>corto</sub> (A)
				V <sub>prom</sub>	Desvío	Eficaz	Kv(U)	A <sub>prom</sub>	Desvío	Eficaz	Kv(I)		periodo	arco	corto									
20,0	+	15,0	6,0	19,13	7,89	20,70	41,25%	155,99	40,49	161,11	25,95%	15,0	16,32	13,21	3,11	19,06	0,06	0,12	2984,24	4,00	22,90	152,80	3,13	169,42
20,0	+	25,0	6,0	19,14	7,66	20,62	40,00%	135,92	35,47	140,47	26,10%	14,0	14,38	11,50	2,87	19,98	0,07	0,14	2602,05	4,00	22,89	132,63	4,17	148,65
20,0	+	15,0	6,0	18,83	8,59	20,70	45,59%	165,17	30,19	167,91	18,28%	15,0	12,49	9,69	2,80	22,44	0,08	0,11	3110,48	4,00	23,42	163,66	3,03	170,38

U<sub>reg</sub>: tensión configurada en la fuente, V<sub>prom</sub>: tensión promedio, A<sub>prom</sub>: corriente promedio, Kv: coeficiente de variación, Fcc (%): factor de corto circuito, fcc: frecuencia de corto circuito. Fuente: elaboración propia.



$l_a$ = longitud de arco; S = stick-out; I = corriente;  $\vec{F}$ = velocidad de alimentación en media;  $\vec{W}$ = velocidad de fusión en media. Figura 20. Esquema representado un aumento en el *stick-out*. Fuente: elaboración propia.



Figura 21. Variación del Fcc en función de la tensión durante los periodos de arco. Fuente: elaboración propia.

Por su parte, características importantes son evidenciadas en la morfología del cordón para estos ensayos (véase figura 22). Para la configuración con mayor DBCP, la penetración y el refuerzo, 1,51 mm y 2,68 mm, son mayores. Se esperaría que en la configuración con una mayor corriente, la penetración fuese mayor; sin embargo, esto es reflejado en una mayor área de fusión. Al comparar las dos macrografías, la figura 22 (b) presenta una disminución de la fusión del metal base sobre las laterales del cordón, y, con esto, una penetración en *finger* más notable que la configuración para DBCP de 15 mm. De este modo, al tener una menor longitud de arco, la presión del arco eléctrico sobre el charco de fusión es mayor, sirviendo como posible respuesta de estos resultados. Además, una mayor ganancia de energía de las gotas de metal de adición, como resultado de un efecto Joule más fuerte, puede influir de manera importante.

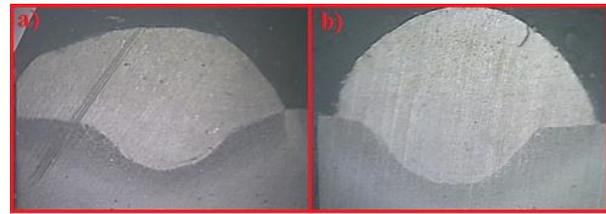


Figura 22. Sección transversal de cordones realizados con 20 V (a) DBCP 15 mm y (b) DBCP 25 mm. Fuente: elaboración propia.

Como es mostrado en la figura 23, durante los periodos de corto (cuando la corriente aumenta), la tasa de crecimiento fue de 33,26 kA/s para una corriente de corto de 169,42 A. Por su parte, para el oscilograma en la figura 24, la tasa de crecimiento tiene un valor de 19,56 kA/s (170,38 A en corriente de corto). Una primera conclusión al respecto de la inductancia se base en que esta altera la estabilidad del proceso. De este modo, el efecto de corto circuito es menor para la inductancia baja (con -6,91 kA/s tasa de reducción). Sin embargo, en la alta inductancia, el factor de cortos es mayor y la frecuencia también (-5,11 kA/s tasa de reducción). Asimismo, se puede evidenciar que con el ajuste de la tasa de crecimiento de la corriente de soldadura son obtenidas para una alta inductancia las mayores dimensiones en la morfología, mostrando ondas más suaves en el aspecto del cordón de soldadura.

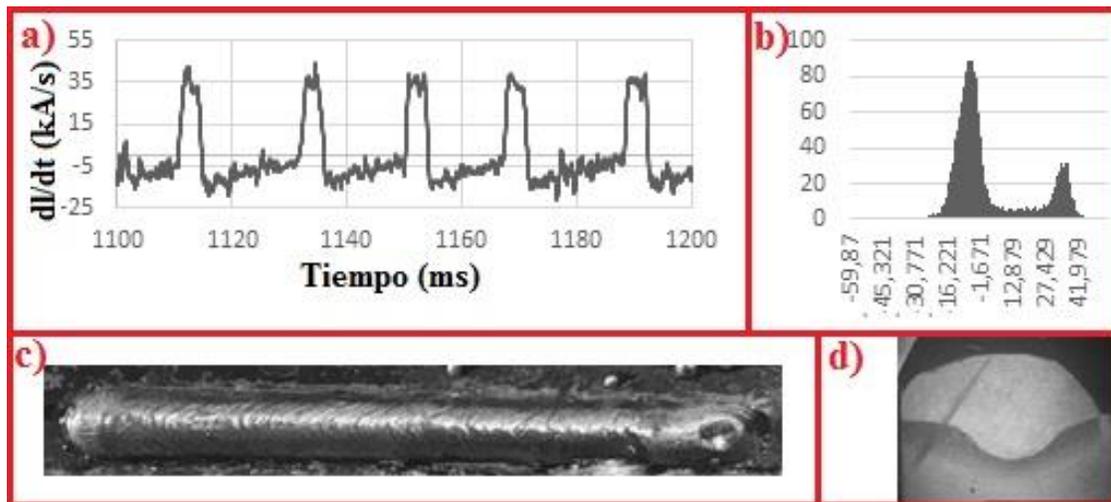


Figura 23. Inductancia baja: tensión de 20 V con alimentación de 4 m min<sup>-1</sup> y gas Ar-18 % CO<sub>2</sub>; (a) oscilograma, (b) histograma, (c) vista superior cordón, (d) metalografía sección transversal. Fuente: elaboración propia.

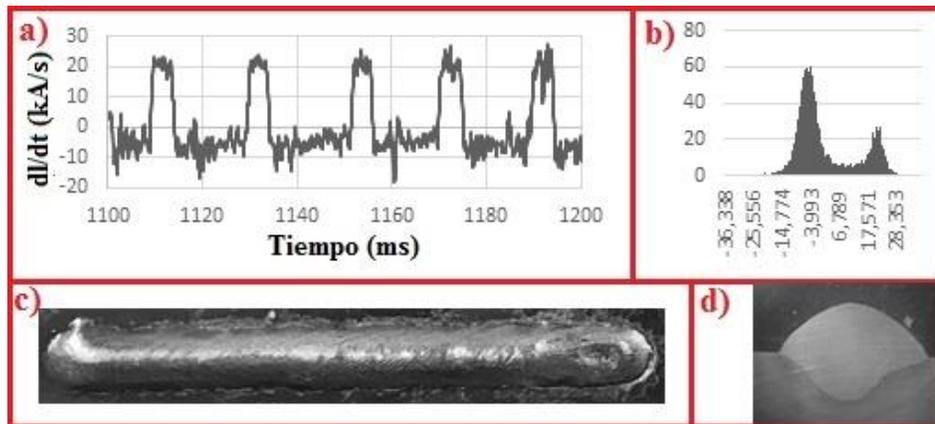


Figura 24. Inductancia alta: tensión de 20 V con alimentación de 4 m min-1y Gas Ar-18 % CO<sub>2</sub>; (a) oscilograma, (b) histograma, (c) vista superior cordón, (d) metalografía sección transversal. Fuente: elaboración propia.

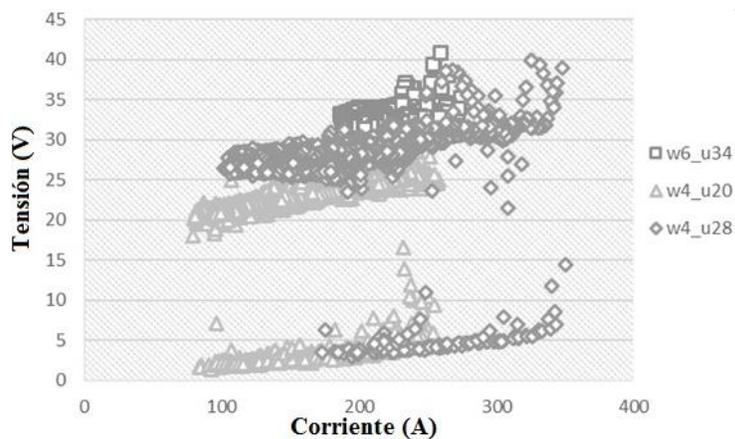


Figura 25. Ciclograma de corriente vs. tensión. Fuente: elaboración propia.

Por último, el ciclograma de la figura 25 exhibe las nubes de puntos que representan las variaciones en la velocidad de alimentación y el incremento de la tensión. Puede ser evidenciado el desplazamiento de los puntos para un nivel de mayor tensión, representado una menor dispersión de puntos y un cambio en el tipo de transferencia metálica.

#### 4. Conclusiones

A manera de principales resultados del trabajo desarrollado anteriormente, son expuestas las siguientes conclusiones:

Se reafirma el uso de histogramas como una herramienta que exhibe fácilmente el comportamiento en relación con la transferencia metálica (principalmente para corto circuito y globular), permitiendo la caracterización de puntos importantes del proceso y una primera idea de estabilidad; por ejemplo, se puede mostrar que en función del incremento de la tensión (longitud del arco), el número de observaciones en el rango de valores de

cortos-circuitos (tensión de 0 a 10 V) disminuye. Además, el tiempo de arco abierto aumenta y, con esto, cambia el tipo de transferencia (a partir de 28 V). La interligación de parámetros eléctricos del arco puede ser evidenciada bajo la luz del formato del refuerzo, el cual indica variaciones durante el proceso y expone el historial de solidificación en el cordón de soldadura.

La desviación estándar por sí sola no permite una clara definición de estabilidad. Índices como la constante de variación y el factor de corto circuito suministran de una manera más detallada el análisis de los fenómenos de transferencia metálica. El punto de mayor frecuencia de cortos circuitos establece las mejores condiciones para el proceso de soldadura, exhibiendo un mínimo de salpicaduras y el cordón con mejor formato.

Perturbaciones en el proceso de transferencia metálica involucran inestabilidad. La presencia de cortos circuitos “rápidos”, como resultado de la dinámica entre el charco de soldadura y la gota líquida, puede ser acompañada por medio del estudio de los oscilogramas de tensión.

## Recomendaciones

Debido a la importancia del proceso GMAW, que permite la soldabilidad de la mayoría de los metales en diferentes configuraciones de espesor, es necesario, a futuro, intensificar el estudio del comportamiento de la estabilidad y del formato de los cordones resultantes, mediante la variación de diferentes parámetros iniciales, relacionados con velocidad de soldadura, polaridad, tensión, gas de protección, material del alambre usado, entre otros; los cuales permitan dar una idea más detallada del cambio del comportamiento del proceso, siendo, a su vez, aplicadas pruebas de hidrogeno difusible y resistencia mecánica, que ayuden a la obtención de metales soldados con mejores características metalúrgicas y mecánicas.

## Referencias

- [1] P. Marques, P.J. Modenesi y A. Bracarense, *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. Rio de Janeiro, Brasil: 4 Ed. Elsevier, 2017.
- [2] A.M. Borba, “Estudo do efeito do aporte térmico nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável duplex UNS S 31803 em chapa grossa, soldado pelo processo GMAW”, tesis de maestría, Univ. Federal de Minas Gerais, 2010.
- [3] A. Resende, “Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico”, tesis de maestría, Univ. Federal de Minas Gerais, 2007.
- [4] E. Wainer, S. Brandi y F. Décourt, *Soldagem Processos e Metalurgia*. São Paulo, Brasil: 1. Ed. Blucher, 2008.
- [5] L. Araújo Batista, “Soldagem MIG/MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L”, tesis de maestría, Univ. Federal de Minas Gerais, 2018.
- [6] D. Tolotti de Almeida, A. Santos Piovesan, J.H. Correa de Souza y M.R. Klhan Kuntz, “Influência do gás de proteção sobre a quantidade de escória de solda e propriedades mecânicas de juntas de aço carbono soldadas pelo processo MAG”, *Rev. Tecn. Metal. Mater.*, vol. 15, no. 3, pp. 333-340, 2018, doi: 10.4322/2176-1523.01404
- [7] A. Quites, *Introdução à Soldagem a Arco Voltaico*. Florianópolis, Brasil: 1 Ed. Soldasoft, 2002.
- [8] L. Juliani, “Utilização de um sistema de controle por oscilação magnética para a deposição de metal em passe de raiz utilizando o processo GMAW”, tesis de maestría, Univ. Federal de Minas Gerais, 2014.
- [9] I. G. Machado, *Soldagem e técnicas conexas: processos*. Porto Alegre, Brasil, 1996.
- [10] A. Fischer, “Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW- Arco Pulsado”, tesis de doctorado, Univ. Federal de Minas Gerais, 2011.
- [11] J. Henrique Pereira, “Monitoramento contínuo de distorções utilizando sensores a lasers durante o processo de soldagem GMAW robotizado de modelos reduzidos em escala de anéis segmentados”, tesis de maestría, Univ. Federal de Minas Gerais, 2015.
- [12] D.L. Olson, T.A. Siewert, S. Liu y G.R. Edwards, “Metals Handbook – Vol 6: Welding Brazing and Soldering”, en *ASM Handbook Committee*. Estados Unidos: ASM International, 1993, pp. 1066-1069.
- [13] P.J. Modenesi, P.V. Marques y D.B. Santos, *Introdução à Metalurgia da soldagem*. Belo Horizonte, Brasil, 2012.
- [14] P.J. Modenesi, “Transferência de Metal na Soldagem GMAW (MIG/MAG)”, 2012. [En línea]. Disponible en: [https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/Prat\\_Transf\\_Metal.pdf](https://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/Prat_Transf_Metal.pdf).
- [15] E.B. Gomes, “Análise do comportamento da soldagem por curto-circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da Metodologia Taguchi”, tesis de maestría, Univ. Federal de Itajubá, 2006.
- [16] D. Souza, M. Lemos Rossi, F. Keochegueirans, V. Castanheira Nascimento, L. Oliveira Vilarinho, A. Scotti, “Influência da tensão de soldagem e do gás de proteção sobre a correlação entre indutância e regularidade da transferência metálica na soldagem MIG/MAG por curto-circuito”, *Rev. Soldagem & Insp.*, vol. 16, no.2, pp. 114-122, 2011, doi: 10.1590/S0104-92242011000200004
- [17] H.C. Miranda, “Influencia da Indutância na Soldagem MIG/MAG na Posição Sobre-Cabeça”, tesis de maestría, Univ. Federal de Uberlândia, 1999.
- [18] J.C. Dutra y R. Gonçalves Silva, “MIG/MAG Transferência metálica por Curto-Circuito sob controle da forma de Onda da Corrente-Sistemas CCC e STT-Fundamentos”, *Rev. Soldagem & Insp.*, vol. 13, no. 2, pp. 92-96, 2008.

[19] L. Alves y L. Vilarinho, “Avaliação do processo GMAW com transferência por curto-circuito controlado (STT) aplicado na soldagem circunferencial mecanizada”, en *IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Fortaleza, 2016.

[20] M.L. Lagares Júnior, *Modos de transferência metálica MIG/MAG defeitos em soldagem e ensaios não destrutivos*. Juiz de Fora, Brasil, 2016.

[21] J.J. Lowke, “Simple Model for the Transition Current from Globular to Spray Transfer in Gas Metal Arc Welding”, *Australasian Welding Journal*, vol. 29, no. 1, pp. 32-35, 1997.

[22] J.C. Dutra. “MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco”, *Rev. Soldagem & Insp.*, vol. 13, no. 1, pp. 19-24, 2008.

[23] A. Scotti y V. Ponomarev, *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. São Paulo, Brasil: Artliber, 2008.

[24] P.J. Modenesi y R.C. Avelar, “The influence of small variations of wire characteristics on gas metal arc welding process stability”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 86, no. 1, pp. 226-232, 1999, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00315-X

[25] A. O’Brien, “Welding Processes, Part 1”, en *Welding Handbook*. Canadá: American Welding Society, 2004.

[26] P.J. Modenesi. *Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais*. Belo Horizonte, Brasil, 2017.