

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE CORRIENTE DE SOLDADURA CONTRA VELOCIDAD DE ALIMENTACIÓN DE ALAMBRE PARA EL PROCESO GMAW

CONSTRUCTION OF WELDING CURRENT VS. WIRE FEED SPEED CURVES FOR GMAW

JORGE GIRALDO

Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, jegirald@unal.edu.co

DIEGO MUÑOZ

Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, dlmunoz@unalmed.edu.co

SANTIAGO ARISTIZÁBAL

Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, saristi@unalmed.edu.co

JUAN SUÁREZ

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia

ANDRÉS ARBELÁEZ

Grupo de Soldadura, Universidad Nacional de Colombia, afarbela@unalmed.edu.co

DANIEL URIBE

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Colombia

Recibido para revisar febrero 29 de 2008, aceptado julio 30 de 2008, versión final septiembre 13 de 2008

RESUMEN: El presente artículo describe el desarrollo de un método experimental empleado para construir las curvas de Corriente de Soldadura Vs. Velocidad de Alimentación de Alambre en proceso GMAW, con dos extensiones de electrodo en un modo de transferencia por corto circuito, utilizando un electrodo ER70S-6 y un gas 98%Ar-2%CO₂. Se encontró que, manteniendo el voltaje constante, la corriente de soldadura se incrementó de manera proporcional (aproximadamente lineal) a la velocidad de alimentación de alambre e inversamente proporcional a la extensión del electrodo. Se compararon las curvas construidas con las disponibles en la literatura y se encontró un desfase de aproximadamente 20 A respecto a la curva resultante para una distancia tubo de contacto-trabajo de 15 mm. Se determinó indirectamente la extensión del electrodo a partir de la estimación de las longitudes de arco fotografiadas durante los ensayos.

PALABRAS CLAVE: GMAW, Velocidad de Alimentación de Electrodo, Extensión del Electrodo.

ABSTRACT: This paper describes the development of an experimental procedure for the elaboration of Welding Current vs. Wire Feed Speed curves in GMAW welding process with two electrode stickouts in a short circuiting transfer mode, using an ER70S-6 electrode and a 98%Ar-2%CO₂ shielding gas. It was found that the welding current increases proportional (approximately linear) to the wire feed speed and inversely proportional to the electrode stickout when the voltage keeps constant. The results were verified comparing the obtained curves with the theoretical curves under similar working conditions finding a difference of around 20 A between both curves for a tip to work distance of 15 mm. The electrode extension was established indirectly using the pictures of the arc length taken during the experimental procedure.

KEYWORDS: GMAW, Wire Feed Speed, Electrode stickout.

1. INTRODUCCIÓN

Las curvas de corriente de soldadura versus velocidad de alimentación del electrodo para el proceso GMAW son publicadas en múltiples textos y manuales técnicos [1-3] sin describir en detalle el método empleado para su construcción. En vista de lo anterior, se propone un método experimental con herramientas convencionales para levantar las curvas de corriente de soldadura contra la velocidad de alimentación, utilizando valores de parámetros de soldadura correspondientes a un modo de transferencia por corto circuito. Además de la corriente, la extensión del electrodo es otra variable que influye en la velocidad de alimentación del electrodo [4], y que no se especifica en las curvas publicadas. De esta forma, para el desarrollo experimental se levantaron curvas con dos extensiones de electrodo distintas dentro del intervalo típico aplicable al modo de transferencia por cortocircuito. Los resultados presentados en este artículo pueden ser de utilidad para una determinación más precisa de algunos parámetros de procedimientos de soldadura con condiciones similares a las trabajadas, en particular para transformar los valores de corriente en términos de velocidad de alimentación del electrodo, que es la variable que se regula en la mayoría de los equipos de GMAW.

2. MATERIALES Y HERRAMIENTAS

Las pruebas se hicieron aplicando soldaduras superficiales (BOP) sobre dos platinas de material base de acero ASTM A36 de 330 mm de largo, 150 mm de ancho y 9.525 mm ($3/8''$) de espesor (Ver Figura 1). El material de aporte fue un electrodo de clasificación ER70S-6 de 1.200 mm ($0.045''$) de diámetro. Se utilizó una mezcla de gas protector de 98 % de Argón y 2 % CO_2 . Los equipos empleados fueron: una fuente de potencia de voltaje constante marca Miller, referencia XMT 300 CC/CV; un alimentador de electrodo marca Miller referencia S-22 A; un brazo mecánico provisto de un motor DC y controlador de velocidad; un velocímetro digital

marca Shimpo referencia DT-107 y otras herramientas convencionales (pinza amperimétrica, filtro de soldadura N° 11, cámara digital, etc.).

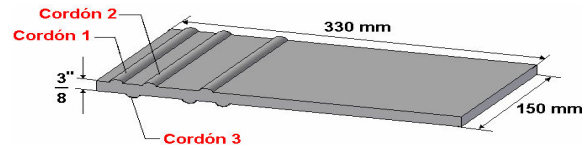


Figura 1. Material base y disposición de los cordones de soldadura para cada velocidad de alimentación del electrodo

Figure 1. Base material and welding bead disposition for each Wire Feed Speed

3. PARÁMETROS DE SOLDADURA

A continuación se describen los criterios de selección de los valores de las variables de soldadura usadas durante el experimento.

3.1 Distancia tubo de contacto-trabajo

La extensión del electrodo, que es una de las variables por evaluar, es complicada de medir mientras se suelda, por lo que resulta necesario determinarla mediante mediciones indirectas. Para lograr lo anterior se fijó la distancia tubo de contacto-trabajo y se midió la longitud del arco para, de esta forma, calcular la extensión del electrodo como la diferencia de la distancia tubo de contacto-trabajo y la longitud del arco (Ver Figura 2).

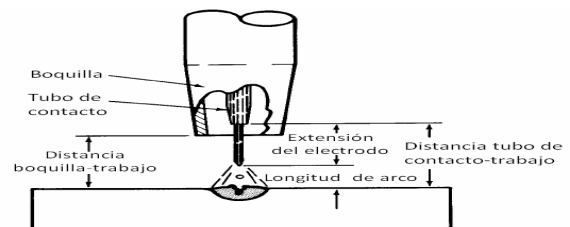


Figura 2. Extensión del electrodo, distancia tubo de contacto-trabajo y longitud del arco [2]

Figure 2. Electrode stickout, tip-work distance and arc length [2]

Para el modo de transferencia por cortocircuito, es recomendable que la longitud del arco esté entre 6 y 9 mm y la extensión del electrodo entre 6 y 13 mm [1]. Por consiguiente, la distancia tubo de contacto-trabajo debe estar entre 12 y 22 mm. Para este trabajo se tomaron dos valores intermedios de distancia tubo de contacto-trabajo que garantizaran una adecuada transferencia en cortocircuito: 15 mm y 20 mm. La longitud de arco, entonces, se midió para obtener un valor aproximado de la extensión del electrodo, tal como se detalla en el numeral 4.

3.2 Voltaje y corriente

Para la mezcla de gas de protección utilizado (Ar+2% CO₂), Pires et al [5] obtuvo los datos de voltaje y amperaje para alcanzar un modo de transferencia estable, y de su estudio se extrajeron los datos de voltaje y amperaje de la Figura 3 correspondientes al modo de transferencia por cortocircuito. Con base en la información suministrada en dicha gráfica de corriente contra voltaje, se seleccionó un voltaje de 19 V para las pruebas, ya que dicho valor permite trabajar con un amplio rango de corrientes (aproximadamente desde los 125 hasta los 225 A) con un arco de estabilidad razonable que facilitará las mediciones.

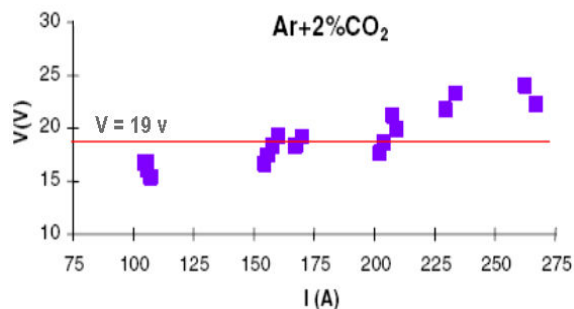


Figura 3. Gráfica de Corriente contra Voltaje para transferencia en corto circuito con gas Ar+2% CO₂
Figure 3. Current vs. Voltage map for short circuiting transfer mode with Ar+2% CO₂ shielding gas mixture

Las fuentes de GMAW normalmente regulan la corriente a partir de la velocidad de alimentación del electrodo, por lo que se debió encontrar un equivalente entre el rango de corrientes por estudiar y los valores de velocidad de

alimentación del electrodo. El intervalo de variación de la velocidad de alimentación se tomó en la zona en la que ésta varía de manera aproximadamente lineal a la corriente, es decir, a los niveles inferiores de corriente del electrodo. Entonces, se varió la velocidad del alimentador de electrodo en el equipo de soldadura y se midieron tanto los valores de velocidad de alambre como los amperajes correspondientes, usando el velocímetro y la pinza amperimétrica.

De esta manera se definieron, para ambas extensiones de electrodo, los valores de velocidades de alimentación entre 63.5 mm/s (150 ipm) y 105.8 mm/s (250 ipm), con incrementos de 10.6 mm/s (25 ipm), así: 63.5 mm/s (150 ipm), 74.1 mm/s (175 ipm), 84.7 mm/s (200 ipm), 95.3 mm/s (225 ipm) y 105.8 mm/s (250 ipm). Con el valor máximo de velocidad de alimentación se estimó un amperaje teórico [2] inferior a 230 A, que se encuentra dentro de los límites estables de cortocircuito para el voltaje de 19 V antes seleccionado.

3.3 Velocidad de aplicación

Para fijar esta variable se estimó inicialmente la entrada mínima de energía requerida, H_{\min} (kJ/in), para soldar la platina de prueba sin problemas de faltas de fusión ni regiones de alta dureza, empleando la ecuación 1 [6].

$$H_{\min} = 30t^2 + 15t \quad (1)$$

Como las placas utilizadas en las pruebas tienen un espesor $t = 9.525$ mm (3/8"), la mínima entrada de energía es de 0.4 kJ/mm (9.8 kJ/in).

De la ecuación (2) de entrada de energía por unidad de longitud de soldadura se determinó el valor de la mínima velocidad de aplicación que, calculada para la mínima corriente de soldadura, fue de 6.4 mm/s (15 ipm).

$$H = \frac{60 \times E \times I}{1000 \times S} \quad (2)$$

Donde:

E : Voltaje del arco [V]

I : Corriente [A]

S : Velocidad de aplicación [in/min]

H : Entrada de energía [kJ/in]

3.4 Otros parámetros de soldadura

Los demás parámetros de soldadura empleados durante las pruebas fueron:

- Caudal de gas: $1.8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (11 l/min) [1, 7]
- Corriente y polaridad: CDE+
- Posición de soldadura: Plana
- Ángulo de trabajo: 90°
- Ángulo de avance: 0°

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

Se utilizaron dos platinas de prueba, una para cada extensión de electrodo (o distancia tubo de contacto-trabajo de 15 y 20 mm), en las que se aplicaron cordones superficiales de 150 mm de longitud variando la velocidad de alimentación de alambre para obtener niveles de amperaje de 150, 175, 200, 225 y 250 A. Se aplicaron tres repeticiones de soldadura para cada amperaje, para un total de 15 cordones por platina (Ver las Figuras 1). En total se realizaron diez tratamientos (dos extensiones de electrodo, cada uno con cinco distintas velocidades de alimentación o amperajes) que, con las tres réplicas dieron un total de 30 mediciones (cordones). Se definió de manera aleatoria el orden de aplicación con el fin de garantizar la independencia entre los tratamientos.

Para depositar los cordones superficiales de soldadura se nivelaron las platinas base en un banco de pruebas con un brazo mecánico para automatizar el proceso, guiar la pistola sobre la placa con un ángulo de 90° , mantener la velocidad de aplicación en 6.4 mm/s (15 ipm) y ajustar la distancia boquilla-trabajo (Ver las Figuras 4 y 5), que para este caso es equivalente a la distancia tubo de contacto-trabajo ya que el extremo del tubo de contacto se puso a ras con la tobera.



Figura 4. Montaje para realizar los cordones de soldadura BOP

Figure 4. Set-up before making the welding bead on plate (BOP)



Figura 5. Ajuste de la distancia boquilla-trabajo y posicionamiento de la pistola

Figure 5. Contact tip to work distance adjusting and gun placement

La longitud del arco se determinó tomando fotografías del mismo con una cámara fotográfica instalada en un trípode a una distancia fija del banco de pruebas y con su objetivo a nivel con la superficie de la platina. También se registró la distancia tubo de contacto-trabajo tomando fotos al inicio de cada cordón junto a una regla de comparación y edición (Ver Figura 6). De manera similar, durante la aplicación del cordón de soldadura se tomaron varias fotografías a través de un filtro de protección N° 11, con el fin de superponerlas con el patrón de medida que se tomó al inicio, para así determinar la longitud del arco. Como método de verificación del orden de magnitud de los resultados obtenidos fotográficamente, se estimó la longitud del arco por medición directa a través de una lente de protección utilizando una regleta metálica con divisiones de 5 mm. Se aclara que dicho método es subjetivo y solamente sirvió para establecer que las longitudes de arco estaban dentro de límites razonables.

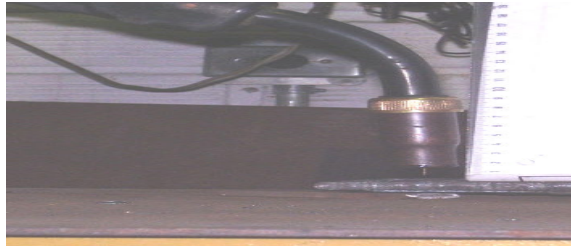


Figura 6. Patrón de medida para determinar la longitud del arco

Figure 6. Measure pattern for establishing the arc length

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La Figura 7 muestra la superposición de la foto del patrón de medida con las fotos del arco eléctrico de cada extensión de electrodo. Para cuantificar la longitud del arco se consideró la región de mayor intensidad luminica observada en las fotografías que corresponde con la zona de mayor temperatura y transferencia energética de la descarga eléctrica que ocurre desde la punta del electrodo hasta la pieza de trabajo [8].

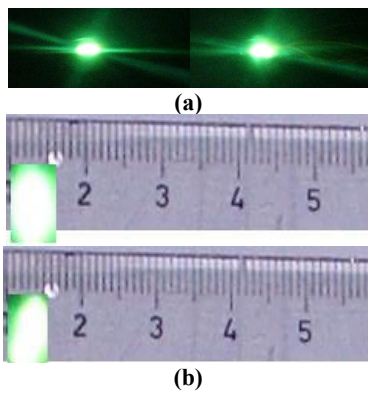


Figura 7. (a) Fotografías tomadas durante la elaboración del cordón de soldadura

(b) Superposición de la fotografía del arco con la del patrón de medida

Figure 7. (a) Photographies taken during the welding bead making

(b) Arc and measure pattern photographs superposition

En la Tabla 1 se muestran los valores de la longitud de arco para las dos extensiones de electrodo estudiadas y las distancias tubo de contacto-trabajo. Si bien el voltaje del arco se

mantuvo invariable durante los ensayos, las dimensiones y morfología del arco de las soldaduras no permanecieron constantes al modificar la distancia tubo de contacto-trabajo. La longitud del arco disminuyó con el incremento en la distancia tubo de contacto-trabajo. Para la distancia tubo de contacto-trabajo de 20 mm, la longitud de arco promedio fue de aproximadamente 4.5 mm, por lo que la extensión del electrodo aproximada para este caso fue de 15.5 mm. Con la distancia tubo de contacto-trabajo de 15 mm la longitud del arco medida fue de 6.8 mm, para una extensión de electrodo de aproximadamente 8.2 mm.

Tabla 1. Longitudes de arco medidas
Table 1. Experimental obtaining of the arc length

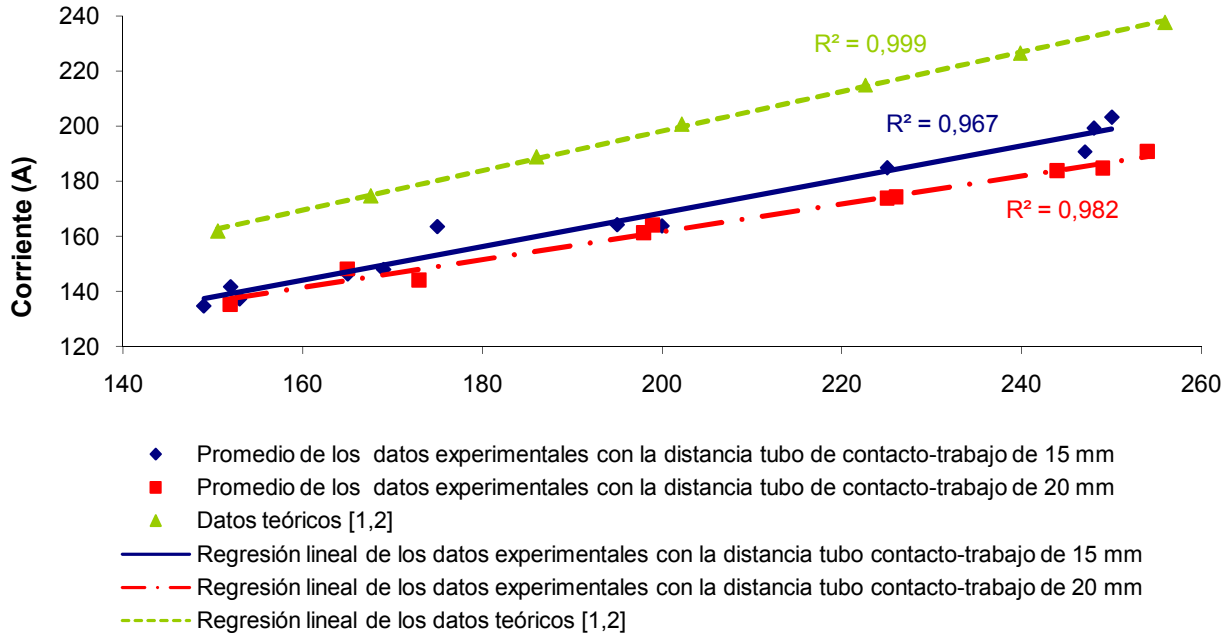
Distancia tubo de contacto – trabajo [mm]	Longitud de arco [mm]	Longitud de arco promedio [mm]
15.0	5,5	6.8
	6,0	
	5,5	
	7,0	
	7,0	
	9,0	
	7,0	
	7,5	
	7,0	
20.0	3,0	4.5
	5,5	
	6,0	
	4,0	
	4,0	

Es importante resaltar que la desviación estándar de los datos para una distancia tubo de contacto-trabajo de 15 mm es de 1.09 mm, menor que la obtenida con 20 mm (1.22 mm). Esto puede ser un indicativo de que se obtiene un arco más estable para menores distancias de tubo de contacto-trabajo, lo cual concuerda con la teoría suministrada por ESAB [4].

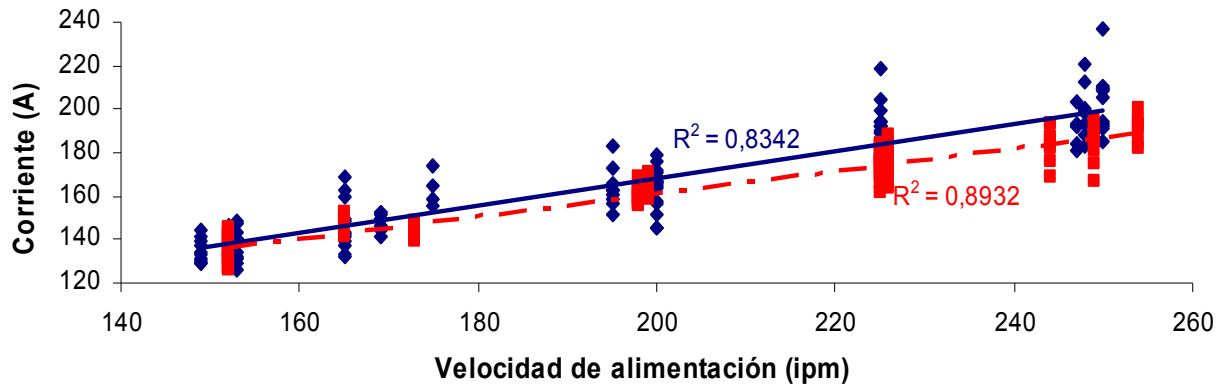
En la Figura 8, se presentan las curvas de corriente de soldadura Vs. velocidad de alimentación para las dos extensiones de electrodo trabajadas y la curva teórica [1, 2]. La corriente se incrementó proporcionalmente con la velocidad de alimentación del alambre. La gráfica también muestra que hay un aumento en la corriente al disminuir la distancia tubo de contacto-trabajo cuando se mantienen constantes el voltaje y la velocidad de alimentación. Lo anterior se explica por la reducción en la resistencia eléctrica cuando se disminuye la

extensión del electrodo que, al tener menos calentamiento, demanda un mayor amperaje para consumirse, lo cual no resulta ser tan

significativo a bajos amperajes de conducción donde tienden a converger las dos curvas construidas.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Curvas experimental y teórica de Vel. de alimentación Vs. Corriente de soldadura promedio
(b) Curva experimental de Velocidad de alimentación contra corriente de soldadura

Figure 8. (a) Experimental and Theoretical Curve of Wire Feed Speed vs Average Welding Current
(b) Experimental Curve of Wire Feed Speed vs Welding Current

El valor de R^2 presentado en la Figura 8 (b) permite afirmar que el comportamiento en las curvas es aproximadamente lineal para el rango de corrientes trabajado. Se observa también una

mayor dispersión en los datos de las dos extensiones de electrodo cuando la velocidad de alimentación aumenta, que de igual forma se refleja en una inestabilidad mayor en la corriente. Lo anterior sugiere un comportamiento menos fluctuante de la soldadura en GMAW por cortocircuito para bajas velocidades de alimentación.

Otro aspecto a considerar es el error en que se incurre al usar aproximaciones lineales, ya que en este tipo de curvas donde las corrientes de soldadura son altas y con diámetros de electrodos muy pequeños tienden a ser cuadráticas [1]. En la tabla 2 se presentan los datos de error relativo máximo y R^2 para los ajustes lineal y cuadrático de las mediciones tomadas para los dos valores de distancia de tubo de contacto-trabajo, donde el error relativo máximo es hallado por medio de la máxima diferencia de los datos ajustados lineal y cuadráticamente. Este error resulta ser muy bajo al ajustar linealmente la curva experimental de

velocidad de alimentación contra corriente de soldadura; a su vez los valores de R^2 son muy similares, lo cual constituye una justificación suficiente para modelar este fenómeno de manera lineal en el intervalo de amperajes estudiado.

Tabla 2. Comparación del ajuste lineal y Exponencial de la curva experimental de Velocidad de Alimentación Vs. Corriente

Table 2. Comparison between the lineal and exponential adjust of the experimental curve of Wire Feed Speed Vs Welding Current

Distancia Tubo de Contacto-Trabajo	D = 15 mm	D = 20 mm
Máximo Error Relativo (%)	1.35%	1.2%
R^2 -Ajuste lineal	0.8342	0.8932
R^2 -Ajuste cuadrático	0.8346	0.8942

Al comparar las curvas experimentales obtenidas con los datos extraídos de la curva indicada en textos de GMAW para este tipo de electrodo y

diámetro [1, 2], se observa en la Figura 8 (a) un desfase del orden de 20 A respecto a la curva construida para una distancia tubo de contacto-trabajo de 15 mm. Debe considerarse el hecho de que las curvas teóricas no mencionan la mezcla de gas, el voltaje ni la extensión de electrodo para los que tienen validez, por lo que se podría atribuir el desfase de 20 A a eventuales diferencias en los parámetros de soldadura mencionados. Basados en el comportamiento de que una disminución en la extensión de electrodo para una velocidad de alimentación de alambre dada produce como respuesta del equipo de GMAW un aumento en la corriente de soldadura, podría arriesgarse la idea de que la curva teórica se hubiera levantado para menores extensiones de electrodo que las obtenidas en este artículo (8.2 mm @ 15 mm y 15.5 mm @ 20 mm), sin embargo, para comprobarlo habría que hacer pruebas con una extensión de electrodo tal vez inferior a 4 ó 5 mm que incrementaría los riesgos prácticos de que el arco quemara el tubo de contacto. Las diferencias de amperaje obtenidas entre las curvas levantadas, y el desfase con la curva teórica resaltan la incidencia que pueden tener algunos parámetros de soldadura (como la extensión del electrodo, estudiada, y otras que pueden estudiarse, como la mezcla de gas y el voltaje) en la confiabilidad de transformar los datos de velocidad de alambre en amperaje y viceversa. Cada curva de este tipo debería estar complementada con la información de los parámetros de soldadura usados durante el levantamiento que puedan afectar la precisión de los resultados provenientes de su empleo como herramientas de conversión de los parámetros de soldadura en GMAW.

6. CONCLUSIONES

- La corriente de soldadura se incrementó proporcionalmente (casi de manera lineal) con las velocidades de alimentación de alambre estudiadas.
- Para una tensión de 19 V y una velocidad de alimentación constante, la corriente de soldadura se aumenta con la reducción de la

distancia tubo de contacto-trabajo o de la extensión del electrodo.

- Se observó una disminución de la longitud del arco con el incremento en la distancia tubo de contacto-trabajo, sin una alteración del voltaje.
- Para menores velocidades de alimentación se obtuvieron menores variaciones en la intensidad de la corriente.
- Se propuso un método basado en el empleo de herramientas convencionales y económicas para construir curvas de velocidad de alimentación Vs. Amperaje en proceso GMAW.

REFERENCIAS

- [1] HOLLIDAY, D. B., Welding Handbook, Volumen 4 de la AWS, Capítulo 4, Soldadura por Arco de Metal y Gas.
- [2] SAUNDERS H. L., Consultant, Alcan., MIG/MAG Welding Guide For Gas Metal Arc Welding (GMAW). Lincoln Electric. Third Edition. 1997. Págs. 18, 23-28.
- [3] Welder's Handbook For Gas Shielded Arc Welding, Oxy Fuel Cutting & Plasma Cutting. Air Products. Third Edition. 1999. Pág. 31.
- [4] ESAB North American Home Page Available:http://www.esabna.com/EUWeb/MIG_handbook/592mig7_12.htm. [citado 20 de Agosto de 2008].
- [5] PIRES, I., QUINTINO, L., MIRANDA, R. M., Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. Materials and Design, N28, 2007, P1623-1631.
- [6] MILLER, D. K., FUNDERBURK, R. S., Tools for Reviewing Welding Procedures. Welding Journal, Vol 80, 2001, pag 40 – 43.
- [7] ESAB Welding Handbook. Filler Materials for Manual and Automatic Welding. Fifth Edition. Pág. 50.
- [8] LANCASTER, J. F., The Physics of Welding. International Institute of Welding. First Edition. Pág. 134, 167.