

# Efecto de las correcciones de arco y pulso en la geometría de uniones de aluminio 5083 soldadas con transferencia metálica fría

## Effect of arc and pulse corrections on the geometry of 5083 aluminum joints welded with cold metal transfer

René Eduardo de-Luna-Alanís<sup>I</sup>, Carlos René Gómez-Pérez<sup>II</sup>

I. Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Soldadura (CIDTS). Nuevo León, México

II. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS). Villa Clara. Cuba

Correo electrónico: [rdeluna@cidts.edu.mx](mailto:rdeluna@cidts.edu.mx)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 2 de enero de 2018

Aceptado: 4 de abril de 2018

### Resumen

Las correcciones de arco y de pulso del proceso de soldadura con transferencia metálica fría modifican el voltaje y la corriente. El efecto de su combinación no se ha estudiado suficientemente sobre la geometría de la unión. El objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de las correcciones de arco y de pulso y de la velocidad de soldadura del proceso con transferencia metálica fría sobre las geometrías de las uniones realizadas en aluminio 5083. Para ello, se realiza un diseño experimental, con tres factores independientes a dos niveles, empleando los parámetros geométricos de las uniones como factores independientes. La

función corrección del pulso influye directamente sobre la altura y la profundidad, mientras que la función corrección de la longitud de arco influye inversamente. Ambas funciones no manifiestan influencia significativa sobre el ancho del cordón. La velocidad de soldadura influye inversamente sobre la altura, el ancho y la profundidad de los cordones de soldadura.

**Palabras claves:** corrección de arco, corrección de pulso, transferencia metálica fría, geometría de la unión.

### Abstract

The arc and pulse corrections of the cold metal transfer welding process modify the voltage and current. The effect of their combination has not been sufficiently studied on the joint geometry. The objective of the present work is to determine the effect of the arc and pulse corrections and the welding speed of the cold metal transfer welding process on the 5083 aluminum joints geometries. For this, an experimental design is made, with three independent factors at two levels, using the geometric parameters of the unions as independent factors. The correction

pulse function directly acts on the height and depth, while than the arc length correction function has inversely influence. Both functions do not manifest significant influence on the welding width. The welding speed inversely acts on the height, the width and the depth of the welding joint.

**Key words:** arc correction, pulse correction, cold metal transfer, joint geometry.

### Introducción

Una característica del proceso de soldadura con transferencia metálica fría (CMT-Cold Metal Transfer) consiste en el movimiento recíprocante del material de aporte [1]: cuando el alambre se retrae se inicia la etapa de arco, y cuando avanza, coloca la gota prácticamente sin aporte energético. Para ello, el ajuste de la longitud del arco voltaico se realiza de forma automática a través de una nueva función denominada corrección de la longitud de arco (*ALC-Arc Length Correction*) [2], permaneciendo estable durante el proceso de arco, independientemente de las características de la superficie de la pieza de trabajo (desalineaciones, rugosidades, suciedades, etc.) o de la velocidad con la que se desee realizar la soldadura. La corrección de la longitud de arco (expresada en %) modifica la distancia entre la punta del electrodo y la pieza durante la etapa de arco (en límites extremos, máximo de +30 %, arco largo y mayor voltaje; y mínimo -30 %, arco corto y menor voltaje), según se plantea en el Manual de instrucciones de uso RCU5000i para la fuente de corriente MIG/MAG *TransSynergic 4000/5000*, de la *FRONIUS INTERNATIONAL GMBH*. Se conoce que la caída de potencial eléctrico a través de la columna del arco de soldadura ocurre en las manchas catódica, anódica y en el espacio propiamente de la columna. Es en esta longitud de la columna donde se verifica la mayor caída de potencial. de-Luna y Gómez demuestran [3] que la corrección de longitud del arco de soldadura durante la aplicación del proceso CMT produce variaciones en la tensión del arco de soldadura. Se conoce también que el arco eléctrico de soldadura tiene la forma geométrica aproximada de un cono truncado. La altura de dicho cono y, también proporcionalmente, el diámetro de su base depende de la longitud del arco. La corrección de la longitud de arco modifica la distancia entre la punta del electrodo y la pieza (longitud del arco), según el Manual

RCU5000i de uso de la fuente de corriente MIG/MAG TransSynergic 4000/5000, parte 42,0426,0021. DE 012010. EDICION 2010, de la FRONIUSINTERNATIONAL GMBH. 2010. Por ello, puede estimarse que la corrección de la longitud de arco permitiría modificar, entre ciertos límites, la geometría de las uniones soldadas durante la aplicación del proceso de soldadura CMT.

La función de corrección de pulso (PC, *Pulse Correction*, de sus siglas en inglés) en el proceso CMT, tanto con protección de gas activo (CMT-MAG), como con gas inerte (CMT-MIG), modifica la energía incorporada (+5 %, mayor energía, asociándose a un inicio caliente; -5 %, menor energía, asociándose a un inicio frío) producida por el crecimiento o decrecimiento respectivo de la corriente aplicada en los instantes vinculados al inicio del arco en cada ciclo, reconociéndose a los por cientos citados como los límites extremos empleados para la realización del proceso, según se refiere en el Manual RCU5000i de uso de la fuente de corriente MIG/MAG TransSynergic 4000/5000, parte 42,0426,0021. DE 012010. EDICION 2010, de la FRONIUSINTERNATIONAL GMBH. 2010.

De lo anterior, puede inferirse que, tanto las correcciones de la longitud de arco, como de pulso, modifican las variables esenciales de voltaje y corriente, respectivamente, aplicadas en el proceso CMT, cuya consideración en un estudio posibilitarían evaluar su influencia y la de la variable esencial velocidad de soldadura, respecto al consumo energético del proceso y la forma en que este modifica la geometría de las uniones, entre otros aspectos.

Tanto el voltaje, como la corriente y la velocidad de soldadura determinan la energía aportada por el proceso [1, 4]. La energía lineal de soldadura introducida a la pieza a soldar [5] modifica sustancialmente la geometría de la unión (profundidad de penetración, ancho del cordón) [6] y la forma de la zona afectada térmicamente [7]. Sin embargo, en la industria aún no se conoce suficientemente el efecto de estas variables en el proceso CMT sobre la geometría de los cordones de soldadura.

La denominación 5083 corresponde a una aleación de aluminio al magnesio de media resistencia, relativamente de buena soldabilidad y buena resistencia a la corrosión y a la fatiga, según se plantea por Cobden R., en el manual *Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys Belgium, de la European Aluminium Association (EAA)*; 1994. Esta aleación es generalmente empleada en la construcción de cascos para aplicaciones navales [8, 9]. Según el código para la construcción de estructuras con aluminio *D1.2/1.2M*, la aleación 5083 es resistente a la corrosión y apta para la unión por soldadura de superestructuras, tanques de almacenamiento de gas natural líquido, recipientes a presión, pipas, equipos químicos y, en el caso del sector naviero, es utilizada principalmente en los cascos de barcos, la fabricación de yates y lanchas rápidas.

Durante la construcción naval se estima [9] que la longitud de las soldaduras, en la etapa de ensamble a nivel de dique, representa entre el 4 % y el 6 % de la longitud de soldadura total de una embarcación y, sin embargo, consumen del 30 % al 35 % de los costos de fabricación, por ser llevada a cabo manualmente o con procesos semiautomáticos convencionales. Este criterio revela una baja productividad en la operación de ensamble, por lo que resulta importante considerar la productividad, que ofrece el proceso CMT para esta aplicación y, por tanto, valorar cuáles son las variables que la modifican.

El objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de la velocidad de soldadura y de las correcciones de arco y de pulso, del proceso con transferencia metálica fría, sobre las geometrías de las uniones realizadas sobre aluminio 5083. Para ello, se emplea un alambre ER5183 de diámetro 0,8 mm, recomendado por la literatura especializada [10].

## Métodos y Materiales

La denominación 5083 corresponde a aleación de aluminio al magnesio de media y baja resistencia, relativamente de buena soldabilidad y buena resistencia a la corrosión y la fatiga [7], generalmente empleada en aplicaciones navales, y estudiada por diversos autores [8, 9]. La aleación 5083 se emplea en forma de placas de 6 milímetros (0,236 in) de espesor con tratamiento H321 [10].

Para la evaluación del proceso CMT pulsado estudiado se empleó un diseño experimental basado en un plan de tipo factorial multinivel con 3 factores independientes, tabla 1, obteniéndose 8 corridas experimentales, para evaluar el comportamiento geométrico de la aleación 5083 soldada con un alambre ER5183 de diámetro 0,8 mm.

**Tabla 1.** Factores y niveles empleados en el diseño experimental

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Corrección del Arco	-30,0	30,0	2	%
Corrección del Pulso	-5,0	5,0	2	%
Velocidad de Soldadura	1,06	1,52	2	cm·s <sup>-1</sup>

Las dimensiones de los cupones de prueba se establecieron atendiendo las recomendaciones del código estructural de aluminio [10], de forma tal que se garantizaron las mismas condiciones experimentales para todas las muestras estudiadas en el diseño experimental. Los cortes para la realización de las macrografías se realizaron en diversas secciones [3] de cada una de las uniones soldadas, despreciando 25 mm de la parte inicial y final de dichas uniones. Se eligió el corte con cizalla para evitar dañar la macroestructura de las láminas

de aluminio, evitando la introducción de una zona afectada por el calor, previa a la realización de la soldadura. Con el fin de no permitir deformaciones en los cupones durante la operación de soldeo se utilizaron presillas de tipo *clamp*. Las soldaduras se realizan, figura 1, con una fuente para proceso con protección gaseosa GMAW-CMT (de sus siglas en inglés *Gas Metal Arc Welding – Cold Metal Transfer*), modelo TPS5000 MV CMT y corriente pulsada, comúnmente utilizada en producciones industriales e investigaciones [11, 12].



**Fig. 1.** Instalación para posicionar y sostener los cupones, así como para el desplazamiento regulado de la antorcha CMT, diseñada y fabricada por el autor (CIDTS)

El sistema construido para desplazar la antorcha y obtener la unión soldada, figura 1, fue desarrollado por el autor del trabajo, en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Soldadura (CIDTS). Dicho sistema permite automatizar la velocidad de soldadura del proceso CMT, a través de una interfaz con un servomotor, garantizando que velocidades de soldadura constantes requeridas para la ejecución de cada unión, correspondiente a cada punto experimental, tabla 1.

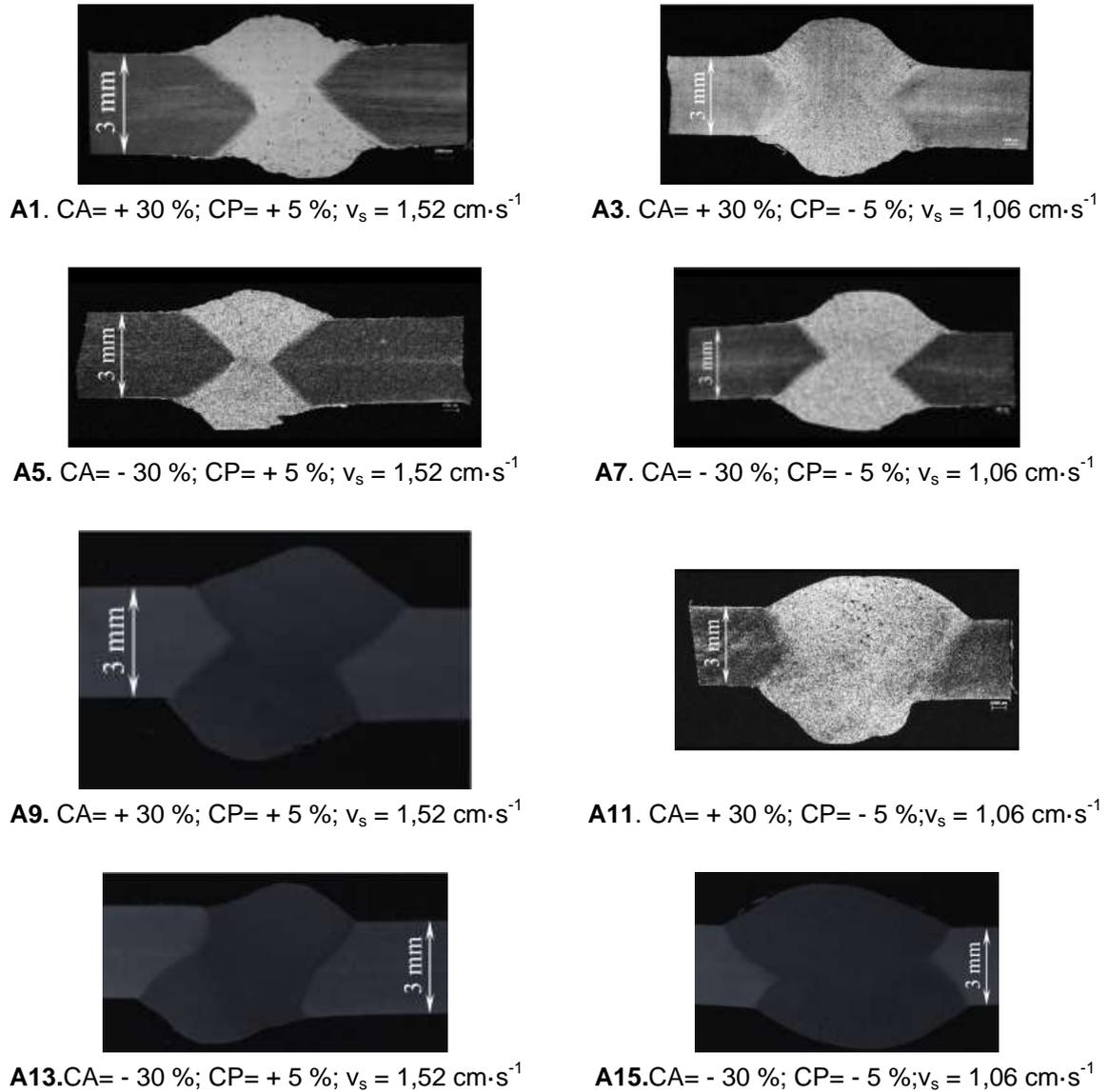
Se seleccionó una junta a tope, sin preparación de bordes, con soldadura bilateral, por ser de amplio uso en el sector naval mexicano, conforme a la especificación del procedimiento de soldadura *Welding Procedure Specification* [13]. Así, los parámetros de soldadura empleados, fueron: posición plana; corriente de base, 148 A; voltaje de arco, 22 V; polaridad, corriente directa electrodo positivo; diámetro de la boquilla, 12,7 mm; tipo de gas: argón (100 %); flujo de gas, 15 L·min<sup>-1</sup>; distancia de la boquilla a la pieza, 14mm; velocidad de alimentación del alambre, 2,9 m·min<sup>-1</sup> y las variables consideradas en el diseño experimental, tabla 1. Se consideraron, además, fijos el resto de los parámetros operacionales específicos del proceso CMT, tomados según los criterios de los especialistas de la firma *Fronius*, referidos en los manuales de usuario de la máquina.

## Resultados y Discusión

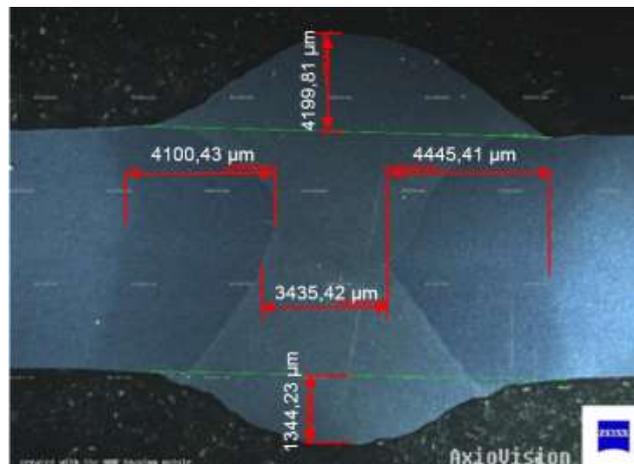
En las muestras metalográficas, figura 2, se pueden apreciar diferencias en la forma de los depósitos, en cuanto al ancho, la altura y la profundidad de penetración de la zona fundida.

Las muestras metalográficas fueron medidas, figura 3, mediante microscopía óptica. El microscopio óptico empleado fue de la marca *Carl Zeissaxio*, modelo *AxioObserver z1m*, con polarizador, una capacidad de amplificación de 50 a 1000x y un software analizador de imágenes *Axio-Vision*.

A los resultados de la medición, tabla 2, se les aplicó una prueba entre grupos para corroborar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las dimensiones tomadas en los cordones. Se realizaron pruebas de varianza (ANOVA), *Kruskal-Wallis* y de mediana de *Mood*, cuyo resultado arroja diferencias estadísticamente significativa entre las medias y las medianas, para los parámetros ancho del cordón (b), altura de refuerzo (hr) y profundidad de penetración (hp). Estas diferencias pueden relacionarse con los parámetros operativos empleados para la soldadura de cada cupón de prueba, correspondiente a los distintos puntos experimentales evaluados en el diseño.



**Fig. 2.** Resumen de las imágenes macrográficas de las uniones en los cupones soldados, según los parámetros del diseño experimental. Aumento 5X



**Fig. 3.** Ejemplo de medición de los parámetros geométricos de las uniones

**Tabla 2.** Dimensiones de las uniones soldadas en tres secciones diferentes, medidas, figuras 2 y 3, con software especializado *ImagenJ*

Muestra	Longitudes (mm)												Profundidad Penetración (2da pasada)		
	1 <sup>ra</sup> pasada						2 <sup>da</sup> pasada								
	Alto refuerzo			Ancho			Alto refuerzo			Ancho					
A1	1,95	2,16	2,05	11,23	10,67	11,79	1,75	1,67	1,84	10,06	11,12	10,59	4,43	4,21	4,65
A3	2,74	2,60	2,87	12,55	11,95	11,36	3,20	3,37	3,54	12,41	13,07	13,72	4,95	4,71	4,48
A5	2,06	1,96	1,86	9,49	9,99	10,49	1,84	1,93	1,75	11,08	10,03	10,55	3,17	3,51	3,34
A7	2,33	2,45	2,57	12,62	13,95	13,29	3,12	3,28	3,44	13,66	12,36	13,01	5,01	4,53	4,77
A9	2,66	2,94	2,80	10,04	10,54	9,54	2,60	2,74	2,87	11,67	11,11	10,56	4,91	5,16	5,42
A11	2,98	2,84	3,13	14,75	15,52	16,30	3,54	3,73	3,92	11,66	12,89	12,27	6,05	6,35	5,74
A13	2,12	2,02	1,91	9,35	8,46	8,90	2,34	2,23	2,46	10,73	9,71	10,22	3,70	3,89	4,08
A15	3,36	3,20	3,04	13,46	14,14	12,79	3,17	3,33	3,01	12,43	11,81	13,05	3,85	4,25	4,05
Máx	3,36	3,20	3,13	14,75	15,52	16,30	3,54	3,73	3,92	13,66	13,07	13,72	6,05	6,35	5,74
Mín	1,95	1,96	1,86	9,35	8,46	8,90	1,75	1,67	1,75	10,06	9,71	10,22	3,17	3,51	3,34
Dif	42,05	38,76	40,51	36,62	45,53	45,39	50,53	55,35	55,39	26,34	25,72	25,53	47,52	44,76	41,85
Dp	40,44			42,51			53,76			25,86			44,71		

Máx: Valor máximo observado

Mín: Valor mínimo observado;

Dif: Diferencia máxima observada ( $Dif = (Máx - Mín)/Máx \cdot 100$ ), en %

Dp: Diferencia promedio máxima observada, en %.

La altura de refuerzo del primer cordón depositado oscila entre 1,9 y 3,4 mm, reflejando un 40,4 % de diferencias relativa promedio, tabla 2. Para el segundo cordón depositado, la altura de refuerzo oscila entre 1,7 y 3,9 mm, para un 53,8 % de diferencia relativa. Por otra parte, para el primer cordón depositado el ancho oscila entre 8,5 mm y 14,7 mm, para un 42,5 % de diferencia relativa promedio, mientras que para el segundo cordón depositado oscila entre 1,7 mm y 13,5 mm, para un 25,9 % de diferencia relativa. La profundidad de penetración de la segunda pasada se encuentra entre 3,2 y 6,3 mm, reflejando aproximadamente un 44,8 % de diferencia relativa. La mayor diferencia entre las áreas se encuentra en la de la segunda pasada con un 71 %, aunque la diferencia de áreas de la unión es también de consideración (58,7 %). Estos porcentajes sugieren diferencias en el comportamiento.

Para hacer más confiable el análisis se realiza una prueba dentro de y entre grupos para las variables alto de refuerzo y ancho del cordón para la primera y segunda pasadas, así como de la profundidad de penetración, en la segunda pasada, y las áreas medidas en la segunda pasada y total de la unión. La prueba dentro de grupos aplicada consistió en una comparación de varias muestras para la determinación de la similitud estadística entre los datos tomados y sus respectivas réplicas. La comparación se realiza aplicando varias pruebas: varianza (ANOVA), rangos múltiples, verificación de varianza, *Kruskal Wallis* y medianas de *Mood*. Todas las pruebas anteriormente descritas arrojan que las muestras no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95,0 %, por lo que son verdaderas las réplicas tomadas para cada parámetro.

La prueba entre grupos consiste en una comparación de varias muestras (puntos experimentales), la cual está conformada por un grupo de pruebas: análisis de varianza (ANOVA), de *Kruskal-Wallis* y de medianas de *Mood*, además de la prueba de múltiples rangos. Las pruebas anteriormente descritas arrojan que los valores analizados para cada parámetro geométrico evaluado, tabla 2, son significativamente diferentes para cada muestra. Este aspecto permite establecer que los parámetros geométricos evaluados, en cada punto experimental, se comporten de forma diferente. Esta diferencia pudiera deberse a la variabilidad de las condiciones experimentales impuestas, tabla 1. Dicho de otra manera, la forma de los cordones de las uniones soldadas realizadas dependen significativamente de las variables independientes consideradas en el diseño experimental, específicamente por la modificación de la forma del arco (variación del voltaje), de la introducción de la energía y del efecto térmico causado sobre el material base y la deposición de las gotas del aporte. La forma de esta dependencia y sus causas serán tratadas durante la evaluación del plan experimental.

Para el parámetro alto de refuerzo en la 1ra pasada, tabla 2, el estadístico R-cuadrado mínimo observado, tabla 3, indica que su modelo ajustado explica más del 84,08 %, mientras que para el parámetro alto de refuerzo de la 2<sup>da</sup> pasada, tabla 2, el estadístico R-cuadrado máximo observado, tabla 3, explica hasta el 98,06 % de la variabilidad mostrada.

El resto de los estadísticos R-cuadrado explican sus respectivos modelos con por cientos (Tabla 3), que se encuentran entre los valores mínimos y máximos antes mencionados.

**Tabla 3.** Resultados estadísticos del diseño experimental aplicado

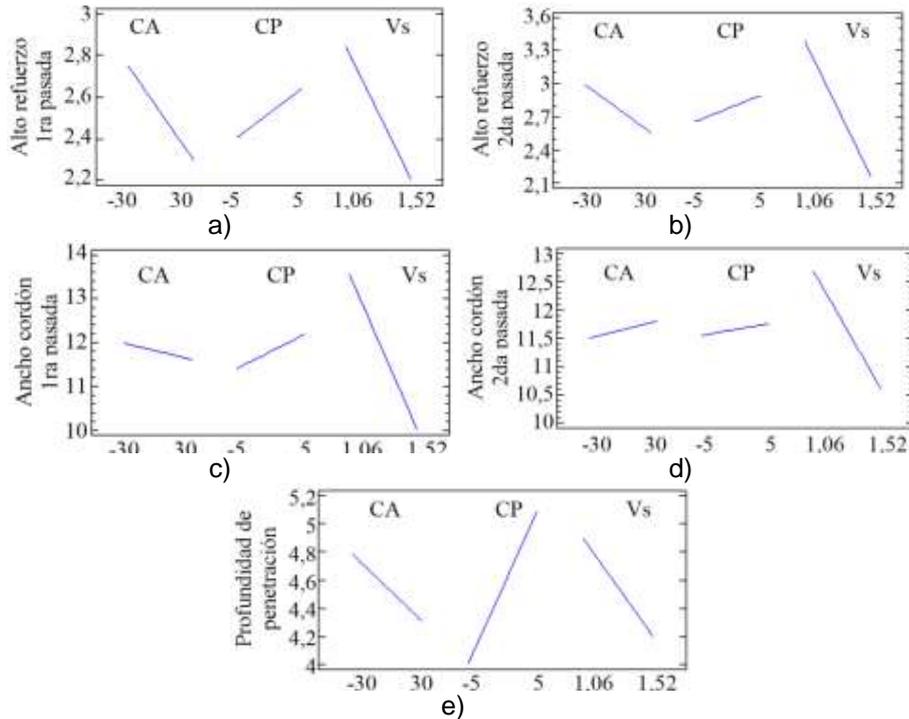
<b>Alto refuerzo (1<sup>ra</sup> pasada)</b>	Ecuación de regresión	Alto ref 1 <sup>ra</sup> pasada = $4,309 - 0,012 \cdot CA - 0,089 \cdot CP - 1,383 \cdot VS - 0,0002 \cdot CA \cdot CP + 0,004 \cdot CA \cdot VS + 0,087 \cdot CP \cdot VS$		
	R-cuadrado	84,08 %	Error estándar del estimado	0,23
	R-cuadrado (ajustado por g.l.)	78,46 %	Error absoluto medio	0,15
	Estadístico <i>Durbin-Watson</i>	2,62 (P = 0,82)	Autocorrelación residual de Lag 1	-0,35
<b>Ancho cordón (1<sup>ra</sup> pasada)</b>	Ecuación de regresión	Ancho cord 1 <sup>ra</sup> pas = $21,659 - 0,147 \cdot CA - 0,155 \cdot CP - 7,644 \cdot VS - 0,003 \cdot CA \cdot CP + 0,109 \cdot CA \cdot VS + 0,180 \cdot CP \cdot VS$		
	R-cuadrado	90,58 %	Error estándar del estimado	0,82
	R-cuadrado (ajustado por g.l.)	87,25 por ciento	Error absoluto medio	0,53
	Estadístico <i>Durbin-Watson</i>	2,44 (P = 0,70)	Autocorrelación residual de Lag 1	-0,298
<b>Alto refuerzo (2<sup>da</sup> pasada)</b>	Ecuación de regresión	Alto ref 2 <sup>da</sup> pasada = $6,196 + 0,022 \cdot CA + 0,072 \cdot CP - 2,650 \cdot VS - 0,001 \cdot CA \cdot CP - 0,022 \cdot CA \cdot VS - 0,037 \cdot CP \cdot VS$		
	R-cuadrado	98,06 %	Error estándar del estimado	0,12
	R-cuadrado (ajustado por g.l.)	97,38 %	Error absoluto medio	0,08
	Estadístico <i>Durbin-Watson</i>	2,25 (P = 0,54)	Autocorrelación residual de Lag 1	-0,26
<b>Ancho cordón (2<sup>da</sup> pasada)</b>	Ecuación de regresión	Ancho cord 2 <sup>da</sup> pasada = $17,475 + 0,041 \cdot CA - 0,124 \cdot CP - 4,511 \cdot VS - 0,001 \cdot CA \cdot CP - 0,028 \cdot CA \cdot VS + 0,113 \cdot CP \cdot VS$		
	R-cuadrado	83,38 %	Error estándar del estimado	0,61
	R-cuadrado (ajustado por g.l.)	77,52 %	Error absoluto medio	0,44
	Estadístico <i>Durbin-Watson</i>	1,79 (P = 0,18)	Autocorrelación residual de Lag 1	0,02
<b>Penetración (2<sup>da</sup> pasada)</b>	Ecuación de regresión	Prof. de penetración = $6,49 + 0,009 \cdot CA + 0,048 \cdot CP - 1,50 \cdot VS - 0,001 \cdot CA \cdot CP - 0,012 \cdot CA \cdot VS + 0,046 \cdot CP \cdot VS$		
	R-cuadrado	86,16 %	Error estándar del estimado	0,38
	R-cuadrado (ajustado por g.l.)	81,28 %	Error absoluto medio	0,25
	Estadístico <i>Durbin-Watson</i>	2,73 (P = 0,89)	Autocorrelación residual de Lag 1	-0,399

Por otra parte, para el parámetro ancho del cordón de la 2<sup>da</sup> pasada, tabla 2, el estadístico R-cuadrado ajustado (77,52 %) mínimo observado, tabla 3, evidencia que se pueden comparar modelos con diferente número de variables independientes (corrección de longitud de arco, corrección de pulso de corriente y velocidad de soldadura), como el caso de estudio. El resto de los parámetros refieren por cientos superiores de R-cuadrado ajustado, cuyo valor máximo observado (97,38 %) se refiere en el parámetro alto de refuerzo en la 2<sup>da</sup> pasada, tabla 3. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0 %, en todos los parámetros geométricos estudiados, no hay indicación de auto correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

Los criterios estadísticos anteriormente referidos prueban que los resultados obtenidos poseen la confiabilidad requerida para realizar evaluaciones, comparaciones y hacer consideraciones a partir de los mismos.

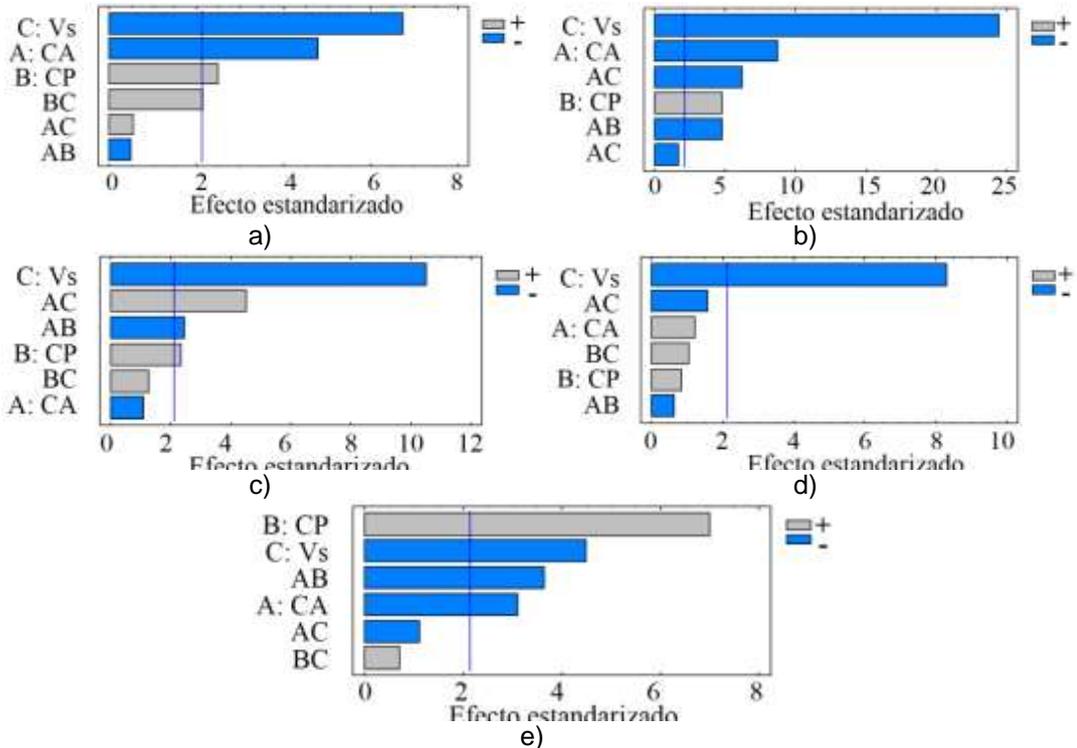
El comportamiento de todas las variables geométricas estudiadas se pueden estimar a partir de las ecuaciones de regresión, situándose el valor óptimo de todas en -30 % de corrección de la longitud de arco, 5 % de la corrección de pulso y  $1,06 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$  de la velocidad de soldadura, tabla 2.

La velocidad de soldadura posee el comportamiento más negativamente significativo en todos los parámetros de la geometría de las uniones, según reporta, la gráfica de efectos principales, figura 4, y corrobora el diagrama de Pareto, figura 5; es decir, a medidas que la velocidad de soldadura crece, decrecen las dimensiones de altura de refuerzo, ancho, profundidad de penetración y, por tanto, las áreas de los cordones y uniones. Este aspecto puede deberse a la disminución de la energía lineal de soldadura, lo que conduce a la disminución de la tasa de deposición metálica por unidad de longitud, a la disminución del calor aportado en la profundidad de la unión y a la menor concentración del calor en los bordes de la unión. Criterios similares han sido vertidos por especialistas [14] al evaluar otros procesos de soldadura, cuando refieren que la velocidad de soldadura generalmente conduce al estrechamiento de los cordones, y a la disminución de su profundidad y su altura de refuerzo.



**Fig.4.** Gráfica de efectos principales. a) Alto de refuerzo en la primera pasada; b) Alto de refuerzo en la segunda pasada; c) Ancho del cordón en la primera pasada; d) Ancho del cordón en la segunda pasada; e) Profundidad de penetración en la segunda pasada

Legenda: CA: Corrección de arco; CP: Corrección de pulso; Vs: velocidad de soldadura



**Fig. 5.** Diagrama de Pareto estandarizado. a) Alto de refuerzo en la primera pasada; b) Alto de refuerzo en la segunda pasada; c) Ancho del cordón en la primera pasada; d) Ancho del cordón en la segunda pasada; e) Profundidad de penetración en la segunda pasada

Legenda: CA: Corrección de arco; CP: Corrección de pulso; Vs: velocidad de soldadura

En la introducción se define el concepto de corrección de la longitud de arco (expresada en %) para el proceso CMT. La corrección de la longitud de arco modifica, entre los rangos límites definidos [4], a la longitud del arco en el proceso de soldadura CMT. Considerando este aspecto, a menor corrección establecida (-30 %)

menor voltaje y arco más corto y viceversa. Analizando los gráficos efectos principales puede apreciarse que, tanto para el alto de refuerzo en la primera, figura 4 a, como en la segunda pasada, figura 4b, la corrección de la longitud del arco es inversamente proporcional a la altura de refuerzo, tal como muestra el gráfico de Pareto, figura 5a y figura 5b; es decir, a medidas que se incrementa el coeficiente de corrección del arco eléctrico (se incrementa el voltaje y la longitud del arco) disminuyendo el alto de refuerzo.

De forma similar ocurre con la profundidad de penetración, tanto para los efectos principales, figura 4d, como para el gráfico de Pareto estandarizado, figura 5d. Los aspectos relacionados coinciden con los criterios de varios autores que relacionan la longitud del arco también con la profundidad de penetración y la altura de refuerzo [7], refiriendo que para voltajes mayores (longitudes de arco relativamente grandes) se obtendrán cordones menos profundos, con menos altura de refuerzo y viceversa. Sin embargo, no se aprecian diferencias estadísticas que relacionen como significativa (gráfico de Pareto estandarizado) la influencia de la corrección de la longitud de arco sobre el ancho de la unión, tanto de la primera, figura 5c, como de la segunda pasada, figura 5 d. Esta poca alteración del ancho del cordón ante la variación del voltaje (longitud del arco) puede deberse a que la transferencia de masa (deposición de la gota) en este proceso se realiza de forma controlada [2]; es decir, sin ser la gota proyectada, desde la punta del electrodo, ni ser colocada por corto circuito.

La forma de colocación la gota "fría" permite que esta no oscile de un lado a otro dentro de la columna e incremente el ancho del cordón por dicha oscilación, y la ausencia de corriente durante la transferencia evita que se produzcan explosiones de las gotas durante el cortocircuito, como puede ocurrir en otros procesos. La relación existente entre la corrección de la longitud de arco y las áreas de los cordones estarán supeditadas solamente a las variaciones de la altura de refuerzo y de la profundidad de penetración, no del ancho de los cordones. Precisamente, queda demostrada una de las ventajas del proceso, no antes demostrada y es que permite variar la profundidad de penetración y la altura de refuerzo manteniendo constante el ancho del cordón; es decir independiza la geometría de la unión del voltaje de soldadura (longitud del arco) del ancho del cordón, a través de la función corrección del voltaje de arco de soldadura. Este aspecto pudiera ser aprovechado para soldar uniones de mayores espesores, produciendo estrechas zonas afectadas térmicamente, con distorsiones mínimas.

Tal como se definió en la introducción del presente trabajo, la función de corrección de pulso en el proceso CMT modifica la energía incorporada; es decir, a mayor corrección (en por ciento), mayor energía aportada al inicio del arco, lo que se traduce en un inicio del arco más caliente, y viceversa [4].

La función de corrección de pulso influye directamente sobre todos los parámetros geométricos, según se puede apreciar en las gráficas de los efectos principales, figura 4. Sin embargo, atendiendo al criterio de Pareto influye significativamente sobre la profundidad de penetración, figura 5b, figura 5d y más discretamente sobre el alto de refuerzo, tanto en la primera pasada figura 5a, como en la segunda, figura 5b. Prácticamente no influye no sobre el ancho del cordón, figura 5e. La energía incrementada al inicio del proceso de ignición del arco convierte temporalmente al arco más caliente. Al hacerse más caliente el arco también disminuye el tiempo en que se funde inicialmente la gota, incorporando una energía adicional. Esta energía adicional, sumada a la del período del arco hace que se funda más rápido el metal del electrodo. La fusión rápida del metal del electrodo conduce a la incorporación de mayor volumen de metal sobre la unión. Este incremento de metal aumenta la altura de refuerzo y la cantidad de calor aportada a la unión. Este incremento energético del proceso en el inicio del surgimiento del arco producido por el aumento de la función de corrección de pulso incide energéticamente también en el calentamiento concentrado del material base, lo que hace incrementar la profundidad de la poza de soldadura, repercutiendo en una mayor penetración. En el ancho del cordón no influye prácticamente, debido posiblemente, a la combinación de la brevedad con que transcurre la función de corrección de pulso y a la conductividad térmica del aluminio, que produce un enfriamiento de la gota, impidiendo su dilución hacia los laterales del cordón, conduciendo a cordones con un ancho prácticamente constante, independientemente de la variación de la función de corrección de arco. Es decir, la función de corrección de arco puede ser empleada para modificar la profundidad de fusión y la altura de refuerzo. El ancho de las uniones prácticamente no lo modifica.

## Conclusiones

La función corrección de la longitud de arco modifica la geometría del arco, influyendo inversamente proporcional sobre la altura de refuerzo ( $h_r$ ) y sobre la profundidad de penetración ( $h_p$ ) y no manifiesta influencia significativa sobre el ancho del cordón ( $b$ ).

La función corrección del pulso de corriente influye directamente proporcional sobre la altura de refuerzo ( $h_r$ ) y sobre la profundidad de penetración ( $h_p$ ) y no manifiesta influencia significativa sobre el ancho del cordón ( $b$ ).

La velocidad de soldadura influye inversamente proporcional sobre la altura de refuerzo ( $h_r$ ), el ancho ( $b$ ) y la profundidad de penetración ( $h_p$ ) de los cordones de soldadura. Esta influencia es más significativa, cuanto menores son las correcciones de arco y de pulso de corriente.

## Referencias

1. Azar AS. A heat source model for cold metal transfer (CMT) welding. *Therm Anal Calorim.* 2015;122(2):6-17
2. Polak V, Dostal, P. Analysis of modern methods in welding technology of technical materials In: Department of Technology and Automobile Transport FoA; Brno, Czech Republic: Mendel University in Brno; 2013
3. De Luna Alanís R, Gómez Pérez C. Las correcciones de arco y de pulso y el voltaje en la transferencia metálica fría. *Ingeniería Mecánica.* 2016;19(2):94-102.
4. Pickin CG, Williams SW, Lunt M. Characterisation of the cold metal transfer (CMT) process and its application for low dilution cladding. *Journal of MaterialsProcessingTechnology.* 2011;211(3):496-502.
5. Talalaev R, Veinthal, R., Laansoo A, et al. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products. *Estonian Journal of Engineering.* 2012;18(3):243-50.
6. Meco S, Pardal Gonçalo E, Alexander Quintino L. Software development for prediction of the weld bead in CMT and pulsed-MAG processes. *Int J Adv Manuf Technol.* 2013;64:171-8.
7. Kantehm MS, Marcus Krupp U, Michels W. Monotonic and Cyclic Deformation Behavior of MIG-CMT Welded and Heat-Treated Joints of Aluminum Cast and Wrought Alloys. *Advanced Engineering Materials.* 2012;14(10):8.
8. Taban E, Kaluc, E. Microstructural and mechanical properties of double-sided MIG, TIG and friction stir welded 5083-H321 aluminium alloy. *Kovove Mater.* 2006;44(25):25-33
9. Taban E, Kaluc, E. Comparison between microstructure characteristics and joint performance of 5086-H32 aluminium alloy welded by MIG, TIG and friction stir welding processes. *Kovove Mater.* 2007;45(8):241-8.
10. Aranda J, Armada M, González P. et al. Automatización para las industrias marítimas. Un estudio de la situación de España; 2005. [Citado 26 de diciembre de 2017] Disponible en: <http://e-spacio.uned.es/fez/view/bibliuned:594>
11. Eder T. The CMT Process - News and Its Advantages in Industry, SAE. USA: SAE,Org. Technical paper 2010-32-0071; 2010. [Citado 8 de noviembre de 2017] Disponible en: <http://papers.sae.org/2010-32-0071/>
12. Rykala J. Robotic welding of thin wall components made of 6xxx and 2xxx series aluminium alloys using low-energy methods. *Welding International.* 2014;28(5):333-8.
13. De Luna Alanis RE. Process and method for welding by fusion aluminium alloys by a cold metal transfer and pulsed regyme. México. 2014.
14. Gaiani, S. Comparison between different arc welding technologies for titanium exhaust systems manufacturing. In: Titanium 2011. San Diego, California. 2011 [Citado 26 de diciembre de 2017] Disponible en: [http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010\\_2014\\_papers/GaianiSilvia\\_2011.pdf](http://c.ymcdn.com/sites/www.titanium.org/resource/resmgr/2010_2014_papers/GaianiSilvia_2011.pdf)