

Estudio de la influencia paramétrica del modo de transferencia de metal de aporte RMD™ aplicado a manufactura aditiva por arco metálico (WAAM).

J. G. Granados-Sánchez ^a, F. Reyes-Calderón ^a, N. Alcantar-Mondragón ^a

^aTecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Lomas de Santiaguito, 58120, Morelia, Michoacán, México (División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento de Metalmecánica)

ABSTRACT

In the present work, a design of experiments (DoE) was carried out to evaluate the parametric influence of the RMD filler metal transfer mode when used for additive arc metal manufacturing (WAAM) in carbon steel. The objective of the parameterization is to obtain the optimal conditions for wall construction using the WAAM process. The parameters of the WAAM process (feed rate, deposition rate and arc length) were determined using a full factorial design of experiments. Aspect ratio, deposition rate and contact angle were considered as response variables in single layer constructions. For the 5-layer wall construction, deposition rate and average height were considered as response variables. Subsequently, through statistical analysis it was determined that the feed rate and filament feed rate are essential for wall construction. In addition, the use of RMD transfer mode is feasible for WAAM application due of the increased deposition rate in the built-up layers.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 01 Diciembre, 2024
Revisado 30 Diciembre, 2024
Aceptado 31 Diciembre, 2024

KEYWORDS

DoE; Factorial; WAAM;
RMD; GMAW

Introducción

En años recientes el interés industrial en la manufactura aditiva por arco metálico (WAAM) ha incrementado de manera significativa debido a su capacidad para crear componentes metálicos relativamente grandes, con velocidades de deposición altas y bajos costos de equipamiento y desperdicio de material [1]. Comparado con la manufactura tradicional sustractiva, los sistemas WAAM permiten reducir los tiempos de fabricación entre un 40 a 60% y los de operaciones de maquinado posteriores entre un 15 a 20% [2]. El uso de la técnica GMAW-WAAM con modos de transferencia avanzados (CMT, pulsado, entre otros) ha demostrado tener beneficios en la mejora de las propiedades mecánicas y modificaciones microestructurales de gran relevancia. El modo de deposición de metal regulada (RMD) es una técnica de corto circuito modificada introducida por Miller Electric en 2004. La técnica RMD anticipa y controla la fase de corto circuito y selectivamente reduce la corriente para generar una transferencia de metal estable [3]. Debido a su versatilidad el modo de transferencia de metal de aporte ha sido objeto de múltiples estudios [4-7]. Por otro lado, diversos autores han llevado a cabo investigaciones sobre la influencia de distintos parámetros de la técnica GMAW-WAAM en la morfología, cambios microestructurales y propiedades mecánicas en la construcción de muros de acero al carbono. Nguyen et al. [8] analizaron el efecto de velocidad de avance, voltaje y amperaje de soldeo sobre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas de muros de acero al carbono construido con el electrodo ER70S-6 y encontraron que el factor que más influye en el tamaño de grano promedio es la velocidad de avance, el voltaje es el factor más influyente en el valor de la UTS mientras que para el valor de la elongación lo es el amperaje de soldeo.

AUTOR DE CORRESPONDENCIA  Nereyda Alcantar nereyda.am@morelia.tecnm.mx  División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento Metalmecánica, Instituto Tecnológico de Morelia, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/t761qa89>

© 2024 Los autores. Publicado por la Asociación Mexicana en Ciencias en Soldadura, Metalurgia e Ingeniería, A.C. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) que permite la reutilización, distribución y reproducción sin fines comerciales en cualquier medio, siempre que la obra original esté debidamente citada y no sea alterada, transformada o construida de ninguna manera. Los términos en los que se ha publicado este artículo permiten la publicación del Manuscrito Aceptado en un repositorio por parte del autor o con su consentimiento.

Badoniya et al. [9] llevaron a cabo un estudio paramétrico del efecto la velocidad de alimentación, voltaje, velocidad de avance y caudal del gas de protección sobre el ancho y alto de capa de muros de gran espesor, fabricados con el depósito de la aleación ER70S-6 empleando el método de Taguchi y el análisis relacional de Grey. Encontraron que el aumento de la velocidad de alimentación y voltaje lleva a un incremento sustancial del ancho de capa, mientras que aumentar la velocidad de avance genera el efecto contrario. Por otro lado, demostraron que el alto de capa será mayor al incrementar la velocidad de alimentación y que dicha respuesta se verá afectada negativamente al usar valores más altos de voltaje y velocidad de avance. Kumar et al. [10] realizaron un estudio paramétrico sobre el ancho y alto de capa en la fabricación de estructuras multicapa con geometría circular y cuadrada empleando la aleación ER70S-6 usando como parámetros de estudio la velocidad de avance, voltaje de circuito abierto y caudal del gas de protección. Encontraron que los factores estadísticamente significativos para ambas respuestas son la velocidad de avance y el voltaje de circuito abierto, siendo la velocidad de avance el factor de mayor influencia para ambas respuestas. Yildiz et al. [11] investigaron la influencia paramétrica de la velocidad de alimentación, la velocidad de avance y la razón entre ambas velocidades sobre la geometría, propiedades mecánicas y microestructura empleando la aleación ER120S-G y el modo de transferencia CMT. Correlacionaron los resultados obtenidos con el calor de aporte (HI) concluyendo que el factor de mayor influencia con dicha respuesta es la razón entre la velocidad de avance y la velocidad de alimentación. La información actualmente disponible sobre la aplicación del modo de transferencia RMD aplicado en WAAM es sumamente escasa. Por ende, el presente estudio tiene como objetivo analizar estadísticamente el efecto de los parámetros principales del proceso para determinar la factibilidad de emplearlo en aplicaciones de manufactura aditiva con acero al carbono.

Metodología

Matriz experimental

Se empleó un diseño factorial 2^3 (DoE) con una réplica empleando como factores la velocidad de alimentación del alambre (A), la velocidad de avance (B) y la longitud del arco (C) (Tabla 1). Los niveles de los factores se eligieron a partir de los valores de depósito nominales recomendados por el fabricante del equipo de soldadura. A partir los valores mostrados en la Tabla 1 se empleó una matriz experimental (Tabla 2).

Tabla 1. Factores y Niveles de DoE Factorial 2^3 empleado.

Factor	Nivel Bajo	Nivel Alto
Velocidad de alimentación (A)	85 mm/s	127 mm/s
Velocidad de avance de la antorcha de soldadura (B)	2.4 mm/s	5 mm/s
Longitud de Arco (C)	-3	3

Tabla 2. Matriz experimental del DoE Factorial 2^3 generado con Minitab.

Experimento	Velocidad de alimentación (A – mm/s)	Velocidad de avance (B – mm/s)	Longitud de Arco (C)
1	85	2.4	3
2	127	5	-3
3	85	5	-3
4	127	5	3
5	127	2.4	-3
6	127	2.4	3
7	85	5	3
8	85	2.4	-3
9	85	2.4	3
10	127	5	-3
11	85	5	-3
12	127	5	3
13	127	2.4	-3
14	127	2.4	3
15	85	5	3
16	85	2.4	-3

Manufactura de especímenes

Como sustrato para la fabricación de los especímenes se emplearon probetas de solera de acero ASTM A36 de 101.6 mm x 63.5 mm x 6.35 mm. Como filamento se empleó un electrodo ER70S-6 de 0.9 mm de diámetro. La composición química del material del sustrato y el material de aporte se muestran en las Tablas 3 y 4 respectivamente. Para el depósito, se empleó la máquina de soldadura PipeWorx400 de la marca Miller*. Durante la construcción de 1 capa y 5 capas se empleó mezcla de gas protector Inframixx® 200/25 (75 Ar-25CO₂) con un caudal de 40 CFH (0.31 L/s), GAP de 12.5 mm, la antorcha totalmente vertical 90° respecto al área de trabajo. Para la realización de 5 capas se tomó un tiempo entre pasadas de 60 s y se alternó el desplazamiento de la antorcha de soldadura entre empuje y arrastre.

Tabla 3. Composición química de la solera empleada.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cu
% en peso	0.190	0.177	0.522	0.015	< 0.150	0.274

Tabla 4. Composición química del material de aporte [12].

Elemento	C	Mn	Si	P	S	V	Cu
% en peso	0.06-0.15	1.4-1.85	0.08-1.15	0.025	<0.035	0.03	0.50

Cuantificación de respuestas

Se midió la altura y ancho de 1 cm entre ellas para cuantificar la relación de cada espécimen con separaciones de aspecto (Ecuación 1). La cantidad de material depositado se cuantificó pesando las probetas antes y después de cada operación, además de registrar el tiempo que tardó cada capa. Para los especímenes de 5 capas se tomó en cuenta el tiempo de espera entre cada capa. Las tasas de depósito para la primera y segunda etapa se cuantificaron con las Ecuaciones 2 y 3, respectivamente. El calor de aporte lineal (HI) para ambas etapas se calculó con la Ecuación 4, denotando que el HI que se reporta para los experimentos de 5 capas es el promedio. Además, el valor de la eficiencia térmica (η) del proceso RMD se establece en 0.9 [11,13] tomando como base la eficiencia reportada para CMT, ya que el principio de funcionamiento es muy similar a RMD y no se encontró reportado en literatura el valor propio de la eficiencia térmica de RMD. En la caracterización macrográfica se procedió a desbaste mecánico con lijas de SiC con granulometría de la 80 a 1200 y posteriormente se atacaron químicamente con Nital-10 mediante la técnica de swabbing. En la Figura 1 se presenta una macrografía representativa donde se muestra las zonas de medición consideradas.



Figura 1. Macrografía representativa de las zonas de medición: ángulos de contacto, el ancho y la altura de capa.

$$RA = \frac{\text{Ancho del cordón (W)}}{\text{Altura de sobremonta (H)}} \quad (1)$$

$$TD_{1 \text{ capa}} = \frac{(\text{Masa final (gr)} - \text{masa inicial (gr)}) * 3600}{\text{Tiempo de depósito (s)} * 1000} \quad (2)$$

$$TD_{5 \text{ capas}} = \frac{(\text{Masa final (gr)} - \text{masa inicial (gr)}) * 3600}{(\text{Tiempo de depósito por capa} + \text{Tiempo entre capas}) * 1000} \quad (3)$$

$$HI = \left(\frac{\text{Voltaje} * \text{Amperaje}}{\text{Velocidad de avance}} \right) * \eta \quad (4)$$

Resultados y discusión

Muros de 1 capa

En la Tabla 5. Se muestran los valores de respuesta obtenidos con las probetas de 1 capa. Se observa que la sobremonta máxima tiene un valor promedio de 4.42 mm en el experimento 13 (Figura 2 (m)). En el proceso de manufactura WAAM busca tener valores de relación de aspecto bajos, el experimento 13 presenta un valor de 1.61. La tasa de depósito (TD) máxima reportada corresponde al experimento 7 (Figura 2 (g)). con un valor de 2.145 kg/hr, mientras que el ángulo de contacto más favorable pertenece al experimento 11. Se reitera que es deseable tener valores del ángulo de contacto aproximados a 90° ya que ello permite una construcción más estable. Los experimentos 5, 6, 8, 14 y 16 (Figura 2 (e, f, h, n y p)).

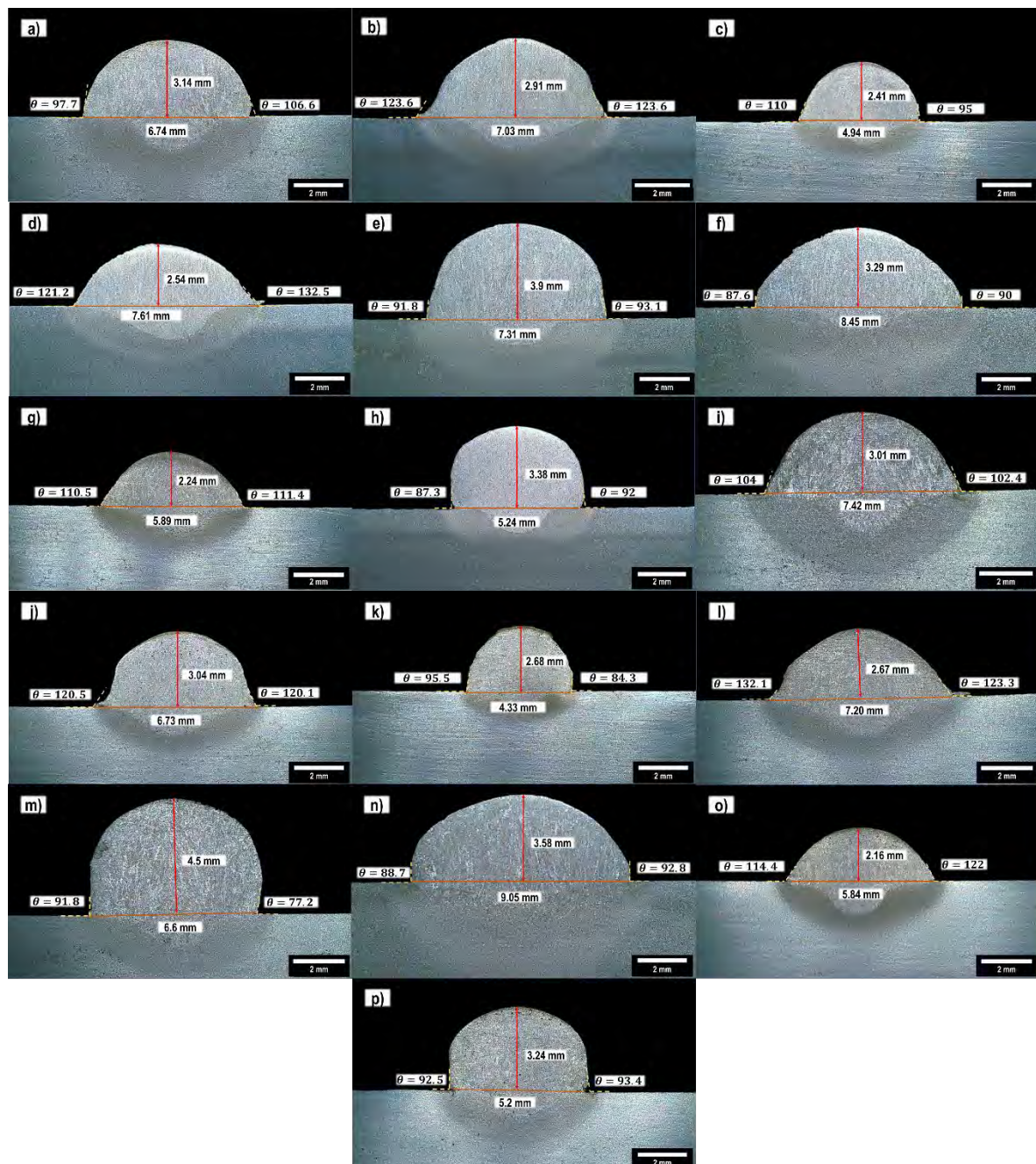


Figura 2. Macrográficas de las secciones medias de las probetas de una capa.

También presentan valores del ángulo de contacto que favorecen la morfología para construcción. Sin embargo, se observa que se presentan mordeduras en los experimentos 8 y 16 (Figura 2 (h y p)). Se observa que para las condiciones del experimento 16 también se obtiene un HI 993.94 J/mm, siendo el de mayor magnitud de la primera etapa de experimentación. El alto calor de aporte en combinación con las mordeduras anteriormente mencionadas, son un factor potencial de inestabilidad al emplear estos parámetros en la construcción de muros con un mayor número de capas. La Figura 2 muestra las macrografías de la sección media de cada experimento.

Tabla 5. Valores de las respuestas correspondientes al DoE con probetas de una capa.

Cordón	TD (Kg/hr)	RA (promedio)	θ (promedio)	HI (J/mm)
1	1.360	2.74	102.1	260.51
2	2.012	1.79	123.6	787.82
3	1.818	2.85	102.5	952.24
4	2.055	2.75	126.8	433.42
5	1.447	2.07	92.4	273.75
6	1.459	1.61	88.8	596.54
7	2.145	2.30	111	410.73
8	1.432	2.35	89.6	759.60
9	2.104	2.06	103.2	369.20
10	2.142	1.61	120.3	801.45
11	1.425	1.67	90	316.01
12	1.380	2.49	127.7	759.66
13	1.461	1.67	84.2	591.73
14	2.133	2.63	90.7	466.56
15	1.429	2.76	118.2	351.07
16	2.138	2.56	93	993.94

En las Tablas 6, 7 y 8 se presentan los análisis de varianza (ANOVA). En la Tabla 6 se observa que el factor que mayor influye en la relación de aspecto es la longitud de arco con un valor F de 144.25, un valor p de 0 y una suma de cuadrados ajustada (SC ajustada) de 2.52. Esta información se complementa con el diagrama de Pareto correspondiente (Figura 3 (a)) donde se observa que los factores que son estadísticamente significativos son Longitud de Arco (C) y la velocidad de avance (B).

Para la tasa de depósito (TD) se observa que el factor de mayor influencia es la velocidad de alimentación (A), ya que en su respectivo ANOVA (Tabla 6) se reporta un valor F de 219.11, un valor p de 0 y una SC ajustada máxima de 1.66. Se observa, además, con ayuda del diagrama de Pareto correspondiente (Figura 3 (b)), que estadísticamente no hay otro parámetro o interacción que sea estadísticamente significativo.

Para el ángulo de contacto (θ) se observa que el factor de mayor impacto en la magnitud de esta respuesta es la velocidad de avance con un valor F de 92.89, un valor p de 0 y una SC ajustada máxima de 1938.20. Con el diagrama de Pareto (Figura 3 (c)) se observa que para esta respuesta los 3 factores son estadísticamente significativos, además de la interacción entre la velocidad de alimentación y velocidad de avance (AB) y la interacción entre la velocidad de alimentación y la Longitud de Arco (AC).

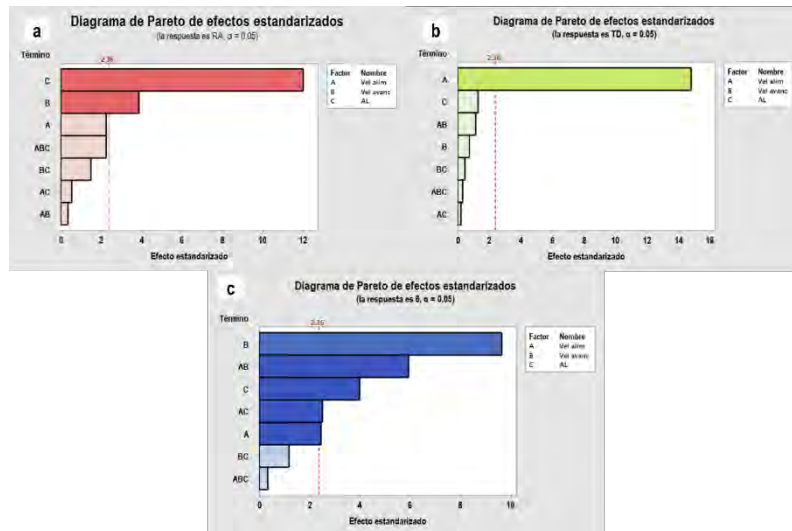


Figura 3. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de las respuestas para los especímenes de una capa; a) Relación de aspecto, b) Tasa de depósito, c) Ángulo de contacto.

Tabla 6. ANOVA de la relación de aspecto (RA) para DoE de una capa.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	3.0701	0.38376	21.97	0
Bloques	1	0.06376	0.06376	3.65	0.098
Lineal	3	2.87132	0.95711	54.78	0
A	1	0.08851	0.08851	5.07	0.059
B	1	0.26266	0.26266	15.03	0.006
C	1	2.52016	2.52016	144.25	0
Interacciones de 2 términos	3	0.04652	0.01551	0.89	0.493
AB	1	0.00226	0.00226	0.13	0.73
AC	1	0.00526	0.00526	0.3	0.6
BC	1	0.03901	0.03901	2.23	0.179
Interacciones de 3 términos	1	0.08851	0.08851	5.07	0.059
ABC	1	0.08851	0.08851	5.07	0.059
Error	7	0.12229	0.01747		
Total	15	3.19239			

Tabla 7. ANOVA de la tasa de depósito (TD) para DoE de una capa

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	1.7043	0.21304	28.12	0
Bloques	1	0.01471	0.01471	1.94	0.206
Lineal	3	1.6769	0.55897	73.77	0
A	1	1.66014	1.66014	219.11	0
B	1	0.00412	0.00412	0.54	0.485
C	1	0.01265	0.01265	1.67	0.237
Interacciones de 2 términos	3	0.0119	0.00397	0.52	0.68
AB	1	0.00995	0.00995	1.31	0.29
AC	1	0.00032	0.00032	0.04	0.843
BC	1	0.00163	0.00163	0.22	0.657
Interacciones de 3 términos	1	0.00078	0.00078	0.1	0.757
ABC	1	0.00078	0.00078	0.1	0.757
Error	7	0.05304	0.00758		
Total	15	1.75733			

Tabla 8. ANOVA del ángulo de contacto (θ) para DoE de una capa.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	3301.34	412.67	19.78	0
Bloques	1	5.64	5.64	0.27	0.619
Lineal	3	2396.35	798.78	38.28	0
A	1	126	126	6.04	0.044
B	1	1938.2	1938.2	92.89	0
C	1	332.15	332.15	15.92	0.005
Interacciones de 2 términos	3	896.87	298.96	14.33	0.002
AB	1	735.77	735.77	35.26	0.001
AC	1	131.68	131.68	6.31	0.04
BC	1	29.43	29.43	1.41	0.274
Interacciones de 3 términos	1	2.48	2.48	0.12	0.74
ABC	1	2.48	2.48	0.12	0.74
Error	7	146.06	20.87		
Total	15	3447.41			

Construcción de muros de 5 capas

Tras realizar los 16 experimentos con los mismos factores y niveles de la matriz experimental de la Tabla 2, se observa que la tasa de depósito y altura promedio máxima se alcanza en el experimento 5 (Figura 5 (e)), con valores de 0.85 kg/hr y 14.67 mm, respectivamente. Se denota que en algunos muros como lo son los experimentos 6, 7, 9 y 10 (Figura 4 (f, g, i, y j)) se tiene una desviación prominente con respecto a su eje central, esto se debe a que la combinación de parámetros empleados, específicamente de la razón entre la velocidad de avance y la velocidad de alimentación no favorece una construcción estable de los muros, como es mencionado por Yildiz et al. [11], generando la inclinación que se aprecia en las macrografías anteriormente mencionadas. Se observa que en los experimentos 6 y 10 (Figura 4 (f y j)) se obtuvieron los mayores valores de HI promedio, 987.37 J/mm y 964.78 J/mm, respectivamente. El valor del HI muestra un comportamiento proporcional con la tasa de depósito alcanzada en el experimento 6 ya que es la segunda tasa de depósito más alta de la matriz experimental (0.81 kg/hr), Mientras que, el experimento 7 (Figura 4 (g)), presenta el HI más bajo (264.07 J/mm) y aun así presenta una desviación considerable del muro con respecto a su eje central, además de obtener la menor altura promedio de los experimentos realizados. Con esto se puede concluir que conforme mayor sea la TD, tenderá a incrementar el HI, sin ser el único factor que afecta dicha respuesta (la razón de las velocidades de alimentación y de avance también incide significativamente en la respuesta). Por otro lado, la desviación que presentan los muros con respecto a su eje central se debe más a la razón entre las velocidades de alimentación y de avance que al valor del HI. En la Tabla 9 se presentan los resultados de los muros de 5 capas y en la Figura 4 se muestran las macrografías de la sección media de cada experimento

Tabla 9. Valores de las respuestas correspondientes al DoE de 5 capas.

Muro	Altura promedio (mm)	TD (kg/hr)	HI (J/mm)
1	10.65	0.53	466.33
2	10.78	0.58	846.06
3	9.65	0.37	396.05
4	10.18	0.55	345.65
5	14.67	0.85	539.29
6	12.73	0.81	987.37
7	8.13	0.37	264.07
8	12.26	0.55	729.88
9	10.61	0.54	276.49
10	10.62	0.50	964.78
11	9.46	0.37	389.96
12	9.5	0.48	714.64
13	13.68	0.68	805.36
14	12.72	0.76	570.20
15	8.37	0.35	351.55
16	12.37	0.54	472.13

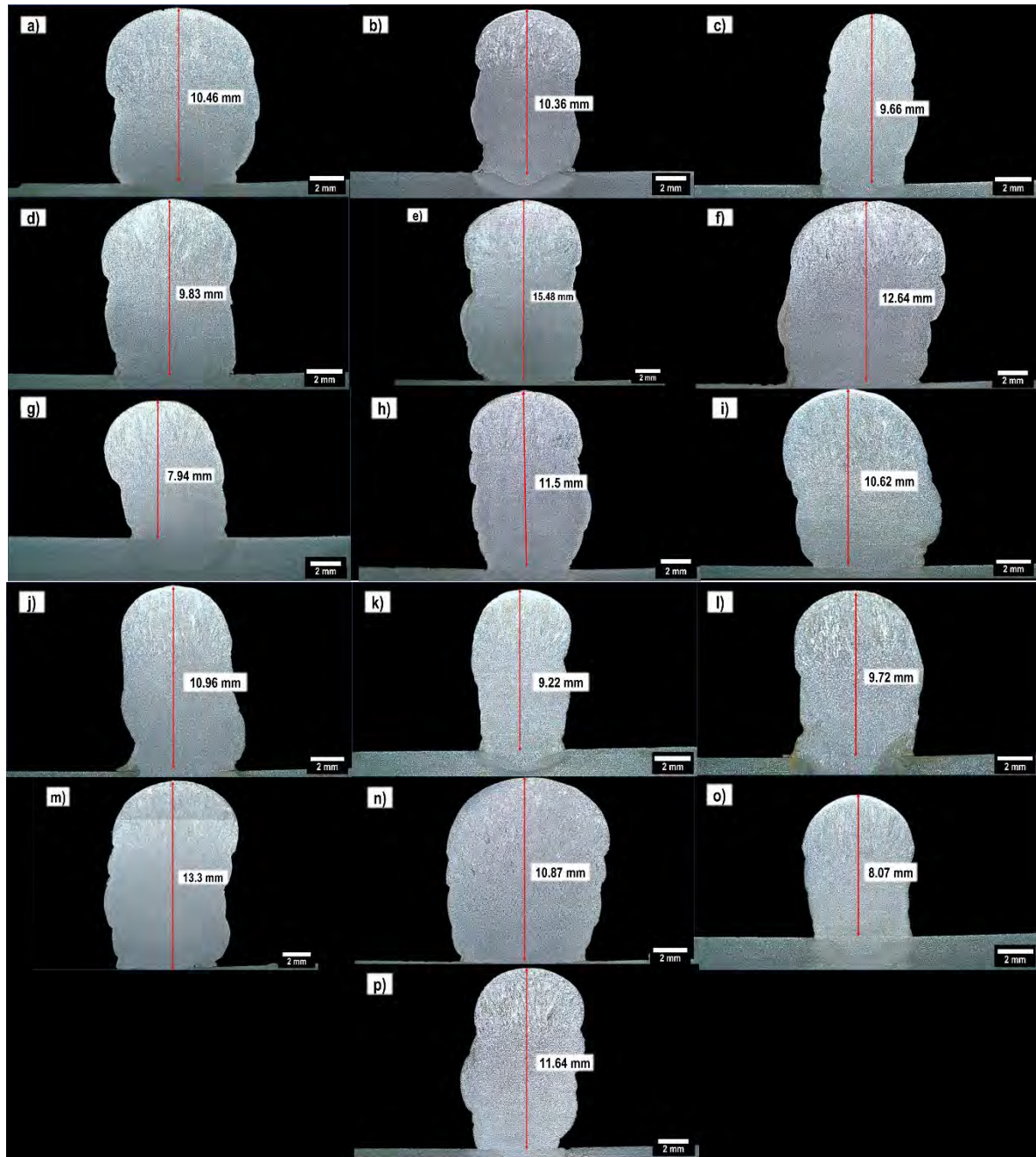


Figura 4. Macrografías de las secciones medias de las probetas de 5 capas.

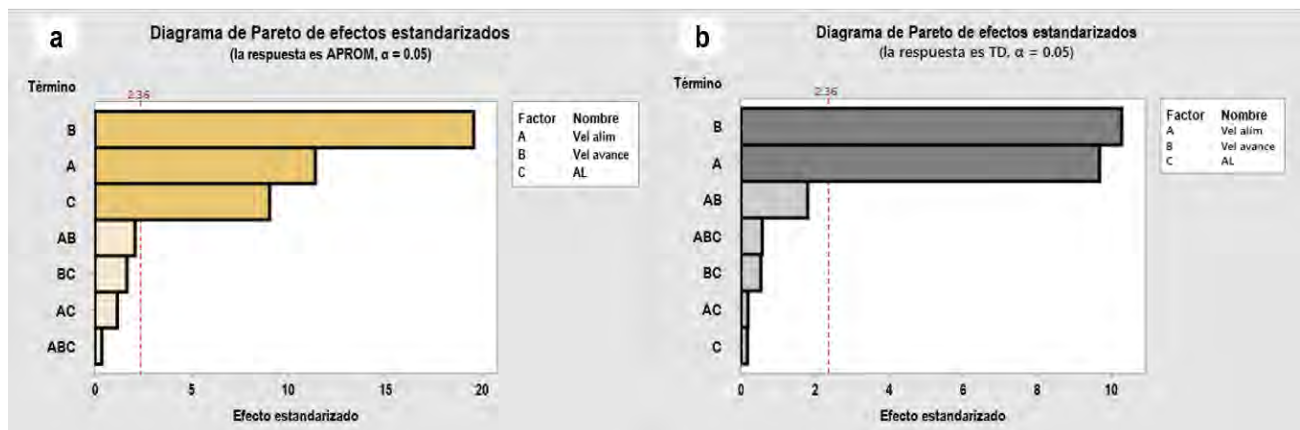


Figura 5. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados de las respuestas para los experimentos de 5 capas; a) Altura promedio, b) Tasa de depósito

Mediante el estudio del ANOVA (Tabla 10) se concluye que el parámetro que más influye en la variabilidad de la altura promedio (APROM) de los muros es la velocidad de avance (B) con un valor F de 92.89, un valor de p de 0 y una SC ajustada de 1938.2. A manera de complemento el diagrama de Pareto correspondiente (Figura 5 (a)) permite denotar que los dos factores restantes; velocidad de alimentación (A) y la Longitud de Arco (C) son estadísticamente significativos en este modelo. La variabilidad de la tasa de depósito (TD) está influenciada mayormente por la variación de la velocidad de avance (B) ya que en su respectivo ANOVA (Tabla 11) se evidencia que dicho factor tiene un valor F de 105.83, un valor p de 0 y una SC ajustada de 0.53. El diagrama de Pareto (Figura 5(b)) permite determinar que los factores estadísticamente significativos para esta respuesta son la velocidad de alimentación y la velocidad de avance.

Tabla 10. ANOVA de la altura promedio (APROM) para DoE de 5 capas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	3301.34	412.67	19.78	0
Bloques	1	5.64	5.64	0.27	0.619
Lineal	3	2396.35	798.78	38.28	0
A	1	126	126	6.04	0.044
B	1	1938.2	1938.2	92.89	0
C	1	332.15	332.15	15.92	0.005
Interacciones de 2 términos	3	896.87	298.96	14.33	0.002
AB	1	735.77	735.77	35.26	0.001
AC	1	131.68	131.68	6.31	0.04
BC	1	29.43	29.43	1.41	0.274
Interacciones de 3 términos	1	2.48	2.48	0.12	0.74
ABC	1	2.48	2.48	0.12	0.74
Error	7	146.06	20.87		
Total	15	3447.41			

Tabla 11. ANOVA de la tasa de depósito (TD) para DoE de 5 capas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	0.357254	0.044657	26.1	0
Bloques	1	0.008819	0.008819	5.15	0.057
Lineal	3	0.34173	0.11391	66.58	0
A	1	0.160606	0.160606	93.87	0
B	1	0.181073	0.181073	105.83	0
C	1	0.00005	0.00005	0.03	0.869
Interacciones de 2 términos	3	0.006136	0.002045	1.2	0.379
AB	1	0.005575	0.005575	3.26	0.114
AC	1	0.000059	0.000059	0.03	0.857
BC	1	0.000501	0.000501	0.29	0.605
Interacciones de 3 términos	1	0.00057	0.00057	0.33	0.582
ABC	1	0.00057	0.00057	0.33	0.582
Error	7	0.011977	0.001711		
Total	15	0.369231			

Conclusiones

1. En los especímenes de 1 capa, los factores que más influyen en la variabilidad de la relación de aspecto (RA), tasa de depósito (TD) y ángulo de contacto (θ) son; la Longitud de Arco (C), velocidad de alimentación (A) y la velocidad de avance (C), respectivamente.
2. Para los muros de 5 capas se demuestra que la velocidad de alimentación (A) y la velocidad de avance (B) son estadísticamente significativas para la altura promedio (APROM) y la tasa de depósito (TD). Sin embargo, las interacciones entre ambos parámetros no lo son.
3. En el experimento 5, en los muros de 5 capas, se obtuvo una altura promedio máxima de 14.67 mm y una tasa de depósito máxima de 0.85 kg/hr con un HI promedio de 539.29 J/mm.
4. Al obtener tasas de depósito mayores, la altura promedio y calor de aporte (HI) incrementan proporcionalmente.
5. La desviación que presentan los muros de 5 capas con respecto a su eje central se debe principalmente a la razón entre las velocidades de alimentación y de avance y no al calor de aporte. Ya que tanto en la probeta de menor calor de aporte promedio (experimento 7 con 264.07 J/mm), como en la de mayor (experimento 6 con 987.37 J/mm) se presenta el fenómeno anteriormente mencionado.
6. Las tasas de depósito y características morfológicas de los experimentos realizados con el modo de transferencia RMD[™] lo hacen un candidato adecuado para aplicarlo en WAAM.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT, México) por el apoyo al proyecto. Además, los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / I.T. Morelia por el apoyo en laboratorios y equipos. Los estudios de J.G. Granados fueron patrocinados por CONAHCYT, México (N.B. 4018806).

Declaración de conflicto de interés

Los autores no informaron ningún posible conflicto de intereses relacionado a esta publicación.

ORCID

José Granados  <https://orcid.org/0009-0008-2898-6736>

Francisco Reyes  <https://orcid.org/0000-0002-2745-4833>

Nereyda Alcantar  <https://orcid.org/0000-0002-4658-5409>

Referencias

- [1] B. Wu et al., "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," *J Manuf Process*, vol. 35, pp. 127–139, Oct. 2018, doi: <https://10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
- [2] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + Arc Additive Manufacturing," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, May 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [3] S. Das, J. J. Vora, and V. Patel, "Regulated Metal Deposition (RMD[™]) Technique for Welding Applications: An Advanced Gas Metal Arc Welding Process," in *Advances in Welding Technologies for Process Development*, 1st ed., CRC Press, 2019, pp. 23–32.
- [4] V. Prajapati, Dinbandhu, J. J. Vora, S. Das, and K. Abhishek, "Study of parametric influence and welding performance optimization during regulated metal deposition (RMD[™]) using grey integrated with fuzzy taguchi approach," *J Manuf Process*, vol. 54, pp. 286–300, Jun. 2020, <https://10.1016/j.jmapro.2020.03.017>
- [5] D. Bandhu et al., "Experimental study on application of gas metal arc welding based regulated metal deposition technique for low alloy steel," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 37, no. 15, pp. 1727–1745, Nov. 2022, <https://10.1080/10426914.2022.2049298>
- [6] S. Das et al., "Experimental investigation on welding of 2.25 Cr-1.0 Mo steel with regulated metal deposition and GMAW technique incorporating metal-cored wires," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 15, pp. 1007–1016, Nov. 2021, <https://10.1016/j.jmrt.2021.08.081>
- [7] Dinbandhu, V. Prajapati, Jay. J. Vora, S. Das, and K. Abhishek, "Experimental studies of Regulated Metal Deposition (RMD[™]) on ASTM A387 (11) steel: study of parametric influence and welding performance optimization," *Journal of the Brazilian*

- Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 42, no. 1, p. 78, Jan. 2020, <https://10.1007/s40430-019-2155-3>
- [8] V.-T. Nguyen et al., "WAAM Technique: Process Parameters Affecting the Mechanical Properties and Microstructures of Low-Carbon Steel," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 5, p. 873, Apr. 2023, <https://10.3390/met13050873>
- [9] P. Badoniya, M. Srivastava, P. K. Jain, and S. Rathee, "Parametric investigation on wire arc additive manufacturing of ER70S-6 low-carbon steel for fabrication of thick-walled parts," *J Adhes Sci Technol*, vol. 38, no. 11, pp. 1925–1952, Jun. 2024, <https://10.1080/01694243.2023.2275823>
- [10] V. Kumar, A. Mandal, A. K. Das, and S. Kumar, "Parametric study and characterization of wire arc additive manufactured steel structures," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 115, no. 5–6, pp. 1723–1733, Jul. 2021, <https://10.1007/s00170-021-07261-6>
- [11] A. S. Yildiz, K. Davut, B. Koc, and O. Yilmaz, "Wire arc additive manufacturing of high-strength low alloy steels: study of process parameters and their influence on the bead geometry and mechanical characteristics," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 11–12, pp. 3391–3404, Jun. 2020, <https://10.1007/s00170-020-05482-9>
- [12] American Welding Society, "AWS 5.18/5.18M Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding," 2005, AWS (American Welding Society), Miami.
- [13] J. Ding et al., "Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts," *Comput Mater Sci*, vol. 50, no. 12, pp. 3315–3322, Dec. 2011, <https://10.1016/j.commatsci.2011.06.023>