

Análisis macrográfico en el soldeo de láminas de espesor delgado de acero inoxidable AISI 445 mediante el proceso GMAW.

O. E. Ávila-Hernández^a, F. Reyes-Calderón^a, J. G. Granados-Sánchez^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 Metalmeccánica)

ABSTRACT

In the present work, the macrographic analysis of the parametric influence of the RMD™ transfer mode on the welding of thin gauge (1.2mm) stainless steel sheets were carried out. By applying a 2³ Factorial Design of Experiments (DoE), the effect of feed rate, welding torch feed rate and arc length (Arc Length) on bead morphology was analyzed. As responses, bead continuity, filler material dilution in the base metal and aspect ratio were quantified by digital image analysis of bead cross sections. Subsequently, the different morphologies of the beads produced in the experiments were observed. Through the analysis of variance (ANOVA) it was determined that the feed rate and arc length are the parameters with the greatest influence on the morphology and aspect ratio of the beads. and appearance of the strands.

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Recibido 04 Diciembre, 2024
Revisado 18 Diciembre, 2024
Aceptado 30 Diciembre, 2024

KEYWORDS

RMD; ANOVA; GMAW

Introducción

El proceso de arco metálico protegido con gas (GMAW por sus siglas en inglés) es un proceso de soldadura por arco metálico en el cual se emplea un electrodo en forma de alambre que es alimentado de manera continua, mientras la piletta de soldadura se encuentra inmersa en un gas de protección que puede ser inerte, activo o una mezcla de ambos [1]. Las juntas realizadas con este proceso se caracterizan por ser calidad y permitir tasas de producción elevadas, siempre y cuando se empleen los parámetros de soldadura correctos [2].

El proceso de soldadura GMAW es uno de los mayormente empleados en diversos sectores industriales debido a su versatilidad conferida por los distintos modos de transferencia de metal de aporte que se pueden obtener mediante el control paramétrico del proceso y modo de transferencia usado [3]. Gracias al avance tecnológico de la última década, los equipos y modos de transferencia del proceso de soldadura GMAW han mejorado sustancialmente lo que ha permitido modificar y mejorar el control en la piletta de soldadura y obtener uniones con una calidad metalúrgica y mecánica superior con reducción significativa del calor de aporte originando modos de transferencia avanzados [4]. El proceso de soldadura GMAW con Deposición Regulada de Metal (RMD™) permite tener un control preciso de la piletta de soldadura haciendo muy factible su uso incluso cuando la habilidad del operador no es elevada, el modo de transferencia de metal de aporte RMD™, mediante un control sinérgico avanzado el cual fue patentado en 2004, el cual permite disminuir las proyecciones, mayor deposición del metal, mejora el control de la piletta de soldadura mientras el calor de aporte se minimiza [5].

AUTOR DE CORRESPONDENCIA Oscar Ávila  m15121552@morelia.tecnm.mx  División de Estudios de Posgrado e Investigación, Departamento Metalmeccánica, Instituto Tecnológico de Morelia, México. Se puede acceder a los datos complementarios en línea en <https://doi.org/10.71103/nwr72j24>

© 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.

En trabajos anteriores se ha empleado este modo de transferencia en espesores iguales a (1.2 mm) de acero al carbono obteniendo cordones uniformes y de gran calidad estética utilizando parámetros obtenidos mediante la realización de un DoE 2^3 y el análisis estadístico ANOVA teniendo como respuestas la relación de aspecto, continuidad del cordón, % de dilución y calor de aporte. En el presente estudio se analiza un caso industrial en el que se emplea un acero inoxidable ferrítico (AISI 445) para la fabricación de tanques exteriores de almacenamiento de agua de sistemas de calentamiento solar. El objetivo es analizar el efecto en la morfología de los cordones al emplear el modo de transferencia RMD™ y determinar la factibilidad de utilizarlo para los espesores usados en esta aplicación (1.2 mm). Las pruebas experimentales realizadas con el diseño factorial 2^3 y el ANOVA empleado, se observó la morfología de cada cordón con las distintas configuraciones de parámetros para el soldeo encontrando los óptimos.

Metodología

Condiciones de soldeo

Se cortaron 16 láminas de acero inoxidable ferrítico (AISI 445) con espesor de 1.2 mm con las medidas 13cm x 4cm, los cordones se realizaron en Bead on Plate las condiciones de soldeo se muestran en la Figura 1. Los parámetros utilizados para cada corrida de la matriz experimental se presentan en la Tabla 1. Posteriormente se extrajeron cortes de las secciones transversales de los cordones. para prepararlos mediante desbaste mecánico con lijas de agua con granulometría del número 80 a 1200, para luego ser atacadas químicamente con hidróxido de potasio y agua destilada induciendo una corriente de 2.5 volts por 40 segundos por inmersión para revelar la zona de fusión (ZF) y metal base (MB). Se procedió a tomar macrografías de las probetas atacadas para el análisis estadístico.

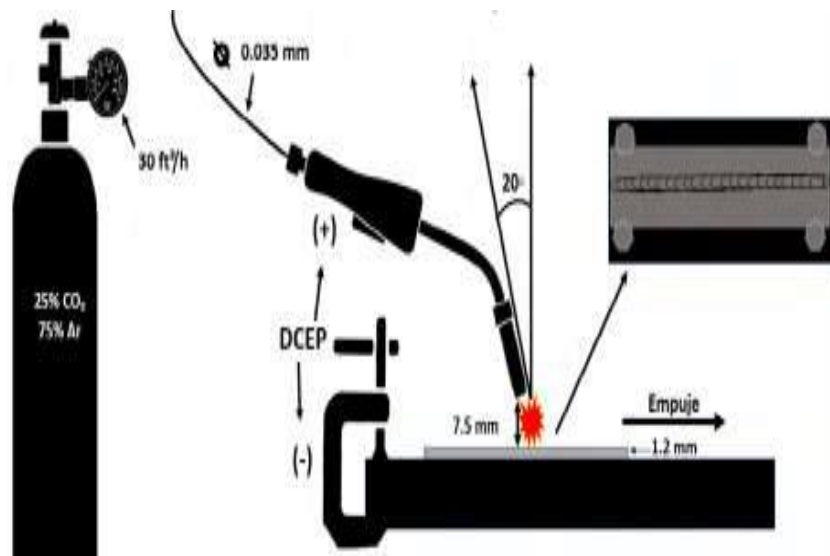


Figura 1. Esquema representativo de las condiciones de Soldeo.

Los cordones elaborados en el diseño de experimentos son 8, más su réplica dando un total de 16 cordones, la réplica es para robustecer el modelo mediante la toma de más datos para el análisis y es una condición para poder usar el diseño factorial, cada uno de los cordones elaborados con el modo de transferencia avanzado RMD™ fueron con una combinación de parámetros distinta en cada uno siguiendo la matriz experimental (Tabla 1). Esto para recabar información de la morfología dependiendo de los parámetros

utilizados, para el análisis cada corte transversal se somete a un análisis digital de imágenes.

Tabla 1. Matriz experimental DoE 2³ con réplica para acero inoxidable AISI 445.

Cordón	Vel. Avance mm/s	Vel. Alimentación pulg/min	Arc-Length
1	13	240	-3
2	8.3333	240	-3
3	8.3333	160	-3
4	13	160	-3
5	8.3333	160	-3
6	8.3333	240	3
7	8.3333	240	3
8	8.3333	240	3
9	13	240	-3
10	13	240	-3
11	13	160	3
12	13	160	3
13	8.3333	240	3
14	13	240	3
15	13	160	3
16	8.3333	160	3

Análisis Digital de Imágenes

Cada corte transversal fue realizado a una distancia aproximada de 1 cm obteniendo 8 cortes transversales por cordón como se ve en la Figura 22. Posteriormente usando la metodología que se muestra en la Figura 2 para la medición de los cortes se tomaron imágenes para poder realizar las mediciones correspondientes para poder calcular nuestras respuestas que son la relación de aspecto, continuidad del cordón y % de dilución las cuales fueron calculadas con las ecuaciones 1-3.

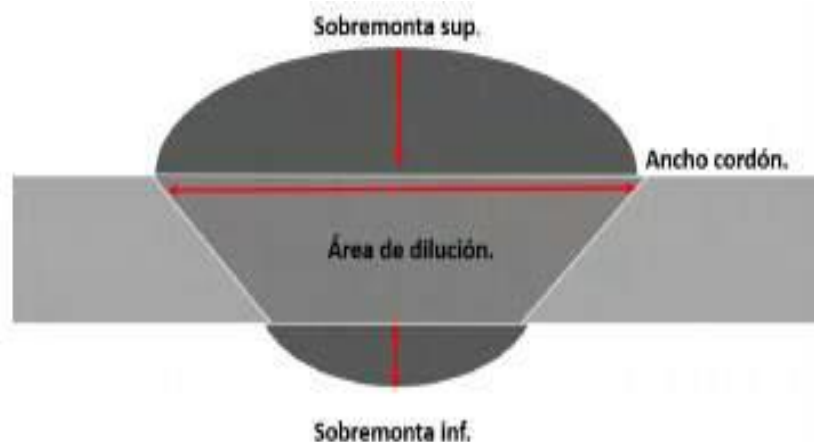


Figura 2. Zonas de medición de los cortes transversales.

$$\%Dilución = \frac{\text{área de dilución}}{\text{área total sobremonta} + \text{área de dilución}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\text{Relación aspecto} = \frac{\text{ancho del cordón}}{\text{espesor} + \text{sobremonta sup} + \text{sobremonta inf}} \quad (2)$$

$$\text{Continuidad del cordón} = \sqrt{\frac{\sum(\text{sobremonta} - \text{prom sobremonta})^2}{\text{No. cortes transversales}}} \quad (3)$$

Resultados y discusión

Análisis del material en condición de suministro

Los cordones realizados con los diferentes parámetros arrojados por el Diseño de Experimentos (DoE) Factorial 2^3 se muestran en las Figuras 3-18. Todos los cordones fueron realizados con el proceso GMAW y el modo de transferencia avanzado RMD™ en lo cual podemos observar la limpieza con la cual se realizan eliminando casi por completo el chisporroteo excesivo que existe al usar otros modos de transferencia comunes, esta es una de las características que hacen a este modo de transferencia una opción muy viable para tenerlo en los procesos industriales aunado a esto se observan las distintas morfologías de los cordones influenciados por los diferentes parámetros con los cuales se elaboraron llegando incluso a perforar como se observa en la Figura 8. correspondiente al cordón 6, también podemos ver cordones los cuales son muy delgados como se muestran en las Figuras 12 y 15 debido a que uno de los parámetros sinérgicos del modo de transferencia avanzado arc-length tiende a enfocar el arco a la penetración de la pieza para mejorar la dilución cuando se encuentra en un valor de (-3) en los parámetros.

También se observa en cordones con una escasa continuidad a la linealidad, teniendo una tendencia a oscilar a lo largo de todo el cordón como se ve en la Figura 13 y 14 esto debido a altas velocidades de avance combinado con bajas velocidades de alimentación. Hay cordones los cuales visualmente se observan con una gran uniformidad tanto en sobremonta superior e inferior como en el ancho del cordón como los cordones de las Figuras 6 y 7 las cuales tienen una gran calidad visual

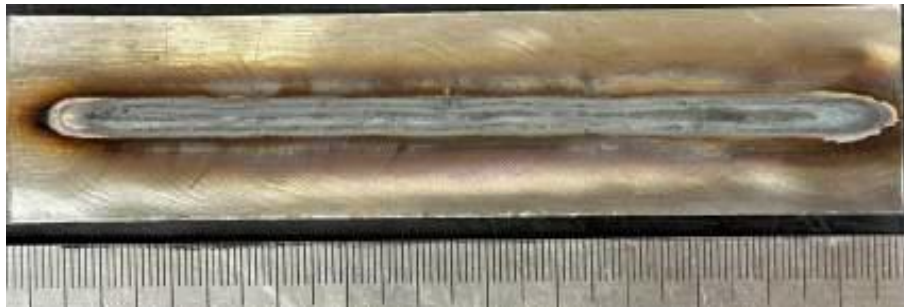


Figura 3. Cordón 1 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArcL. (-3).



Figura 4. Cordón 2 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArcL. (-3).

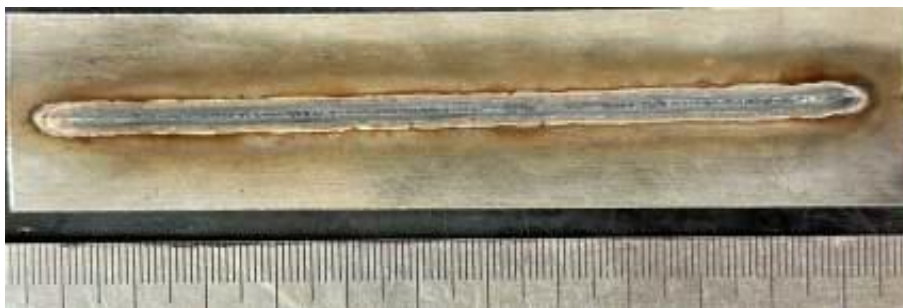


Figura 5. Cordón 3 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (160 pulg/min) ArcL. (-3).

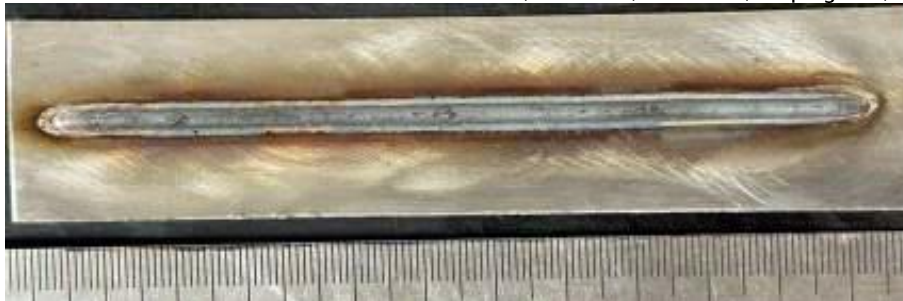


Figura 6. Cordón 4 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (160 pulg/min) ArcL. (-3).



Figura 7. Cordón 5 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (160 pulg/min) ArcL. (-3).



Figura 8. Cordón 6 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (240 pulg/min) ArcL. (3).

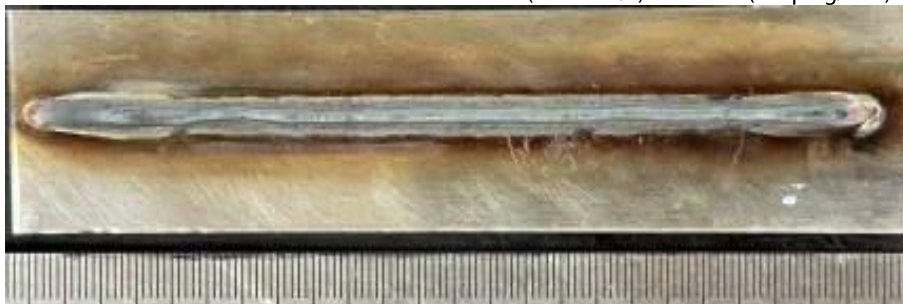


Figura 9. Cordón 7 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (160 pulg/min) ArcL. (3).



Figura 10. Cordón 8 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArCL. (3).

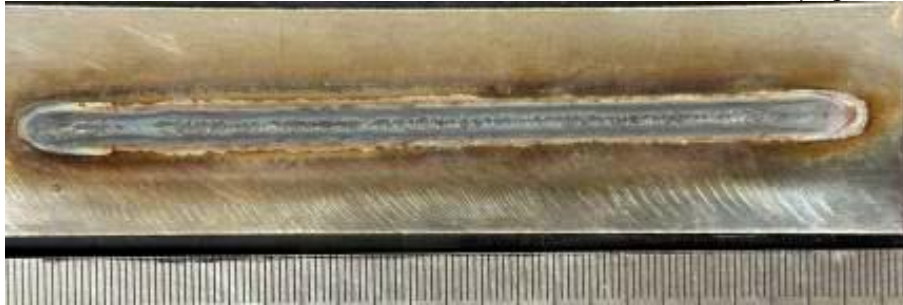


Figura 11. Cordón 9 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArCL. (3).



Figura 12. Cordón 10 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArCL. (-3).



Figura 13. Cordón 11 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (160pulg/min) ArCL. (3).

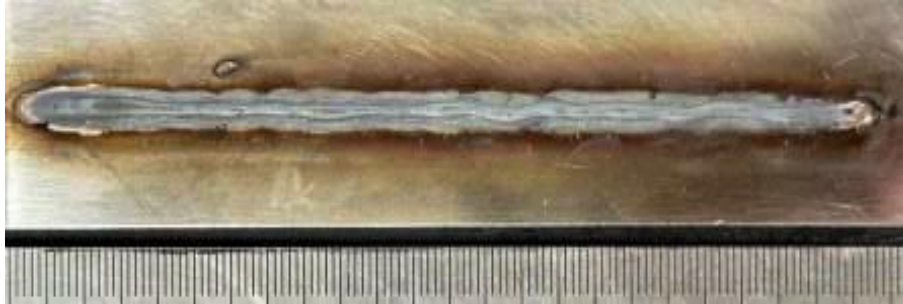


Figura 14. Cordón 12 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (160pulg/min) ArCL. (3).



Figura 15. Cordón 13 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArcL. (-3).



Figura 16. Cordón 14 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (240pulg/min) ArcL. (3).



Figura 17. Cordón 15 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (13 mm/s) Vel. Alim. (160pulg/min) ArcL. (-3).



Figura 18. Cordón 16 AISI 445 realizado con RMD™ Vel. Avan. (8.33 mm/s) Vel. Alim. (160 pulg/min) ArcL. (3).

Análisis del ANOVA

El análisis de varianza del DoE estudia principalmente 7 efectos los cuales son los parámetros usados correlacionados a las respuestas propuestas, para poder ver si estos efectos se ven o no influenciados por los parámetros utilizados, los primeros 3 efectos que estudia el análisis de varianza son los parámetros que de manera individual afectan en la respuesta, posteriormente estudia otros 3 efectos los cuales son una combinación de estos respecto a la respuesta, en este análisis de varianza podemos ver que observa el efecto de la velocidad de avance con la velocidad de alimentación, la velocidad de avance con arc-length y

velocidad de avance con arc-length cada combinación igual respecto a la respuesta y por último efecto es la interacción de los 3 parámetros combinados respecto a la respuesta, en conjunto al diagrama de efectos estandarizados nos muestra de manera más visual como los parámetros inciden en la respuesta que son todos los que sobrepasan la línea punteada roja del diagrama de Pareto (Figuras 19 y 20).

Tabla 3. ANOVA para % Dilución DoE (Factorial).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	8	4227.77	528.47	13.73	0.001
Bloques	1	74.67	74.67	1.94	0.206
Lineal	3	2072.15	690.72	17.95	0.001
Vel. Avance	1	99.57	99.57	2.59	0.001
Vel. Alim	1	1963.16	1963.16	51.02	0.152
Arc length	1	9.42	9.42	0.74	0
Interacciones de 2 términos	3	2076.27	692.09	17.99	0.636
Vel. Avance * Vel. Alim	1	225.06	225.06	5.85	0.001
Vel. Avance * Arc length	1	4.69	4.69	0.12	0.046
Arc length	1	9.42	9.42	0.74	0
Interacciones de 2 términos	3	2076.27	692.09	17.99	0.636
Vel. Avance * Vel. Alim	1	225.06	225.06	5.85	0.001
Vel. Avance * Arc length	1	4.69	4.69	0.12	0.046
Vel. Alim * Arc length	1	1846.52	1846.52	47.99	0.737
Interacciones de 3 términos	1	4.68	4.68	0.12	0
Vel. Alim * Arc length * Vel. Avance	1	4.68	4.68	0.12	0.737
Error	7	269.35	38.48	-	-
Total	15	4497.12	-	-	-

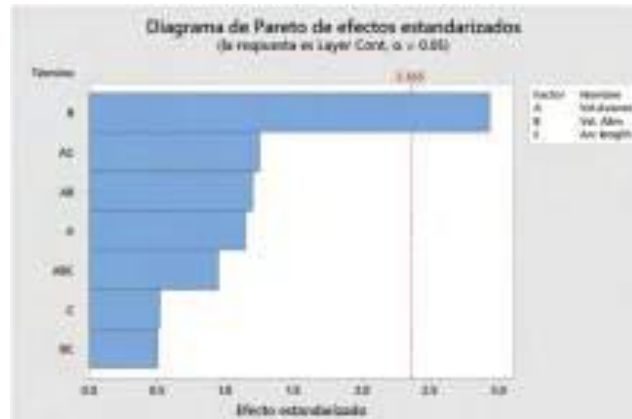


Figura 19. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para dilución del modelo factorial.

Para la respuesta del % de dilución podemos observar que el análisis arroja valores P de menos de 0.05 en Tabla 3. Para el parámetro de velocidad de avance como el de mayor influencia en la respuesta, seguido de la interacción de velocidad de alimentación y arc-length y por último la interacción de velocidad de avance y velocidad de alimentación al igual lo podemos ver con los valores F, este modelo tiene un valor de $R^2=94.01\%$ y R ajustada = 81.71 lo cual es un buen ajuste para el modelo. Para la respuesta de la relación de aspectos podemos observar para valores de P menores a 0.05 en la Tabla 4. El parámetro con mayor efecto es velocidad de alimentación, seguido de una interacción entre la velocidad de alimentación y arc-length, por último, solamente arc-length, descartando la velocidad de avance como un parámetro que

influya sobre la relación de aspecto este modelo tiene un valor de $R=96.53\%$ y R ajustada = 92.57 para el modelo, esto se puede observar también en la Figura 20.

Tabla 4. ANOVA para relación de aspecto DoE (Factorial).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	8	3.9302	0.4912	24.37	0
Bloques	1	0.0849	0.0849	4.22	0.079
Lineal	3	2.8797	0.9599	47.62	0
Vel. Avance	1	0.00021	0.00021	0.11	0.754
Vel. Alim	1	2.4336	2.4336	120.74	0
Arc length	1	0.4439	0.4439	22.02	0.002
Interacciones de 2 términos	3	0.9153	0.3051	15.14	0.002
Vel. Avance * Vel. Alim	1	0.0543	0.0543	2.7	0.145
Vel. Avance * Arc length	1	0.0258	0.0258	1.28	0.295
Arc length	1	0.8351	0.8351	41.43	0
Interacciones de 2 términos	1	0.0502	0.0502	2.49	0.158
Vel. Avance * Vel. Alim	1	0.0502	0.0502	2.49	0.158
Vel. Avance * Arc length	7	0.1411	0.0201	-	-
Vel. Alim * Arc length	15	4.0713	-	-	-
Interacciones de 3 términos	8	3.9302	0.4912	24.37	0
Vel. Alim * Arc length * Vel. Avance	1	0.0849	0.0849	4.22	0.079
Error	3	2.8797	0.9599	47.62	0
Total	1	0.00021	0.00021	0.11	0.754

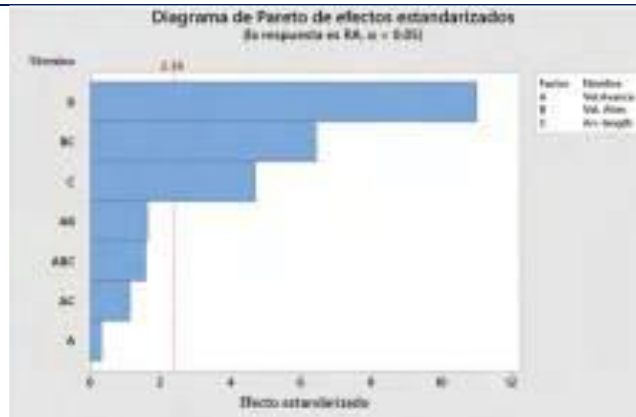


Figura 20. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para la relación de aspecto.

En cambio, a diferencia de las otras respuestas la continuidad del cordón solamente esta influenciada por un solo parámetro el cual es la velocidad de alimentación el modelo tiene un valor de $R=86.53\%$ y R ajustada = 82.57 para el modelo. Los resultados a las respuestas se calcularon con las ecuaciones 1-3. El criterio para seleccionar el cordón con la mejor morfología fue por un análisis visual de cada cordón además del calculo que se realizó con las mediciones previas del ancho de cordón, sobremonta superior e inferior y el área de dilución obtenidas en el análisis macrográfico para responder a las respuestas del diseño de experimentos que fueron la continuidad del cordón, relación de aspecto y el % de dilución en los cuales se busca maximizar la relación de aspecto ya que eso no ayuda a no tener una sobremonta excesiva, minimizar la continuidad del cordón para evitar un cordón disparejo y encontrar un cordón con

buena dilución, en base a lo registrado y los resultados se eligieron los parámetros utilizados en el cordón 8 ya que cumple con las características requeridas teniendo como parámetros en velocidad de avance (8.33 mm/s) velocidad de alimentación (240pulg/min) y un ArcLength de (3).

Tabla 5. ANOVA para Continuidad cordón (Factorial).

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	8	3.9302	0.4912	24.37	0
Bloques	1	0.0849	0.0849	4.22	0.079
Lineal	3	2.8797	0.9599	47.62	0
Vel. Avance	1	0.00021	0.00021	0.11	0.754
Vel. Alim	1	2.4336	2.4336	120.74	0
Arc length	1	0.4439	0.4439	22.02	0.002
Interacciones de 2 términos	3	0.9153	0.3051	15.14	0.002
Vel. Avance * Vel. Alim	1	0.0543	0.0543	2.7	0.145
Vel. Avance * Arc length	1	0.0258	0.0258	1.28	0.295
Arc length	1	0.8351	0.8351	41.43	0
Interacciones de 2 términos	1	0.0502	0.0502	2.49	0.158
Vel. Avance * Vel. Alim	1	0.0502	0.0502	2.49	0.158
Vel. Avance * Arc length	7	0.1411	0.0201	-	-
Vel. Alim * Arc length	15	4.0713	-	-	-
Interacciones de 3 términos	8	3.9302	0.4912	24.37	0
Vel. Alim * Arc length * Vel. Avance	1	0.0849	0.0849	4.22	0.079
Error	3	2.8797	0.9599	47.62	0
Total	1	0.00021	0.00021	0.11	0.754

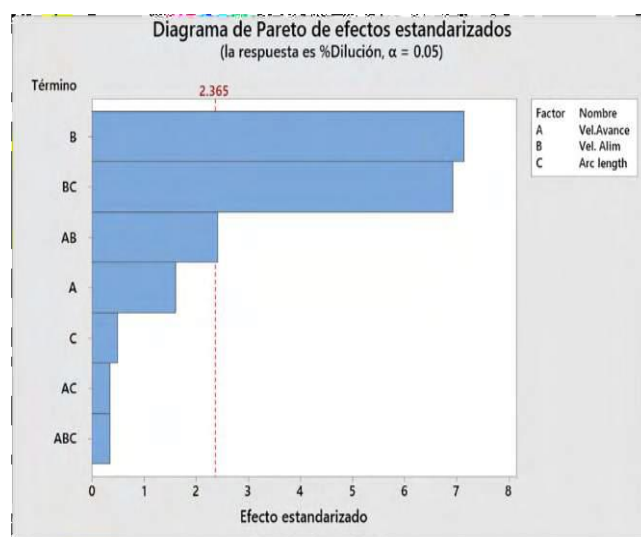


Figura 21. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados para continuidad cordón del modelo factorial.

En la Figura 23 se observa la macrografía del cordón 8 correspondiente a la sección transversal en el centro del cordón, podemos observar una dilución completa, y área completamente cubierta, así como las distancias de las sobremonta las cuales no son excesivas mostrándose las distancias, es por eso que se eligen estos parámetros para realizar los cordones a estos espesores y acero. Se observa una unión disímil debido a que a que el material de aporte es un acero inoxidable austenítico 308l y el metal base es el inoxidable

AISI 445 el cual es ferrítico es por eso por lo que se muestran zonas muy marcadas entre sí.

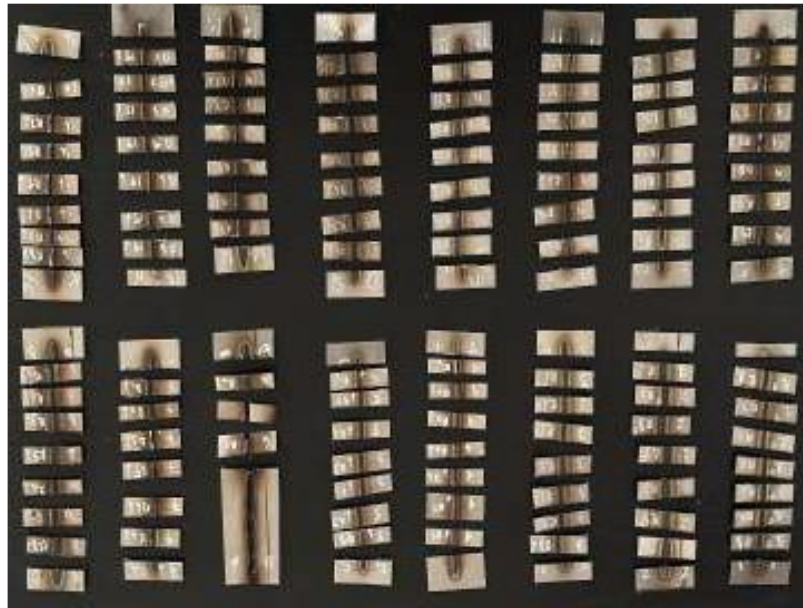


Figura 22. Cortes transversales hechos a las probetas de acero inoxidable para las respuestas.

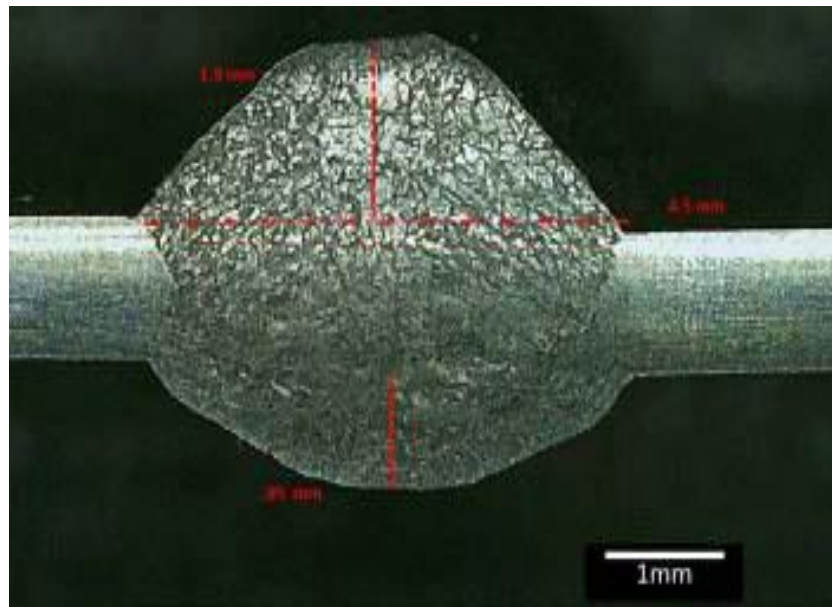


Figura 23. Análisis macrográfico de cordón 8 modo de transferencia RMD™ en AISI 445.

Tabla 6. Respuestas calculadas mediante el análisis de macrografías de cada cordón.

Cordón	Calor aporte (W/mm)	% Dilución	Continuidad del cordón	Relación de aspecto
1	98.59	2.65	0.22	1.29
2	151.35	13.54	0.12	1.56
3	111.04	4.88	0.04	1.28
4	68.82	1.72	0.1	1.19
5	106.43	4.02	0.06	1.21
6	269.58	20.26	0.25	0.9
7	137.89	30.3	0.22	1.24
8	182.02	36.1	0.49	0.94
9	116.64	29.12	0.49	0.94
10	91.35	6.43	0.04	1.38
11	87.46	42.46	0.11	0.99
12	85.83	37.93	0.61	0.92
13	158.51	11.18	0.3	1.44
14	122.51	33.51	0.3	0.9
15	64.47	12.27	0.07	1.22
16	133.79	28.24	0.22	0.94

Conclusiones

1. El parámetro sinérgico Arc-Length del modo de transferencia avanzado RMDTM tiene una influencia directa en el % de dilución y relación de aspecto.
2. El porcentaje de dilución se ve influenciado principalmente por dos parámetros y su interacción entre estos que son velocidad de alimentación y longitud de arco.
3. Respecto a la continuidad del cordón se obtuvo que solo hay un parámetro que influye, que es la velocidad de alimentación.
4. La relación de aspecto al igual que la dilución se ve influenciada por dos parámetros y su interacción entre sí que son velocidad de alimentación y longitud de arco.

Declaración de conflicto de interés

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

ORCID

Oscar Ávila  <https://orcid.org/0009-0007-9955-5493>

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

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

Referencias

- [1] Ibrahim, S. A. Mohamat, A. Amir, and A. Ghalib, “The effect of Gas Metal Arc Welding (GMAW) processes on different welding parameters,” in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 1502–1506.
<https://10.1016/j.proeng.2012.07.342>
- [2] MillerWelds LATAM, 01/12/2024. Tecnología RMD <https://millerweldslatam.com/>
- [3] D. Bandhu, S. Kumari, V. Prajapati, K. K. Saxena, and K. Abhishek, “Experimental investigation and optimization of RMDTM welding parameters for ASTM A387 grade11 steel,” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 36, no. 13, pp. 1524–1534, 2021, <https://10.1080/10426914.2020.1854472>
- [4] M. F. Demenin, “ROOT WELDING USING THE REGULATED METAL DEPOSITION TECHNOLOGY (REVIEW),” no. 1, pp. 21–29, 2023, <https://10.34831/EP.2023.1098.1.004>
- [5] D. Bandhu *et al.*, “Effect of Metal-Cored Filler Wire on Surface Morphology and Micro-Hardness of Regulated Metal Deposition Welded ASTM A387-Gr.11-Cl.2 Steel Plates,” *Materials*, vol. 15, no. 19, Oct. 2022, <https://10.3390/ma15196661>