

Análisis de Velocidad de Soldadura Robótica en Proceso MIG para Acero 1045 AISI

Lic. Carlos Eduardo Hernández Acero¹, M.C. Ramón Alberto Luque Morales² y
M.C. Carlos Anaya Eredias³

Resumen— Esta investigación busca el desarrollo de un modelo matemático que permita el cálculo de la penetración de soldadura en piezas unidas con proceso *Metal Inert Gas* (MIG). El objetivo se centra en buscar la combinación de valores paramétricos para la velocidad de soldadura, el voltaje y la corriente mediante la aplicación de un diseño experimental, que pueda lograr una penetración de soldadura aceptable para la unión. El modelo de superficie de respuesta aplicado fue un diseño de experimentos 2^k con diseño central compuesto, y posteriormente el modelo se utilizó para estimar la velocidad de soldadura. Este diseño de experimentos se ejecutó por medio del programa Minitab versión 17. Teniendo el modelo matemático generado, se puede calcular la velocidad de soldadura necesaria para el cálculo de tiempo de ciclo y utilizar los parámetros definidos de corriente y voltaje para comenzar la programación y reducir el tiempo de arranque automático.

Palabras clave— Penetración, modelo de superficie de respuesta, diseño de experimento 2^k , diseño central compuesto, tiempo de ciclo, velocidad de soldadura robótica.

Introducción

Esta investigación se centra en la definición de un modelo matemático que ayude a determinar los parámetros a utilizar en los procesos de soldadura *Metal Inert Gas* (MIG) robotizada con base en la penetración de soldadura requerida en la unión a tope de dos piezas.

Uno de los problemas que han enfrentado las empresas con procesos de manufactura mediante procesos de soldadura MIG robotizada es el control de los parámetros de entrada para obtener una unión correcta con la calidad de soldadura requerida. Se requieren métodos de prueba y error que consumen tiempo. Las uniones con soldaduras son examinadas en probetas para conocer si la unión cumple el requerimiento o no. Finalmente, los parámetros del proceso de soldadura pueden ser elegidos para producir una unión de soldadura que cumpla la calidad de unión requerida (Mahesh, 2017).

La soldadura MIG robotizada constituye un proceso automático en el cual un alambre consumible, y un gas de protección, son alimentados a través de una antorcha de soldadura (Hooda et al., 2012). Combina ciertas variables en su aplicación, como gases protectores mezclados, y parámetros el voltaje, la corriente y la velocidad de la soldadura. La presente investigación busca la estimación del efecto resultante en la modificación de estos tres parámetros para la penetración de soldadura en piezas de Acero 1045. El estudio parte de la experimentación con soldadura MIG robotizada y placa de acero 1045, para verificar si es factible desarrollar un modelo matemático, con el cual partiendo de parámetros previsibles del proceso (corriente y voltaje) y la penetración de soldadura requerida en una pieza para cordones planos y horizontales, se pueda definir la velocidad de avance en un proceso de soldadura robótica. Esto permitirá tener beneficios tangibles, como la fiabilidad durante los cálculos de tiempo de ciclo usando una velocidad basada en la obtención por medio del modelo matemático para la conceptualización de la celda y también poder establecer un punto de partida en la programación del proceso de soldadura MIG robotizada.

La figura 1 muestra el perfil de una soldadura, donde podemos observar la profundidad y ancho de la penetración de la soldadura.

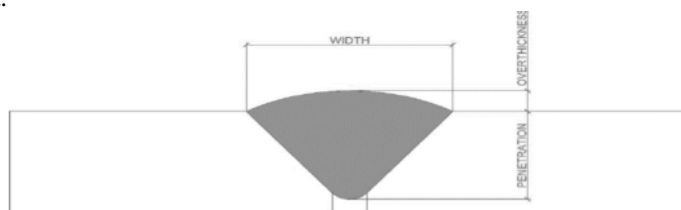


Figura 1. Geometría de un cordón de soldadura (vista transversal) (Siddharth Kumaran y Oliver Nesa Raj, 2018)

¹ El Ing. Carlos Eduardo Hernandez Acero es Estudiante de Maestría en Manufactura avanzada en el CIATEQ sede Aguascalientes, Aguascalientes, Aguascalientes. hdz.eduardo@gmail.com (autor corresponsal)

² El Maestro Ramón Alberto Luque Morales es maestro de tiempo completo en el departamento de Ingeniería Industrial en la Universidad de Sonora ramon.luque@unison.mx

³ El Maestro Carlos Anaya Eredias es maestro de tiempo completo en el departamento de Ingeniería Industrial en la Universidad de Sonora carlos.anaya@unison.mx

La penetración de soldadura, también conocida como la profundidad de fusión, es definida por la AWS (*American Welding Society*) como “la distancia en el que la fusión se extiende entre el metal base por la superficie del material derretido durante el proceso de soldadura”.

Descripción del Método

Diseño de superficie de respuesta elegido

Los modelos de superficie de respuesta son un recurso muy usado cuando se requiere estudiar la respuesta de un fenómeno bajo la influencia de un conjunto de factores (Chelladurai et al., 2020). Uno de ellos es el diseño de k factores, cada uno con dos niveles. Estos niveles pueden ser cualitativos (presencia de operadores o no, nivel alto o bajo de un factor) o cuantitativos (valores de temperatura, presión o tiempo) dependiendo del factor a estudiar. Una réplica completa de este tipo de estudios requiere $2 \times 2 \times 2 = 2^k$ observaciones y se llama diseño factorial 2^k .

El diseño elegido es el factorial tipo 2^3 , teniendo los tres factores, A, B y C como parámetros de interés. La representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos es mediante un cubo como se muestra en la figura 2.

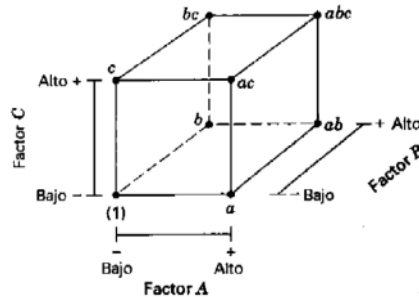


Figura 2. Representación geométrica del diseño factorial 2^3 (Montgomery, 2004).

Utilizando la notación “+” y “-” para representar los niveles altos y bajos de los factores, las 8 corridas se enlistan en la matriz de diseño, mostradas en el cuadro 1. Las combinaciones de los tratamientos en el orden estándar se escriben como (1), a, b, ab, c, ac, bc, y abc. Estos símbolos también representan el total de las “n” observaciones hechas con esa combinación de tratamientos particular.

Corrida	A	B	C	Etiqueta	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Cuadro 1. Matriz de diseño para un experimento 2^3 . (Montgomery, 2004)

El diseño 2^3 tiene $14 + n_c$ corridas (generalmente $3 \leq n_c \leq 5$), y es un diseño eficiente para ajustar el modelo de segundo orden con 10 parámetros en $k = 3$ factores. Finalmente, este tipo de diseños compuestos centrales se usan ampliamente para construir modelos de superficies de respuesta de segundo orden. Considera también los puntos axiales x_1, x_2 y x_3 como parte del análisis, donde se tiene una distancia α del centro del cubo al punto axial. Esto ayudará a determinar si el diseño es rotativo.

La respuesta que se estará buscando es el porcentaje de penetración de la soldadura en la pieza (basándonos en la distancia de la superficie de la pieza a la profundidad de la penetración), considerando los tres factores que interactúan en el resultado: voltaje, corriente y velocidad de avance del robot, la cual se entenderá como velocidad de avance. Como punto inicial se establecen los valores máximos y mínimos, y se definen los puntos axiales del diseño, a una distancia α del 0, para garantizar la rotabilidad del mismo. Para ello utilizamos un α de acuerdo con el valor de número de puntos factoriales. Siendo que los puntos factoriales $F = 8$, con ello se define la distancia del centro al punto axial determinado con un valor de $\alpha = 1.681$.

Para determinar los valores estimados de voltaje, corriente y velocidad de avance, en base a la información disponible para la ecuación donde vemos una relación entre las variables naturales (factores) y la variable codificada (máximos y mínimos, -1, +1), la variable codificada toma el valor del punto axial en la distancia α y $-\alpha$, se realiza el despeje de Vp para obtener el valor del factor en $\alpha = 1.681$.

Para el caso del análisis del diseño de experimento por medio de diseño central compuesto se aplican los valores máximos y mínimos de voltaje mostrados en el cuadro 4 para las 3 variables independientes. En el cuadro 2 en la segunda columna se hace referencia de las corridas como se organizaron de manera aleatoria en el software Minitab 17.1 para el experimento los valores de los parámetros de voltaje, corriente y velocidad de avance. Las corridas con el orden aleatorio se ejecutaron consecutivamente una después de otra para exponerlas a los mismos parámetros ambientales, 23°C de temperatura y 13% de humedad. El equipo utilizado en el proceso fue monitoreado y habilitado para ejecutar las corridas de manera correcta.

Orden estándar	Orden de corrida	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de avance (cm/min)
1	1	18	150	40
19	2	21.5	275	70
2	3	25	150	40
4	4	25	400	40
7	5	18	400	100
5	6	18	150	100
16	7	12.5	275	70
10	8	27.3863	275	70
18	9	21.5	275	70
13	10	21.5	275	19.546
11	11	21.5	64.776	70
15	12	21.5	275	70
17	13	21.5	275	70
9	14	15.6137	275	70
20	15	21.5	275	70
6	16	25	150	100
3	17	18	400	40
14	18	21.5	275	120.454
8	19	25	400	100
12	20	21.5	485.224	70

Cuadro 2. Orden de corridas aleatorias con los valores de los parámetros requeridos para el experimento.

Las piezas con unión soldada se marcaron en cada corrida, se clasificaron y enviaron al laboratorio de medición, para la obtención de la medición de la penetración por medio de microscopio. En la figura 3 se muestran los diferentes grosores de los cordones de soldadura realizados, Las probetas se formaron con dos placas de acero AISI 1045, de ½ pulgada de espesor, 3 pulgadas de grosor y 4 pulgadas de longitud, unidas por medio de un cordón de soldadura a lo largo de las probetas.

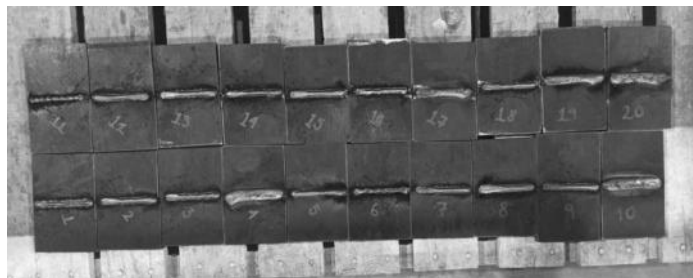


Figura 3. Piezas con soldadura aplicada según parámetros establecidos en la corrida aleatoria.

Método de análisis

El procedimiento de las pruebas de medición consiste en el corte de probetas a la mitad de la unión soldada). Para facilitar el estudio los cortes se realizaron en un punto central aproximado de la unión. Posteriormente se realiza la preparación de la superficie. A la pieza se le realiza un pulido manual por medio de lija para quitar imperfecciones del corte y posteriormente se limpia para evitar contaminación por rebaba o polvo del proceso de pulido. Finalmente se realiza un ataque químico con reactivo nital al 2%. En la unión soldada, mostrada en la figura 4, se aprecia el metal base de las dos partes unidas, la unión a tope, la zona de fusión compuesta por el cordón de soldadura dentro de la superficie del metal base (penetración). También se muestra el refuerzo (la cresta del cordón de soldadura por encima del material base) y la zona de afectación térmica (ZAT), la cual presenta una transición de microestructura, debido al nivel de temperatura alcanzada por la combinación de parámetros que causan el aporte térmico a la pieza durante el proceso de soldadura.

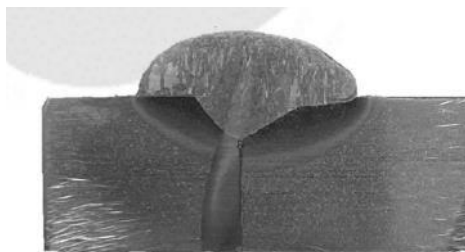


Figura 4. Resultado pieza pulida y ataque químico.

Por último, se toma la imagen con microscopio digital DIGIMICRO 200X ZOOMING PRO1002652 USB LUZEREN. Cada una de las mediciones realizadas en las probetas preparadas y cortadas se enlista en el cuadro 3. Los valores referenciales muestran los valores del refuerzo, el grosor del cordón y finalmente la penetración del material de aporte en el material base (columna penetración). Estos valores de penetración se recopilieron y ordenaron según el orden aleatorio de valores preestablecidos en el experimento generado:

Orden estándar	Orden de corrida	Voltaje	Corriente	Velocidad de avance de robot	Penetración
1	1	18	150	40	2
19	2	21.5	275	70	3.5
2	3	25	150	40	2
4	4	25	400	40	6
7	5	18	400	100	5
5	6	18	150	100	1
16	7	12.5	275	70	4
10	8	27.3863	275	70	4
18	9	21.5	275	70	3
13	10	21.5	275	19.546	3
11	11	21.5	64.776	70	0.9
15	12	21.5	275	70	3
17	13	21.5	275	70	3
9	14	15.6137	275	70	2
20	15	21.5	275	70	2.8
6	16	25	150	100	1
3	17	18	400	40	4.8
14	18	21.5	275	120.454	2.5
8	19	25	400	100	5
12	20	21.5	485.224	70	6.5

Cuadro 3. Penetración resultante en el orden de las corridas.

Ingresando la columna de resultados en la base de valores previstos para el experimento, se procede a correr el diseño central compuesto en el programa Minitab 17. Para el estudio se requiere obtener una ecuación mediante análisis de varianza que incluye un modelo con una sección lineal, una sección cuadrática (que permite contemplar la presencia de curvatura en el modelo), y finalmente una sección con interacción de dos parámetros (que contemplaría si la interacción constituye un factor dominante en dicho modelo).

Como se puede observar en la figura 5, el análisis de varianza muestra un valor de prueba (*P-Value*) de 0.000 para la parte lineal, lo cual indica un buen resultado del modelo de regresión para esta sección. No obstante, para la parte cuadrática, el valor de prueba muestra un valor de 0.280. Indica que los estimadores de los coeficientes encontrados no cumplen con el valor de prueba mínimo requerido para formar parte del modelo (considerando abajo del 5%).

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	46.9658	5.2184	23.46	0.000
Linear	3	45.4421	15.1474	68.10	0.000
Voltage	1	1.5250	1.5250	6.86	0.026
Current	1	42.9465	42.9465	193.09	0.000
Robot Welding Speed	1	0.9707	0.9707	4.36	0.063
Square	3	0.9837	0.3279	1.47	0.280
Voltage*Voltage	1	0.0162	0.0162	0.07	0.793
Current*Current	1	0.6596	0.6596	2.97	0.116
Robot Welding speed * Robot Welding Speed	1	0.2143	0.2143	0.96	0.350
2-Way Interaction	3	0.5400	0.1800	0.81	0.517
Voltage*Current	1	0.1800	0.1800	0.81	0.389
Voltage*Robot Welding Speed	1	0.1800	0.1800	0.81	0.389
Current*Robot Welding Speed	1	0.1800	0.1800	0.81	0.389
Error	10	2.2242	0.2224		
Lack-of-Fit	5	1.2159	0.2432	1.21	0.421
Pure Error	5	1.0083	0.2017		
Total	19	49.1900			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.471616	95.48%	91.41%	77.71%

Figura 5. Análisis de varianza en penetración vs voltaje, corriente y velocidad de avance para modelo cuadrático. (Minitab LLC, 2017)

Una vez analizado estos resultados, y teniendo en cuenta la regla de Ockham, buscando simplificar el modelo, se procede a realizar nuevamente una corrida del modelo de regresión de superficie de respuesta tomando únicamente la parte lineal y descartando también los productos mixtos (interacciones de los parámetros). Se decide dejar la parte de productos mixtos para verificar que no exista alguna afectación de la parte cuadrática del modelo (ahora descartada) a la parte de la interacción. Al revisar los valores de prueba para los parámetros de la parte lineal, se muestra que no tiene afectación que reduzca en gran cantidad el valor-P, al eliminar la parte cuadrática. También se observa que el valor de prueba para los coeficientes de la parte de productos mixtos creció al retirar la parte cuadrática. Con ello se toma la decisión de retirar la parte de la interacción al no ser valores confiables para el modelo buscado, no se rechaza la hipótesis nula para este componente del modelo de regresión obtenido con este análisis. Una vez establecido el punto a seguir, se continuó realizando la corrida del análisis estadístico solamente considerando la parte lineal del modelo, generando análisis mostrado en la figura 6.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	45.4421	15.1474	64.66	0.000
Linear	3	45.4421	15.1474	64.66	0.000
Voltage	1	1.5250	1.5250	6.51	0.021
Current	1	42.9465	42.9465	183.34	0.000
Robot Welding Speed	1	0.9707	0.9707	4.14	0.059
Error	16	3.7479	0.2342		
Lack-of-Fit	11	2.7396	0.2491	1.23	0.434
Pure Error	5	1.0083	0.2017		
Total	19	49.1900			

Model Summary			
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.483988	92.38%	90.95%	87.50%

Figura 6. Análisis de varianza en penetración vs voltaje, corriente y velocidad de avance para modelo con lineal. (Minitab LLC, 2017)

Comentarios Finales

Resumen de resultados

Con base en el análisis realizado, se tiene como resultado el modelo de regresión calculado dado por la fórmula:

$$\text{Penetración estimada} = -2.082 + (0.0955 * \text{Voltaje}) + (0.01419 * \text{Corriente}) - 0.00889 * \text{velocidad de soldadura}$$

De acuerdo con los resultados de las gráficas de residuales para el estudio de estabilidad, se muestra la gráfica de probabilidad normal, donde se esperaría que los puntos obtenidos sigan la línea recta sin patrones fuera de la línea que indiquen el no cumplimiento de la distribución normal. En la figura 7 se observan los puntos de observación que están muy cerca de la línea recta. También se muestra la gráfica de Residuales vs Ajustes, donde el resultado muestra que la varianza de los residuales es constante, ya que no muestra valores atípicos que indiquen error en la medición o eventos anormales en el experimento

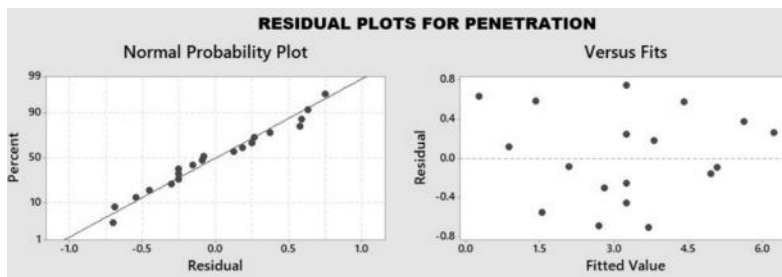


Figura 7. Gráficas de residuales. (Minitab LLC, 2017)

Resumen de resultados

Esta investigación incluye el resultado de un modelo matemático fiable, mediante el análisis de varianza, donde la combinación lineal de los parámetros bajo control es implementada mediante un modelo lineal. Este modelo nos entrega la respuesta de la penetración, y bajo la adecuación mediante el despeje de la velocidad, nos entrega una estimación fiable de la penetración requerida por el proceso. La estimación entonces ayuda en el cálculo del tiempo de ciclo del proceso y a un parámetro inicial para la programación del proceso de soldadura robótica.

Conclusiones

Los resultados muestran una buena confianza en las estimaciones de la variable de respuesta, por lo que el calculo ayuda a tener un nivel de certeza aceptable para predecir los parámetros a utilizar. Esto permite tener un concepto previo del tipo de celda que se requiere utilizar y un punto inicial en la programación de un robot para soldadura MIG según el grosor de materiales en acero 1045 AISI.

Recomendaciones

Esta investigación solo incluye el experimento realizado para piezas de acero 1045. Investigaciones adicionales pueden concentrarse en realizar el análisis de experimentos para otros tipos de metales soldables, de acuerdo con las necesidades de la industria a la que se dedica.

Referencias

- Chelladurai, S. J. S., Murugan, K., Ray, A. P., Upadhyaya, M., Narasimharaj, V. y Gnanasekaran, S. "Optimization of process parameters using response surface methodology: A review.", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 37, No. 2, pages 1301 - 1304, 2020.
- Hooda, A., Dhingra, A. et Sharma, S. "Optimization of mig welding process parameters to predict maximum yield strength in AISI 1040.", *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.* 2012, consultada por Internet el 19 de agosto de 2021, Dirección de internet: <http://www.ijmerr.com/currentissue.php>.
- Mahesh, S. "Optimization of MIG Welding Parameters for Improving Strength of Welded Joints," (*IJITR*) *International Journal Of Innovative Technology And Research*, 5(3), pags 6453-6458. 2017, consultada por Internet el 19 de agosto de 2021, Dirección de internet: <http://www.ijitr.com>.
- Minitab LLC. Minitab. Minitab, LLC. <https://www.minitab.com/es-mx/>, 2017
- Montgomery, D. C. *Diseño y análisis de experimentos* (2a Edición). Limusa Wiley, 2004.
- Siddharth Kumaran, K. et Oliver Nesa Raj, S. "Optimization of parameters involved in robotic MIG welding process based on quality responses," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 402, No. 1, 2018

Notas Biográficas

El Ing. Carlos Eduardo Hernández Acero es actualmente estudiante de maestría en el CIATEQ sede Aguascalientes. El ingeniero tiene licenciatura en Ingeniería Mecatrónica por la Universidad Politécnica de Aguascalientes (UPA), en Aguascalientes, México.

El M.C. Ramón Alberto Luque Morales, maestro de tiempo completo de la Universidad de Sonora, en el Departamento de Ingeniería Industrial, en Hermosillo, Sonora, México. El M.C. tiene maestría en Ciencias de la Ingeniería Industrial, en el Instituto Tecnológico de Hermosillo (ITH), en Hermosillo, Sonora, México.

El M.C. Carlos Anaya Eredias, maestro de tiempo completo de la Universidad de Sonora, en el Departamento de Ingeniería Industrial, en Hermosillo, Sonora, México. El M.C. tiene maestría en Ingeniería (Optimización de Sistemas), en el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), en Obregón, Sonora, México.