

Optimización de los Parámetros de Soldadura por Arco Sumergido en Acero HSLA: una Aplicación para Manufactura de Tuberías de Conducción de Hidrocarburos

Patricia Sheilla Costa¹, Felipe Arturo Reyes-Valdés¹, Rocio Saldaña-Garcés², David Salvador González-González¹, Erick Rafael Delgado-Albavera³

¹ Departamento de Soldadura, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo-Coahuila, México.

² Catedrática CONACYT, Departamento de Soldadura, Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Saltillo-Coahuila, México.

³ TUMEX Grupo ITISA, Tecámac, México.

Recibido: 04 Dez., 2015

Aprobado: 17 Dez., 2015

E-mails: pcosta@comimsa.com (PSC),
areyes@comimsa.com (FAR-V),
rocio.saldana@comimsa.com (RS-G),
davidgonzalez@comimsa.com (DSG-G),
erdelgado@itisa.com.mx (ERD-A)

Resumen: El acero HSLA (High Strength Low Alloy) API 5L X70 es utilizado para fabricación de tuberías para transporte de hidrocarburos. La construcción de tuberías de este material involucra alta cantidad de soldadura, donde los parámetros empleados influyen directamente en las estructuras metalúrgicas y en las propiedades mecánicas del mismo cuando soldado. Así, para estudiar el impacto de los parámetros de soldadura por arco sumergido en la resistencia mecánica y dureza de la Zona Afectada por el Calor (ZAC), fue llevado a cabo un diseño central compuesto que totalizó 17 pruebas. Las variables de entrada fueron corriente, voltaje y velocidad de avance; como variables de salida se consideró resistencia a la tensión y dureza Vickers de la ZAC. Para tal estudio fue utilizado el proceso de soldadura por arco sumergido, pruebas de tensión y pruebas de dureza Vickers. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta para el modelado y la optimización fue realizada utilizando algoritmos genéticos y la gráfica de frente de Pareto. Fueron obtenidas 16 combinaciones de parámetros con la optimización, de las cuales fue escogida una para validar los modelos. Con los resultados fue posible establecer modelos matemáticos empíricos satisfactorios para las variables de respuesta.

Palabras-clave: Metodología de superficie de respuesta; Proceso SAW; Acero HSLA.

Optimization of Welding Parameters in HSLA Steel Using SAW Process: a Pipeline Manufacturing Approach

Abstract: The HSLA steel API 5L X70 is used to manufacture pipes for transporting hydrocarbons. The construction of pipe of this material involves high amount of welding, where the parameters used affect directly in the metallurgical structure and in the mechanical properties thereof when welded. Thus, to study the impact of the parameters of the submerged arc welding in mechanical strength and hardness of the heat affected zone (HAZ), it was held a central composite design which totaled 17 tests. The input variables were current, voltage and travel speed; as output variables was considered tensile strength and Vickers hardness of the HAZ. For this study it was used the SAW process (Submerged Arc Welding), tensile testing and Vickers hardness testing. The response surface methodology was used for modeling and the optimization was done using genetic algorithms and Pareto front graph. Sixteen combinations of parameters were obtained with the optimization, of which one was chosen to validate the models. With the results it was possible to establish satisfactory empirical mathematical models for the response variables.

Key-words: Response surface methodology; SAW process; HSLA steel.

1. Introducción

La soldadura por arco sumergido (Submerged Arc Welding - SAW) es un proceso en el cual la unión entre las piezas se realiza debido al calentamiento y la fusión de éstas por un arco eléctrico que es promovido con un electrodo desnudo que entra en contacto con la pieza a soldar. El arco eléctrico se sumerge en una capa de fundente que protege la región de soldadura de la contaminación por el ambiente, como puede ser visualizado en la Figura 1. En general, este proceso proporciona soldaduras de alta calidad, altas tasas de deposición, penetración profunda y facilidad de automatización, haciendo que



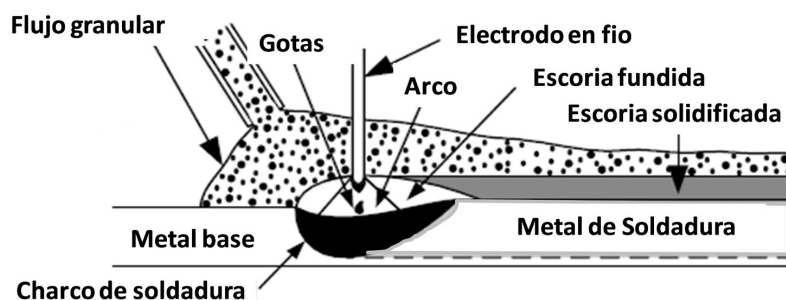


Figura 1. Soldadura por arco sumergido. Área de soldadura ampliada. Adaptación de Kou [1].

sea ampliamente utilizado en la industria que necesita producir a gran escala, como es el caso de las plantas de fabricación de tuberías para el transporte de hidrocarburos [2].

En la construcción de ductos terrestres son utilizados tubos con elevada resistencia mecánica y grandes diámetros [3]. El Instituto Americano del Petróleo (API – American Petroleum Institute) especifica la fabricación de las tuberías para ductos a través de la norma API 5L [4], en la cual los aceros son clasificados de acuerdo a su límite de cedencia, que en el caso del acero API 5L X70 es de 70000 psi.

El acero API 5L X70 es clasificado como un acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA – High Strength Low Alloy) que tiene un balance de alta resistencia mecánica y buena tenacidad. Esas propiedades pueden ser alteradas por ciclos térmicos durante las operaciones de soldadura, generando baja tenacidad en la ZAC (Zona Afecta por el Calor). Los elevados rangos de enfriamiento, el contenido de hidrógeno en el metal de aporte y los elevados niveles de esfuerzos residuales favorecen la formación de grietas. Además, el enfriamiento acelerado afecta la microestructura en la ZAC y también puede aumentar la dureza promoviendo microestructuras frágiles en esta región [5]. La velocidad de enfriamiento durante la soldadura puede ser controlada utilizando parámetros de proceso adecuados.

De acuerdo a tales consideraciones, el presente trabajo tiene como objetivo la optimización de los parámetros del proceso de soldadura por arco sumergido de forma que se pueda obtener una unión soldada con resistencia a la tensión y dureza de la ZAC adecuadas.

Como la optimización de esta investigación involucra dos variables respuestas (resistencia a la tensión y dureza) y tres variables de entrada (corriente, voltaje y velocidad de avance) es necesario optimizar simultáneamente las dos respuestas, dando como resultado una combinación de los parámetros de entrada [6] y por lo tanto se trata de un proceso multiobjetivo.

Entre las técnicas de optimización existentes en la literatura, el algoritmo genético se muestra adecuado para este tipo de problema, pero se necesita de funciones objetivos entre los parámetros de entrada y las variables respuesta [6]. Estas funciones objetivos pueden ser obtenidas con la metodología superficie de respuesta (MSR) que es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas en el modelado y en el análisis de problemas donde una respuesta de interés es influenciada por diferentes variables de entrada [7]. Cabe mencionar que la MSR ha sido utilizada con éxito en la literatura para el modelado y análisis de los procesos de soldadura [6,8,9].

2. Metodología

La estrategia utilizada para la optimización de los parámetros de soldadura en el acero API 5L X70 fue dividida en dos etapas. En la primera se realizó el planeamiento de los experimentos, procedimiento experimental y modelado matemático utilizando la metodología de superficie de respuesta para obtener las funciones objetivos. En la segunda etapa, con las funciones objetivos definidas se realizó la optimización multiobjetivo utilizando el algoritmo genético y la gráfica de frente de Pareto.

2.1. Planeación de los experimentos

Los parámetros de soldadura utilizados fueron corriente (A), voltaje (V) y velocidad de avance (Va). Después de definir los niveles de cada parámetro, la secuencia de los experimentos fue basada en un diseño central compuesto con tres parámetros (k) utilizando dos niveles ($2^k = 2^3 = 8$), ocho puntos axiales ($2k = 6$) y tres puntos centrales, resultando 17 experimentos en total. Cabe mencionar que el valor de α (distancia entre los puntos centrales y los puntos axiales) fue de 1.682.

Para la definición de los niveles de los parámetros de entrada, además de pruebas preliminares y una visita industrial en una planta de fabricación de tuberías para recopilar informaciones al respecto de los parámetros de proceso, se realizó revisión de las normas AWS A5.17 [10] y AWS A5.23 [11], que especifican electrodos para la soldadura con arco sumergido. Cabe destacar que en las pruebas preliminares se verificó que como se trataba de soldadura en un bisel doble V no simétrico (Figura 2), los parámetros de soldadura del bisel interior deberían ser diferentes del bisel exterior. Los biseles son así llamados porque simulan las condiciones de la soldadura de tuberías. La Tabla 1 presenta los parámetros y sus respectivos niveles. Las respuestas de interés fueron resistencia a la tensión (RT) y dureza Vickers en la ZAC (HVZAC) que representan características de calidad de la unión soldada.

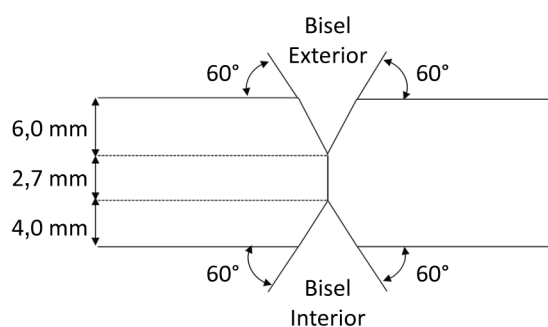


Figura 2. Geometría del bisel utilizado en las soldaduras.

Tabla 1. Niveles de los parámetros de proceso.

Parámetro de Proceso	Notación	Unidad de medición	Niveles bisel interior		Niveles bisel exterior	
			-1	1	-1	1
Amperaje	A	A	550	650	650	800
Voltaje	V	V	29	33	29	33
Velocidad de avance	Va	IPM*	27	35	27	35

*IPM: Inches Per Minute (pulgadas por minuto).

2.2. Procedimiento experimental

Después de la definición del diseño de experimento se llevó a cabo la ejecución del mismo. El equipo de soldadura utilizado fue una máquina de soldadura para arco sumergido de la marca Miller y controlador modelo HDC1500DX que permite que el proceso sea semiautomático. El metal base utilizado fue el acero API 5L X70, en forma de placas de dimensiones $380 \times 304 \times 12.7$ mm. El metal de aporte utilizado fue ELECTROMAT-70 de 5/32" (4.0mm) de diámetro y el fundente utilizado fue LINCOLNWELD 761. La Tabla 2 presenta la composición química del metal de aporte y metal base realizada por espectrometría de emisión por chispa.

Tabla 2. Composición química del metal base y metal de aporte en porcentaje en peso (%e.p).

Muestra	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Nb	V	Fe
Metal base	0,085	0,289	1,480	0,013	<0,009	0,191	0,223	<0,051	0,032	<0,010	<0,031	0,070	0,051	Bal
Metal de aporte	0,074	0,499	1,503	0,016	<0,009	0,140	0,150	0,078	<0,026	<0,046	<0,031	0,045	0,034	Bal

Bal. = balance.

Posterior a la soldadura, los cupones de prueba (Figura 3a) fueron cortados para preparar pruebas de tensión y medición de dureza Vickers en la ZAC. Los cupones para las pruebas de tensión fueron maquinados bajo el código ASME sección IX [12] (Figura 3b) y el ensayo fue realizado en el equipo Tinius Olsen H300KU bajo la norma ASTM E8 [13] utilizando velocidad de aplicación de carga de 0.1 pulgadas/minuto. Para las pruebas de dureza, las muestras fueran preparadas utilizando las técnicas de preparación metalográfica convencionales y atacadas con Nital al 2%. Los perfiles de dureza (Figura 4) fueron realizados en el equipo Wilson Hardness - Tukon 2500, utilizando cargas de 10kg aplicadas durante 10 segundos.

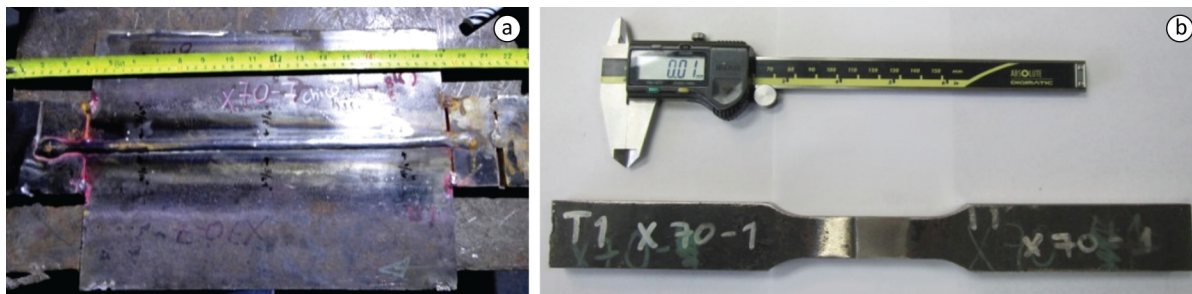


Figura 3. Cupón de prueba soldado (a) y muestra para prueba de tensión (b).

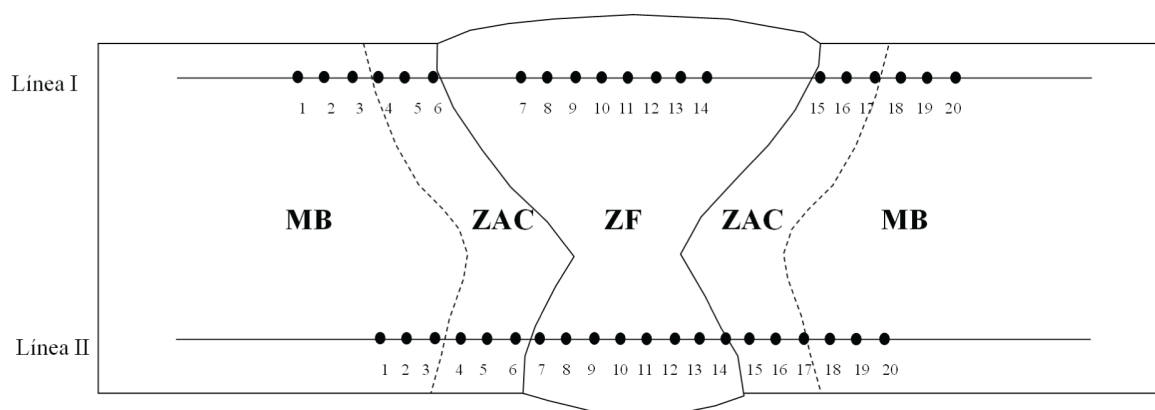


Figura 4. Perfil de medición de dureza en las muestras analizadas.

Después de las mediciones de las variables respuestas de interés, fue posible construir la matriz experimental que fue utilizada como fuente de datos para la estimación de los modelos. La matriz es presentada en la Tabla 3.

Con la matriz de experimentos fue posible obtener los modelos empíricos utilizando la metodología superficie de respuesta. Para realizar los análisis para el modelado fue utilizado el software MINITAB® y para optimizar los parámetros de soldadura con enfoque multiobjetivo, fue utilizado el toolbox de optimización de MATLAB®, el cual hace uso de un algoritmo genético.

Con los parámetros optimizados el siguiente paso fue validar los modelos obtenidos realizando la soldadura por arco sumergido en dos cupones de prueba.

3. Resultados y Discusión

3.1. Modelado de las funciones objetivo

En una superficie de respuesta, la función polinomial de segundo orden que relaciona una variable respuesta (y) con las variables de entrada (k) puede ser descrita por la Ecuación 1 [7].

Tabla 3. Matriz con los datos de las variables de entrada y de salida.

Cupón	BISEL INTERIOR					BISEL EXTERIOR				
	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (IPM)	Resistencia a la tensión (MPa)	Dureza en la ZAC (HV)	Amperaje (A)	Voltaje (V)	Velocidad de avance (IPM)	Resistencia a la tensión (MPa)	Dureza en la ZAC (HV)
X70-1	550	29	35	697	227	800	33	27	697	215
X70-2	600	31	38	677	234	725	31	24	677	212
X70-3	516	31	31	680	235	800	29	27	680	221
X70-4	550	33	35	555	232	851	31	31	555	219
X70-5	600	28	31	728	236	725	34	31	728	215
X70-6	650	29	35	714	218	650	33	27	714	229
X70-7	550	29	27	702	231	800	33	35	702	219
X70-8	600	31	31	697	229	725	31	31	697	212
X70-9	600	31	31	698	222	725	31	31	698	218
X70-10	600	31	31	702	221	725	31	31	702	218
X70-11	650	33	35	690	224	650	29	27	690	218
X70-12	600	34	31	636	224	800	29	35	636	221
X70-13	550	33	27	711	221	725	28	31	711	223
X70-14	684	31	31	695	211	650	33	35	695	221
X70-15	650	29	27	714	215	599	31	31	714	224
X70-16	600	31	24	707	214	725	31	38	707	222
X70-17	650	33	27	720	218	650	29	35	720	228

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

Donde:

y: respuesta de interés;

x_i : variables de entrada;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$: coeficientes que serán estimados;

k: número de variables de entrada consideradas.

En este trabajo son estudiados los efectos de tres parámetros de proceso en dos variables de salida, por lo tanto a partir de la Ecuación 1, los modelos pueden ser descritos tal como indica la Ecuación 2.

$$y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 V + \beta_3 Va + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} V^2 + \beta_{33} Va^2 + \beta_{12} AV + \beta_{13} AVa + \beta_{23} VVa \quad (2)$$

Para desarrollar los modelos, que relacionan las variables de entrada (corriente, voltaje y amperaje) con las variables de salida (resistencia a la tensión y dureza en la ZAC) en los dos biselés, fue utilizado el software MINITAB® que por el método de los mínimos cuadrados calcula los coeficientes para el modelo de la Ecuación 2.

Después de estimar los coeficientes, fue necesario verificar si los residuos cumplen con los supuestos de normalidad, que de acuerdo a Montgomery [7] son:

- La homogeneidad de la varianza;
- Los errores deben de tener una distribución normal;
- Los errores deben de ser independientes con media cero y varianza constante.

Los supuestos de normalidad de los datos pueden ser evaluados en las gráficas de residuo que construye el software MINITAB®. Por ejemplo, en la Figura 5 son presentadas las gráficas de residuos para la resistencia a la tensión de las soldaduras realizadas en este trabajo.

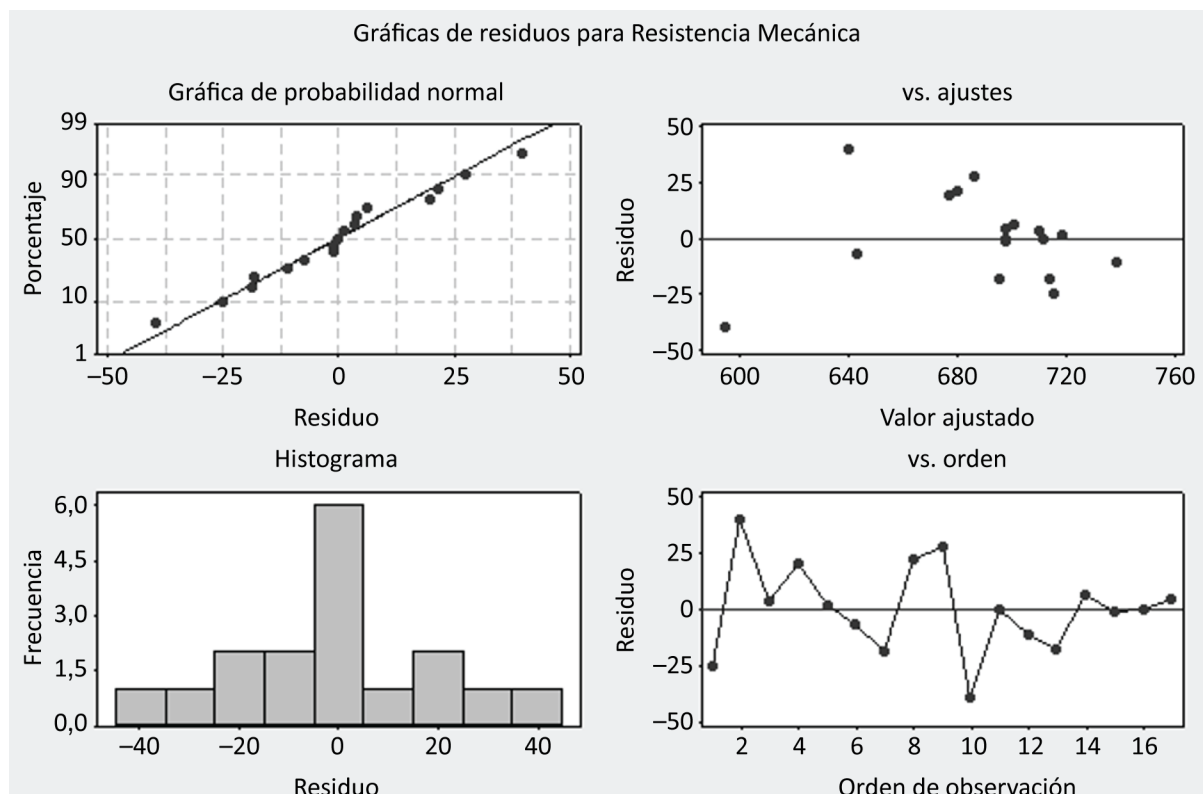


Figura 5. Graficas de análisis de los residuos para resistencia a la tensión.

Analizando la Figura 5 se verifica en la gráfica de probabilidad que los residuales presentan una distribución normal y no presentan comportamiento atípico. Los mismos análisis fueron realizados para la dureza en la ZAC obteniendo para los residuos el mismo comportamiento presentado por los residuos de la resistencia a la tensión.

Además del análisis de los residuales fue necesario verificar si las respuestas (RT y HVZAC) estaban correlacionadas haciendo un análisis de correlación de Pearson donde los resultados se presentan en la Tabla 4. Este análisis de correlación se realizó con el fin de establecer se sería necesario un modelo multivariado o se los modelos podrían ser considerados por separado.

Tabla 4. Correlación de Pearson para dureza en la ZAC y resistencia a la tensión.

Bisel	Valor P
Interior	0,198
exterior	0,614

De acuerdo a los valores de P de las correlaciones se puede decir con 95% de confianza que los valores de dureza en la ZAC y los valores de resistencia a la tensión no están correlacionados y por lo tanto los modelos pueden ser tomados por separado. Así para cada bisel (interior y exterior) fueron obtenidos dos modelos, siendo uno para resistencia a la tensión y otro para dureza en la ZAC, totalizando cuatro modelos. Los coeficientes de los modelos fueron estimados analizando el diseño central compuesto con una superficie de respuesta en el software MINITAB®. En un primer análisis de la superficie de respuesta se obtiene un modelo cuadrático completo que después de remover las interacciones menos significativas, de forma que se aumentara el valor del coeficiente de determinación (R²), es posible obtener los coeficientes estimados para los modelos. La Tabla 5 presenta los coeficientes de determinación y los coeficientes estimados para los modelos después de remover las interacciones no significativas y las Ecuaciones 3-6 presentan los modelos que fueron utilizados como función objetivo en la optimización del proceso.

Tabla 5. Coeficientes estimados y coeficientes de correlación para los modelos cuadráticos.

Coeficientes	Bisel Interior		Bisel Exterior	
	Resistencia a la tensión	Dureza ZAC	Resistencia a la tensión	Dureza ZAC
β_0	-196,591	1074,81	2813,17	-180,984
β_1	-2,24783	-0,112244	2,72262	0,179275
β_2	76,4788	-43,5545	-196,514	13,1236
β_3	34,1269	-7,46074	0,411035	9,35773
β_{11}	-	-	-0,00362430	0,000220310
β_{22}	-	0,558716	2,41634	-
β_{33}	-	-	-	-
β_{12}	-	-	0,07000	-0,0121389
β_{13}	0,0818750	-	-	-0,00501389
β_{23}	-2,82812	0,269531	-4,25966E-16	-0,166146
R^2	77,91%	79,32%	75,52%	84,43%
R^2 ajustado	65,64%	68,98%	56,49%	72,32%

- indica que la interacción de los factores para el cálculo de la β no fue significativa.

$$RM_{interior} = -196 - (2,24783 \times A) + (76,4788 \times V) + (34,1269 \times Va) + (0,0818750 \times A \times Va) - (2,82812 \times V \times Va) \quad (3)$$

$$HVZAC_{interior} = 1074,81 - (0,112244 \times A) - (43,5545 \times V) - (7,46074 \times Va) + (0,558716 \times V^2) + (0,269531 \times V \times Va) \quad (4)$$

$$RM_{exterior} = 2813,17 + (2,72262 \times A) - (196,514 \times V) + (0,411035 \times Va) - (0,00362430 \times A^2) + (2,41634 \times V^2) + (0,07 \times A \times V) - (4,25966 \cdot 10^{-16} \times V \times Va) \quad (5)$$

$$HVZAC_{exterior} = -180,984 + (0,179275 \times A) + (13,1236 \times V) + (9,35773 \times Va) + (0,000220310 \times A^2) - (0,0121389 \times A \times V) - (0,00501389 \times A \times Va) - (0,166146 \times V \times Va) \quad (6)$$

3.2. Optimización

Las técnicas de optimización son métodos que permiten seleccionar la mejor solución de un conjunto de alternativas disponibles. El problema a optimizar es definido por una función objetivo que devuelve como resultado un valor real o un vector de valores reales. La optimización multiobjetivo es utilizada cuando se desea optimizar más de un objetivo a la vez, donde la solución es compuesta por un conjunto de elementos óptimos y generalmente se necesita de un tomador de decisiones para que seleccione una de ellas [14].

En esta investigación se buscó maximizar la resistencia a la tensión y minimizar la dureza en la ZAC de forma que se cumplan los requisitos de calidad de estas propiedades, que son exigidos en el código de fabricación de tuberías para transporte de hidrocarburos (API 5L) [4].

Las funciones objetivos utilizadas en el proceso de optimización fueron obtenidas a partir de los modelos presentados en las Ecuaciones 3-6. Como fueron utilizados dos diseños de experimentos, uno para el bisel interior y otro para el exterior, la optimización también fue realizada por separado. Los resultados de la optimización son

presentados en las gráficas de Frente de Pareto que se puede apreciar en las Figuras 6 y 7. Estas gráficas presentan el conjunto de soluciones óptimas en el espacio objetivo, donde el conjunto de soluciones considera todos los objetivos en juego. Todas las opciones presentadas en el frente de Pareto son igualmente válidas [14]. El siguiente paso es seleccionar la mejor opción para probar y validar los modelos obtenidos.

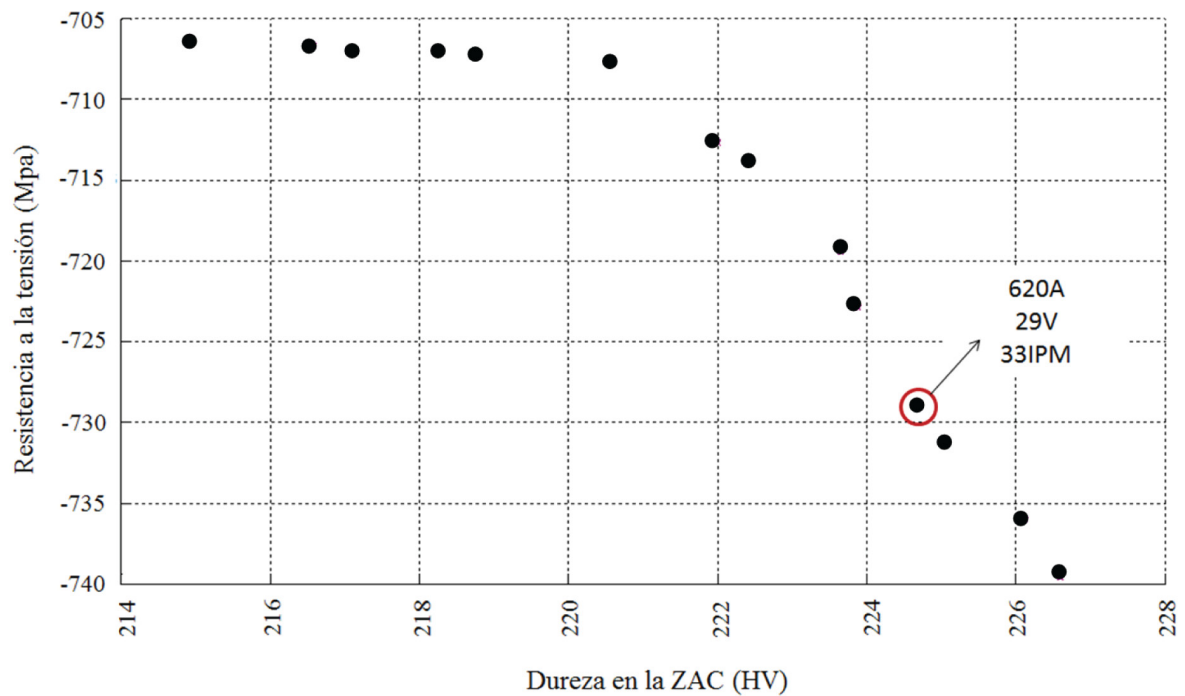


Figura 6. Frente de Pareto para el bisel interior.

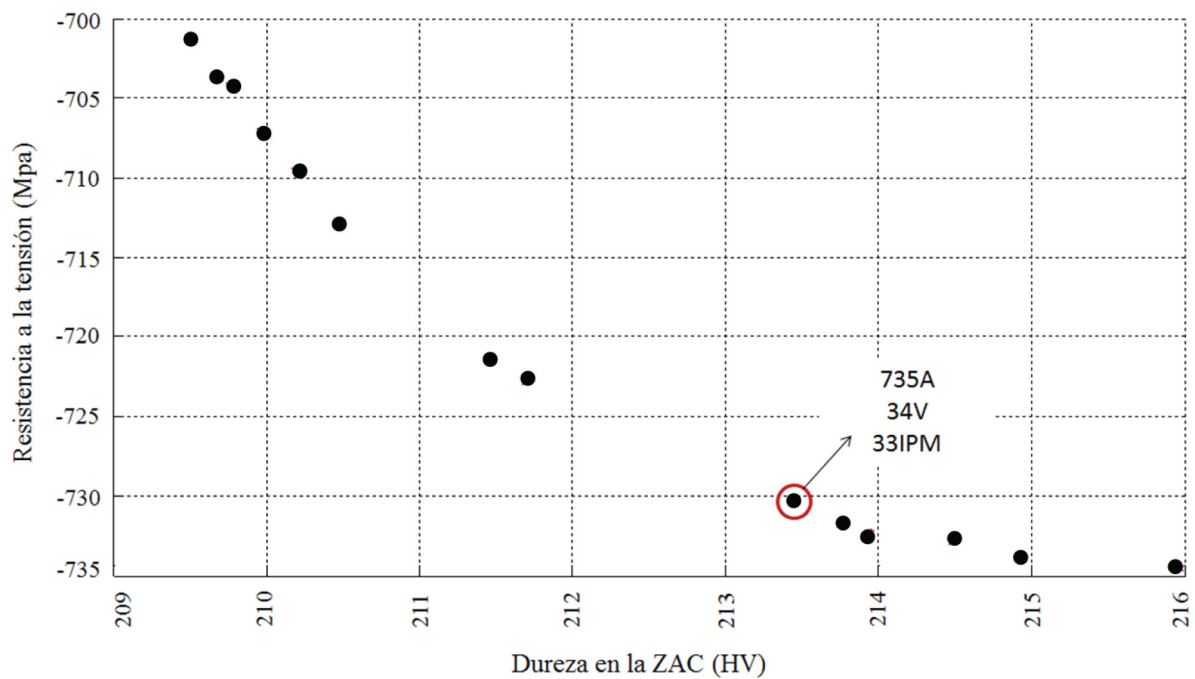


Figura 7. Frente de Pareto para el bisel exterior.

El primer criterio para seleccionar los parámetros de validación fue que la velocidad de avance de la soldadura debería de ser la misma para los dos biseseles, ya que en una planta de fabricación de tuberías la soldadura interior y exterior es realizada a la misma velocidad. Dentro de las opciones con velocidad de avance iguales, fueron seleccionados los parámetros que resultarían en menor corriente y voltaje, pues la experiencia obtenida en la soldadura de los cupones de prueba para construcción de la matriz de experimentos y revisión de la bibliografía [1] dice que un alto valor en la corriente podría provocar penetración excesiva y acabar por perforar el cupón de prueba y el voltaje más alto resulta en una geometría de cordón más ancha lo que disminuye la altura del refuerzo y el ángulo del cordón de soldadura con relación al metal base. Los parámetros de soldadura optimizados seleccionados para cada bisel pueden ser visualizados en las gráficas de las Figuras 6 y 7.

Los resultados esperados en las pruebas realizadas en los cupones de validación del modelo deben de estar dentro de un intervalo de confianza para la variable respuesta. Así, utilizando el análisis por superficie de respuesta del software MINITAB®, es posible obtener el intervalo de confianza para las variables respuestas el cual es presentado en la Tabla 6.

Tabla 6. Límites del intervalo de confianza de 95% para las variables respuestas.

Variable respuesta	Valor de Predicción	Límite inferior	Límite superior	Ajuste SE
RM _{interior}	731,2	703,8	758,6	12,3
HVZAC _{interior}	225,0	219,8	230,3	2,4
RM _{exterior}	730,2	688,6	771,8	18,4
HVZAC _{exterior}	213,5	210,3	216,7	1,4

Ajuste SE: Error estándar de ajustes.

3.3. Validación del modelo

3.3.1. Resistencia a la tensión

En la Tabla 7 son presentados los resultados de la prueba de resistencia a la tensión para los dos cupones soldados con los parámetros obtenidos en la optimización del proceso.

Los resultados de resistencia a la tensión indican que aunque la zona de fractura es en la región de la soldadura, el esfuerzo máximo es mayor que el esfuerzo máximo del metal base soldado (702MPa). Además los resultados están dentro del intervalo de confianza presentado en la Tabla 6, indicando que el modelo es satisfactorio.

Tabla 7. Resultados de resistencia a la tensión para los cupones de validación.

Muestra	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Carga Máxima (kgf)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Zona de Fractura
X70-V1	12,25	18,94	16980	718	Soldadura
X70-V2	12,37	19,00	17320	723	Soldadura

3.3.2. Microdureza Vickers

La Figura 8 presenta los perfiles de dureza para los cupones de validación (X70-V1 y X70-V2) de los modelos y en la Tabla 8 se muestra el valor promedio de los valores de dureza para las diferentes regiones de la soldadura de los biseseles interior y exterior.

Los resultados de Figura 8 la indican que la dureza presentada en la soldadura (ZAC y ZF) es menor que la del metal base. Además los valores promedios de dureza de la ZAC presentados en la Tabla 8 indican que el modelo es satisfactorio ya que, con excepción del cupón X70-V1 en la línea I (bisel exterior), los resultados están dentro del intervalo de confianza calculado para la respuesta predicha.

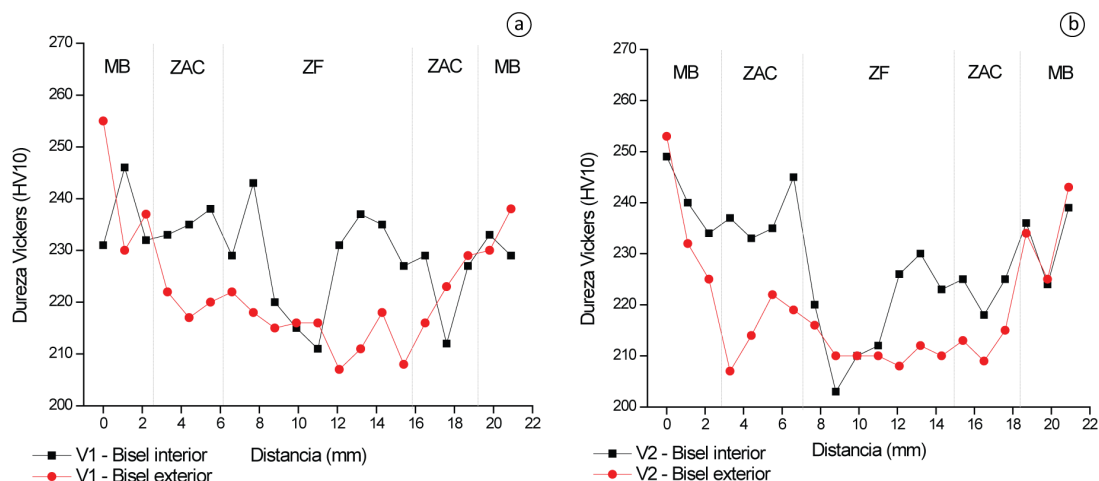


Figura 8. Perfiles de durezas en los cupones de validación de los modelos. (a) Cupón X70-V1; (b) Cupón X70-V2.

Tabla 8. Resultado promedios por región de los perfiles de dureza Vickers (HV10).

Muestra	Metal Base	ZF (línea I)	ZF (línea II)	ZAC (línea I)	ZAC (línea II)
X70-V1	235	215	225	220	229
X70-V2	237	212	218	213	230

4. Conclusiones

Los resultados presentados en esta investigación permiten concluir que:

1. La combinación de la metodología de superficie de respuesta con la optimización utilizando algoritmos genéticos es eficaz para resolver problemas con más de un objetivo, como el presentado en ésta investigación.
2. Los modelos obtenidos por la superficie de respuestas son satisfactorios, pero deben ser utilizados con cuidado debido a que presentan valores de ajustes (R^2) menores que 80%.
3. La optimización multiobjetivo utilizando algoritmos genéticos fue aplicada con suceso, pues permitió la identificación del punto óptimo.
4. Se puede decir con 95% de confianza que la soldadura por arco sumergido en el acero API 5L X70 de 12.7mm de espesor puede ser optimizada con los siguientes parámetros para bisel interior y exterior: 620A, 29V y 33IPM (bisel interior); 735A, 34V y 33IPM (bisel exterior). La combinación de esos parámetros resultan en las siguientes respuestas: 225HV10 y 731MPa (bisel interior); 213.5HV10 y 730MPa (bisel exterior).
5. Los resultados presentados en la condición optimizada estuvieron dentro de los intervalos de confianza calculados para las predicciones, indicando que los modelos utilizados son satisfactorios.
6. Como consideración para estudios futuros se sugiere aplicar los parámetros optimizados para soldar tuberías del mismo acero con la finalidad de comparar los resultados. Además, estaría interesante realizar transformaciones a las variables para obtener mejores modelos y probar otras técnicas de modelado como Redes Neuronales.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México y a la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) por la beca de apoyo durante este proyecto. Los autores también agradecen a la Asociación de Investigación Metalúrgica del Noroeste (AIMEN) de España por el soporte técnico proporcionado para parte de esta investigación.

Referencias

- [1] Kou S. *Welding metallurgy*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons; 2003.
- [2] Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG; 2009.
- [3] Soeiro JC Jr, Rocha DB, Brandi SD. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. *Soldagem & Inspeção*. 2013;18(2):176-195. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000200011>.
- [4] American Petroleum Institute – API. *API 5L 2013*. Washington; 2013. 192 p.
- [5] Li C, Wang Y, Han T, Han B, Li L. Microstructure and toughness of coarse grain heat-affected zone of domestic X70 pipeline steel during in-service welding. *Journal of Materials Science*. 2010;46(3):727-733. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-010-4803-y>.
- [6] Gomes JHF, Costa SC, Paiva AP, Balestrassi PP. Otimização de múltiplos objetivos na soldagem de revestimento de chapas de aço carbono ABNT 1020 utilizando arame tubular inoxidável austenítico. *Soldagem & Inspeção*. 2011;16(3):232-242. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242011000300005>.
- [7] Montgomery DC. *Diseño y análisis de experimentos*. 2. ed. Distrito Federal: Editorial Limusa; 2004.
- [8] Cruz C, Hiyane G, Mosquera-Artamonov JD, Salgado L JM. Optimización del proceso de soldadura GTAW en placas de Ti6Al4V. *Soldagem & Inspeção*. 2014;19(1):2-9. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242014000100002>.
- [9] Miguel V, Martínez-Conesa EJ, Segura F, Abellán E, Manjabacas MC. Optimización del proceso de soldadura GMAW de uniones a tope de la aleación AA 6063-T5 basada en la metodología de superficie de respuesta y en la geometría del cordón de soldadura. *Revista de Metalurgia*. 2012;48(5):333-350. <http://dx.doi.org/10.3989/revmetalm.1169>.
- [10] American Welding Society – AWS. *Specification for carbon steel electrodes and fluxes for submerged arc welding*. Miami: AWS; 2007. p. 48.
- [11] American Welding Society – AWS. *Specification for low-alloy steel electrodes and fluxes for submerged arc welding*. Miami: AWS; 2007. p. 48.
- [12] The American Society of Mechanical Engineers – ASME. *ASME boiler and pressure vessel code*. Washington; 2013. 416 p.
- [13] American Society for Testing and Materials – ASTM. *ASTM E8: standard test methods for tension testing of metallic materials*. West Conshohocken: ASTM; 2013. 28 p.
- [14] López J. *Optimización multi-objetivo: aplicaciones a problemas del mundo real*. 1. ed. Buenos Aires: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata; 2014. (vol. 1).