

Mechanical analysis under stress of GTAW-P robotic welded joints of Cr-Ni alloy steel

Análisis mecánico bajo tensión de uniones soldadas robotizadas GTAW-P de acero aleado al Cr-Ni

Orión Leyva-López^{*1}, Benjamín Vargas-Arista¹, Celso E. Cruz-González², and Andrés Godínez-García¹

¹Instituto Tecnológico de Tlalnepantla (ITTLa), División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Instituto Tecnológico s/n Col. La comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México, C.P. 54070.

carlocorinto84@gmail.com, {benjamin.va, andres.gg}@ttalnepantla.tecnm.mx

²Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial Estado de México,

Av. Desarrollo s/n, Parque Industrial Cuamatla, 54763 Cuautitlán Izcalli, México

ecruz@cidesi.edu.mx

Abstract

The parameters of welding current (A), arc voltage (V), preheating ($^{\circ}C$), frequency (Hz) and feed speed (mm / min) were evaluated on GTAW-P robotic welded joints in Cr-Ni alloy steel. experimental, which were characterized with uniaxial stress tests. The results showed that the best mechanical performance was observed with the combination of parameters of 200 A, preheating of 25 $^{\circ}C$, voltage of 12.7 V, frequency of 20 Hz, welding speed of 180 mm / min and average input heat (Q_{net}) of 0.523 kJ / mm, resulting in maximum tensile strength (S_u) of 1283 MPa and resistance to fracture (S_f) of 1223 MPa and rupture in the base metal. While the critical junction of low performance was obtained with the combination of 200 A, 13.1V, 25 $^{\circ}C$, 20 Hz, 480 mm / min high and low (Q_{net}) of 0.202 kJ / mm, which resulted in S_u of 191 MPa and S_f of 166 MPa was associated with the welding speed and the heat input, which led to the fracture of the weld bead.

Keywords— robotic welding, HSLA Cr-Ni steel, GTAW-P, fracture resistance.

Resumen

Se evaluaron los parámetros de corriente de soldadura (A), voltaje de soldadura (V) precalentamiento ($^{\circ}C$), frecuencia (Hz) y velocidad de avance (mm/min) sobre uniones soldadas robotizadas GTAW-P en acero aleado al Cr-Ni experimental, que se caracterizaron con pruebas de tensión uniaxial. Los resultados mostraron que el mejor desempeño mecánico se observó con la combinación de parámetros GTAW19 con 200 A, precalentamiento de 25 $^{\circ}C$, voltaje de 12.7 V, frecuencia de 20 Hz, velocidad de avance de 180 mm/min y calor de entrada (Q_{net}) medio (0.523 kJ/mm) resultando resistencia máxima a la tensión (S_u) de 1283 MPa y resistencia a la fractura (S_f) de 1223 MPa y ruptura en el metal base. Mientras que la unión crítica de bajo desempeño se obtuvo con la combinación (GTAW12) 200 A, 13.1V, 25 $^{\circ}C$, 20 Hz, velocidad de avance alta (480 mm/min) y bajo Q_{net} (0.202 kJ/mm), que resultó en S_u de 191 MPa y S_f de 166 MPa asociado a la velocidad de avance y el Q_{net} bajo, que derivó en la fractura del cordón de soldadura.

Palabras clave— soldadura robótica, acero HSLA al Cr-Ni, resistencia a la fractura.

* Autor de correspondencia

I. Introducción

El blindaje automotriz requiere uniones soldadas libres de defectos y que garantice la integridad de las piezas ensambladas para protección de los usuarios. Una de las propiedades que debe destacar es la resistencia al impacto y, por ende, a la fractura. Por lo tanto, es importante identificar, analizar las fallas y determinar su origen, que en componentes balísticos son difíciles de determinar [1]. El acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) contiene elementos aleantes que reaccionan a medios oxidantes como el agua, oxígeno, condiciones de trabajo de la pieza, exposición a ciclos térmicos y químicos [2] que acortan su vida útil o aceleran la aparición de fallas. La resistencia mecánica en aceros HSLA al Cr-Ni se encuentra en el rango de 350 a 800 MPa para resistencia máxima a la tensión y 11 % de elongación [3]. Para las uniones es común el empleo de la soldadura por arco pulsado con electrodo de tungsteno y protección de gas (GTAW) por la atmósfera de gases nobles, activos o su mezcla que resultan uniones soldadas de calidad, libre de escoria, tiende a generar menos impurezas como chisporroteo y porosidad [4].

Este proceso de soldadura mantiene las altas temperaturas por mayor tiempo y el aporte de calor resulta más elevado en comparación de otros [5]. Investigaciones sobre los efectos de la fractura por tracción en uniones soldadas en acero API-5L, con soldadura longitudinal mediante proceso de arco sumergido de doble paso envejecidas artificialmente, exhibieron en los resultados falla dúctil por morfología de microhuecos asociada a microcavidades promovidas por nanopartículas transgranulares [6]. Una investigación relacionada al análisis mecánico de uniones soldadas robotizadas en acero HSLA al Cr-Ni usando proceso CMT-P, mostró que el uso del DOE Central Compuesto es una herramienta eficaz para identificar las mejores combinaciones de parámetros de soldadura dentro de un espectro amplio de posibilidades; logrando determinar que la combinación 28 A, 16.2 V, 5 mm/s y 150°C le correspondió la resistencia máxima a la tensión de mejor desempeño (27208 N) [7]. Otro estudio significativo sobre el efecto del calor de entrada neto (Q_{net}) en uniones soldadas GTAW-P para acero HSLA al Cr-Ni con metal de aporte ERS70S-6, demostró que el Q_{net} de 0.600 kJ/mm, favorece las propiedades mecánicas en este tipo de uniones soldadas, mostrando como factor de relevancia la velocidad de avance [8].

En otro estudio donde fue utilizado brazo robótico, se analizó el efecto del movimiento de la antorcha sobre la resistencia al impacto y a la fractura en la ZAC y el cordón de soldadura en uniones de acero ASTM A36 con alambre ER70S-6. Se observó que el movimiento de la antorcha durante el proceso de soldadura en trayectoria lineal, mostró resultados deficientes, en comparación

con el movimiento circular, seguida de la sinusoidal [9]. Otra contribución sobre análisis de fractura en uniones soldadas longitudinales de acero API5L X52, realizada mediante proceso SAW, donde se analizaron las superficies de fractura, densidad, tamaño de nanopartículas y ZAC obtenidas de las muestras fracturadas en pruebas de tensión uniaxial, mostró que las superficies fracturadas del cordón de soldadura, revelaron mayor densidad de huecos con menor diámetro, en comparación de la ZAC y metal base, debido las modificaciones microestructurales en la junta soldada [10]. Como se ha documentado, la zona de la soldadura es más susceptible a la presencia de fallas por las modificaciones microestructurales sufridas, sin embargo, hay mínimas aportaciones sobre el origen de la falla por fractura bajo tensión uniaxial en uniones soldadas GTAW-P robotizadas en acero experimental HSLA al Cr-Ni orientadas a protección balística de estructuras automotrices.

El objetivo de esta investigación es el análisis mecánico del acero HSLA experimental al Cr-Ni de diferentes uniones soldadas bajo tensión, analizando la combinación de parámetros de soldadura con el fin de mejorar la soldabilidad, que contribuya a mejorar la resistencia mecánica.

II. Desarrollo experimental

II.1. Caracterización inicial

El acero HSLA al Cr-Ni en condición original fue maquinado en cupones con dimensiones de 110x110x4 mm de longitud, ancho y espesor respectivamente con corte abrasivo de chorro de agua en Water Jet Mitsubishi Electric suprema DX510 para evitar sobrecalentamiento y distorsión.

La composición química se obtuvo mediante el método de combustión directa y detección infrarroja. El % peso del acero HSLA y la varilla ER70S-6 se muestra en la Tabla 1, los elementos aleantes presentaron mayor porcentaje en acero HSLA en comparación con el alambre ER70S-6 a excepción del Mn y Si que tuvieron mayor porcentaje en el metal de aporte acorde a [11].

El carbono equivalente (C_{eq}), se calculó de acuerdo a lo establecido en la ecuación 1 [9], cuyos resultados comparativos se muestran en la Tabla 1. Los resultados de C_{eq} indicaron que alambre de soldadura y el metal base se encuentran clasificados en las zonas I y III respectivamente [12].

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Cu}{13} + \frac{Mo}{4} \quad (1)$$

Las propiedades mecánicas del metal de aporte ER70S-6 y metal base HSLA se presentan en la Tabla 2. El valor de dureza Rockwell fue mayor para el acero HSLA que para el ER70S-6 que a su vez se ve reflejado en mayor

Tabla 1: Composición química del metal de aporte ER70S-6 y acero experimental HSLA al Cr-Ni

Material	Elemento químico (% peso)								
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S	C_{eq}
ER70S-6	0.10	1.62	0.97	0.15	0.15	0.15	0.02	0.02	0.49
Acero HSLA	0.28	1.34	0.42	1.82	0.53	0.54	0.01	0.00	0.86

resistencia a la cedencia (S_0), resistencia máxima a la tensión (S_u), sin embargo, mostró un 50 % menor ductilidad que el metal de aporte. La resistencia a la fractura (S_f) fue 56.1 % mayor en el acero HSLA que el metal de aporte ER70S-6 acorde a especificación AWS A5.18 [13].

II.2. Diseño de experimentos (DOE)

La selección de variables endógenas y exógenas se basó en la literatura [7, 8, 9, 11, 14] considerando especialmente, que las uniones soldadas se harían en cupones de un acero experimental (aun no catalogado) con metal de aporte comercial [13]; reduciendo costos de la experimentación y a su vez, obtener un panorama amplio sobre el comportamiento de este tipo de uniones soldadas, con miras a optimizarlas en trabajos futuros.

Se generó una matriz experimental (DOE) de diseño central compuesto (DCC) [14] de dos niveles factoriales, con 16 puntos del cubo, 7 puntos al centro del cubo, 8 axiales, valor de $\alpha = 2$ y una réplica, utilizando el software Minitab 17 ®. Se evaluaron cuatro factores continuos: corriente de soldadura (A); precalentamiento ($^{\circ}C$); frecuencia del arco pulsado (Hz) y velocidad de avance de la antorcha (mm/min), en rangos de 200-300A, 25-150 $^{\circ}C$, 20-50 Hz y 180-480 mm/min respectivamente para cada entrada; resultando treinta y un corridas experimentales aleatorizadas de un bloque.

Por formar parte de la construcción del Q_{net} [9, 11], el voltaje de arco (V) se consideró factor categórico (12.2-14 V).

El DOE DCC valoró tres salidas: S_u (MPa); S_f (MPa) y deformación (%), con el fin de evaluar como sistema, el comportamiento mecánico de uniones soldadas robotizadas.

De las treinta y un corridas del DOE, se seleccionaron para el presente análisis las más representativas (Tabla 3), priorizando los aspectos de integridad en las uniones [4, 11], seguido del mejor desempeño mecánico. A su vez, se exponen sus inversos para determinar combinaciones de parámetros que deben ser descartados por defecto [11].

II.3. Proceso de soldadura

Para el proceso de soldadura los cupones con bisel recto, se prepararon con papel abrasivo de óxido de aluminio

de grano 180 a 120, se colocaron en posición 1G y apertura de raíz de 0.9 mm [11]. Se efectuó técnica GTAW-P (arco pulsado) con brazo robótico Fanuc Arc Mate 120ic, con ángulo de antorcha a 90 $^{\circ}$ a doble paso, electrodo de W y C_eO_2 al 2 % con diámetro de 3.2 mm. La distancia de trabajo fue de 2.5 mm con desplazamiento lineal de soldadura en dirección de empuje, aplicando metal de aporte ER70S-6 con transferencia de metal mediante corto circuito en atmósfera de gas Ar al 99.99 % con un caudal de 14 L/min de acuerdo al código AWS D1.1 [4].

II.4. Calor de entrada neto (Q_{net})

El Q_{net} fue calculado mediante ecuaciones 2 y 3 [9], cuyos valores de voltaje se encuentran entre 12.7 a 13.5 V.

$$Q_{net} = \eta Q_{arc} \quad (2)$$

Donde:

Q_{net} = calor de entrada neto (kJ/mm),

η = eficiencia de transferencia de calor 0.65 para

GTAW-P) [8].

$$Q_{arc} = (EI/S) \quad (3)$$

Donde:

Q_{arc} = energía de arco (kJ/mm),

E = voltaje de arco (V),

I = corriente de soldadura (A) y,

S = velocidad de avance (mm/min) [9].

II.5. Caracterización de uniones soldadas

La caracterización mecánica se realizó con probetas reducidas de 100 mm de longitud total, de acuerdo al estándar ASTM E-8 [15], con longitud de sección reducida de 32 mm, ancho de 6 mm y longitud calibrada de 25 mm, teniendo en el centro la unión soldada. Las pruebas de tensión uniaxial se realizaron por duplicado en una máquina universal Instron 4482 con rapidez de deformación de $3.6 \times 10^{-4} s^{-1}$ a 25 $^{\circ}C$.

III. Discusión

La resistencia mecánica de las treinta y un corridas experimentales, fueron analizadas, obteniendo resultados promedio para S_u (MPa); S_f (MPa) y deformación (%).

Tabla 2: Propiedades mecánicas del alambre ER70S-6 y acero HSLA

Material	Dureza Rockwell	S_0 0.2% (MPa)	S_u (MPa)	S_f (MPa)	Elongación (%)
ER70S6	92.6 HRB	375	745	580	22
Acero HSLA	32.6 HRC	781	1252	1033	11

Tabla 3: Seis corridas GTAW-P robotizadas extraídas de la matriz experimental DOE

Unión soldada GTAW-P	Factores continuos del DOE				Factor Categórico	Q_{net}
	Corriente de soldadura (A)	Pre calentamiento (°C)	Frecuencia (Hz)	Velocidad de avance (mm/min)	Voltaje de arco (V)	(kJ/mm)
GTAW24	300	150	20	180	13.2	0.67
GTAW23	250	87.5	35	330	13.3	0.37
GTAW19	200	25	20	180	12.7	0.52
GTAW15	200	150	20	480	13.4	0.20
GTAW13	200	150	50	480	13.5	0.20
GTAW12	200	25	20	480	13.1	0.20

El análisis estadístico arrojó resultados importantes sobre la variación de los parámetros seleccionados, para su mejora; de tal suerte que, la región experimental mostró sensibilidad (en primera instancia) a la corriente de soldadura, seguida de a velocidad de avance, así como la interacción entre ambos sobre S_u y S_f , cuya relación estadística es significativa ($P= 0.001$ y $P= 0.002$, respectivamente).

Es decir, las tendencias de relevancia de la región experimental, se encontraron en la relación Corriente de soldadura (A) y velocidad de avance mm/mm, donde, a mayor corriente y menor velocidad se obtienen mejores resultados para S_u y S_f .

En el modelo estadístico, la frecuencia del arco (Hz) no mostró relevancia, contrastantemente en la inspección visual de las piezas, se vió mejora en la cara de soldadura con aquellas a las que se había aplicado 20 Hz de frecuencia (en combinación con otros parámetros), como fue observado en la corrida identificada como GTAW19, que fue favorecida por este parámetro en conjunción a la velocidad de 180 mm/min. Por lo cual, los mejores resultados se asociaron a 20 Hz, como puede observarse en la Figura 1; esta explícita la región experimental (treinta y uno corridas), que demuestra que el pre calentamiento no es un factor que favorezca las uniones soldadas, por el contrario, en este acero particular es susceptible a fragilidad. La región sugiere que los valores ideales constantes son: temperatura ambiente y 20 (Hz).

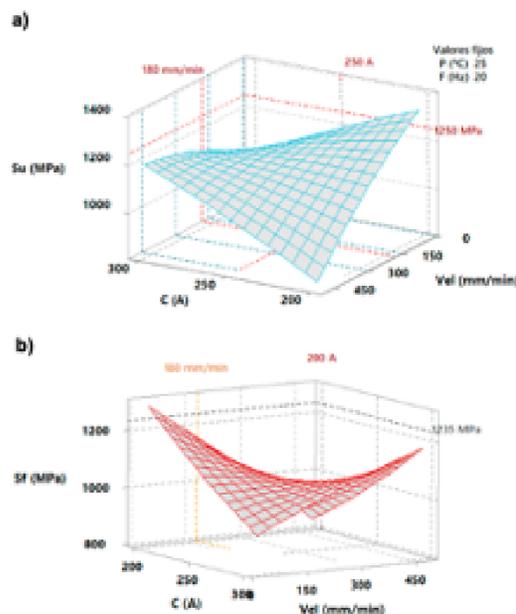


Figura 1: Regiones experimentales de 31 corridas GTAW-P robotizadas. a) Respuesta para S_u vs Corriente (A), Velocidad de avance (mm/min) y b) S_f vs Corriente (A), Velocidad de avance (mm/min), donde se muestra la tendencia de mejora con respecto a velocidades bajas

IV. Resultados

Las uniones soldadas GTAW-P robotizadas del presente análisis exponen los extremos del DOE, es decir, las de mejor y bajo desempeño, bajo las pruebas mecánicas de tensión uniaxial. Así mismo deseamos destacar (del DOE) las corridas GTAW19 (mejor desempeño) y GTAW12 como la corrida con mayor número de defectos en la penetración de soldadura, que sirve como ejemplo para explicitar las fallas que no son deseables y por tanto excluir la combinación de parámetros utilizados.

De manera comparativa, las uniones soldadas GTAW-P aquí disertadas, se muestran en curvas S-e (Figura 2) para el análisis de la resistencia máxima a la tensión (S_u), deformación (%) y resistencia a la fractura (S_f).

La unión identificada como GTAW19 es significativa, ya que, en las pruebas mecánicas mostró rendimiento superior del 2.47% en resistencia máxima a la tensión y 19.55% para la resistencia a la fractura con respecto al acero original. Es decir, el comportamiento de esta corrida mostró S_u de 1283 MPa, deformación del 12.5% y S_f de 1235 MPa, a consecuencia de la combinación de parámetros de soldadura de 200 A, 12.7 V, 25°C, 20 Hz y 180 mm/min equivalente a Q_{net} medio de 0.523 kJ/mm; [8] refirió éste valor de calor de entrada para favorecer la resistencia mecánica de uniones soldadas, así mismo el medio contenido de C del acero conjugado con el C_{eq} del metal de aporte con GTAW robotizado mantuvo por mayor tiempo aporte de calor, que en consecuencia resultó ventajosa para la difusión del C, cuya concentración representa mayor dureza y resistencia del material metálico [5], logrando penetración completa y fusión con el metal de aporte; resultando una adecuada recristalización de los metales que derivó en unión soldada íntegra, libre de defectos en la ZAC convencional y recalentada [9] que resistió fuerza de tracción uniaxial, teniendo la fractura en el metal base.

La unión GTAW24 es también una muestra de buen desempeño y combinación adecuada de parámetros para este tipo de uniones soldadas, lo anterior se sustenta en que, alcanzó S_u de 1230 MPa que significa un decremento de 1.6% con respecto al acero en condición original y S_f de 1054 MPa, aumentando la resistencia a la fractura un 2% con la unión soldada, de igual manera que la deformación cuyo incremento fue 45% en la unión soldada GTAW24. Este fenómeno se asoció a la combinación de parámetros de 300 A, 13.2 V, 150 °C, 20 Hz 180 mm/min y Q_{net} alto de 0.672 kJ/mm, comportamiento que ha sido referido por [16] para soldadura robotizada. Esta conducta se explicita gráficamente en la Figura 2. La unión soldada identificada como GTAW23 incrementó 2% S_u y 16.55% S_f (1253 MPa, 1204 MPa respectivamente) en comparación al acero aleado en condiciones originales, como consecuencia de la combinación de parámetros 250

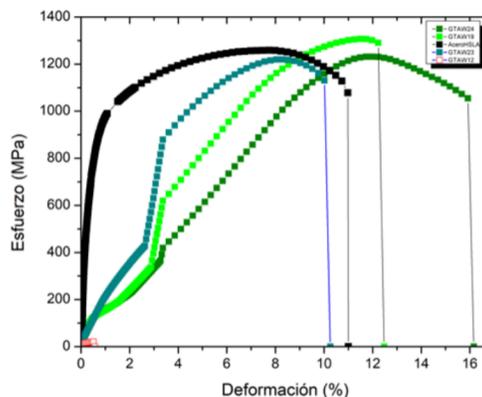


Figura 2: Curvas S-e de cuatro uniones soldadas GTAW-P y acero original, se observa incrementos y reducciones para la resistencia a la fractura con respecto al acero original

A, 13.3 V 87.5°C, 35 Hz y 330 mm/min, mismo que ha sido documentado [8] como una conjunción que favorece la penetración completa de ambos pasos de soldadura resultando adecuado comportamiento mecánico y mejora significativa en la resistencia a la fractura de las uniones soldadas.

El extremo opuesto del DOE y deficiente comportamiento mecánico referido en las líneas que anteceden, se observó en la corrida identificada como GTAW12, cuyo comportamiento mecánico es indeseable en cualquier unión soldada (S_u 191 MPa, S_f 166 MPa) [4, 11], que representan una reducción del 84.74% en S_u y 83.9% para S_f y en comparación del acero aleado sin soldadura, como se observa en Figura 2.

Los parámetros aplicados 200 A, 12.7 V, 25°C, 20 Hz, 480 mm/min y Q_{net} medio (0.202 kJ/mm), deben ser excluidas para su uso en soldadura GTAW-P en acero aleado al Cr-Ni con metal de aporte ER07S-6, para cualquier uso, toda vez que, su conjunción derivó en falta de penetración de la soldadura en ambos pasos de soldadura y afectación térmica en el metal base tanto de la ZAC convencional como de la ZAC recalentada a consecuencia la velocidad y la corriente soldadura, así como el movimiento lineal en la antorcha [9].

La corrida identificada como GTAW19 mostró la mejor resistencia a la fractura (S_f) de 1223 MPa mejorando el desempeño un 19.55%, así mismo mostró una deformación 13.6% superior al acero en condiciones originales, la combinación parámetros empleados y el Q_{net} resultante (0.523 kJ/mm) influyó de manera positiva en la unión soldada y su resistencia máxima a la tensión y a la fractura (Figura 3a), por la difusión del C en zonas con mayor concentración favoreciendo la resistencia mecánica de la unión, tal como se ha documentado [5, 9]; por lo tanto el Q_{net} y el tiempo de permanencia a alta temperatura del electrodo fue preponderante en la resistencia a la

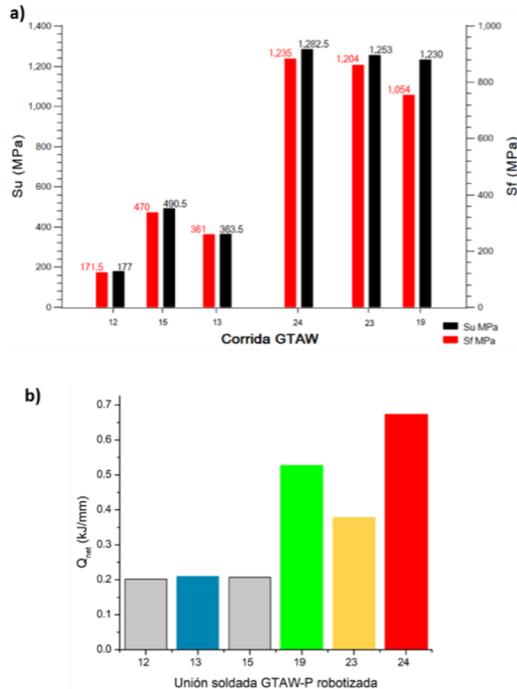


Figura 3: a) Comportamiento mecánico (S_f y S_u) de las corridas analizadas en este estudio, dónde GTAW19 predomina en como la de mejor desempeño, b) Q_{net} de las uniones soldadas disertadas

fractura.

Se observa, en comparación de GTAW23 un decremento en el S_f de 1204 MPa de 0.78% asociado al Q_{net} medio (0.374 kJ/mm) y 330 mm/min y GTAW24 con S_f de 1200 MPa, para la unión GTAW12 con Q_{net} bajo (0.202 kJ/mm) y 480 mm/min obtuvo S_f con 166 MPa resultando un deficiente desempeño mecánico; a diferencia de GTAW15 con S_f de 348 MPa y GTAW 13 con S_f de 485 MPa, resultado similar a lo reportado por [16]. Estos comportamientos pueden observarse en la Figura 3b.

Los resultados de la fractura mecánica en las seis uniones robotizadas muestran que, a mayor calor de entrada se obtiene mejor resistencia a la tensión [8, 10] como se muestra en Figura 3a, debido a la penetración adecuada de la soldadura en los cupones; como fue la unión GTAW19 que tuvo la mejor resistencia a la tensión seguido de GTAW23 y GTAW24, de lo contrario; a menor calor no hay fusión del metal como fue el caso de unión GTAW12 obteniendo un deficiente S_u y S_f . En la Figura 3b se muestra gráficamente el comportamiento de la aplicación de calor de entrada en GTAW24 con 0.672 kJ/mm, seguido de GTAW19 con 0.523 kJ/mm y GTAW23 con 0.374 kJ/mm.

Un factor del DOE que destaca su importancia es la velocidad de avance, ya que esta variable tiene impacto

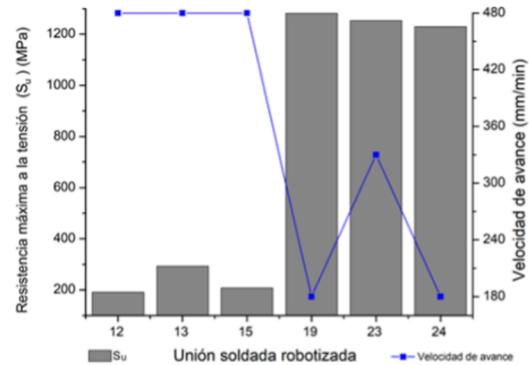


Figura 4: Relación de la velocidad de avance sobre la resistencia máxima a la tensión en seis uniones soldadas

directo sobre la S_u . Como puede observarse en la Figura 4, a mayor velocidad (480 mm/min) hay menor resistencia mecánica, derivado de la falta de penetración y fusión en la soldadura [7, 8, 17] que se ve afectada en segundo término por la trayectoria lineal de la soldadura [9].

La sensibilidad de la resistencia máxima a la tensión de las uniones soldadas disertadas, con respecto a la velocidad de avance de la antorcha, se muestra en la Figura 4, significativamente resaltan las velocidades medias y bajas. Este fenómeno ha sido reportado en estudios que guardan similitud con el metal de aporte comercial ER70S-6 [7, 8, 13].

Conjuntamente la corriente (A) y velocidad de soldadura (mm/min), tienen efectos sobre las propiedades mecánicas. Se demuestra que a mayor velocidad de soldadura (480 mm/min) y corriente baja de 200 A serán susceptibles a la fractura.

Por último destacaremos la velocidad de avance más baja 180 mm/min, resultando la ideal para garantizar uniones de calidad [4, 11, 17] y con las propiedades mecánicas deseables para la industria balística.

V. Conclusiones

Los resultados indican que al aplicar la combinación de parámetros GTAW19 (200 A, 25°C, 20 Hz y una velocidad de avance de (180 mm/min) con técnica GTAW robotizada con electrodo W y CeO₂ al 2% con distancia de trabajo 2.5 mm en posición 1G, mantiene el Q_{net} medio de 0.523 kJ/mm y la alta temperatura por el tiempo necesario para lograr penetración adecuada del metal de aporte, difundiendo el C y con ello, se beneficia las propiedades mecánicas de la unión, logrando integridad de la unión soldada y la ZAC contra las fuerzas de tracción uniaxial, mejorando 19.5% la resistencia a la fractura y aumentando la resistencia máxima a la tensión 2.4% (S_u de 1283 MPa, S_f de 1235 MPa) del acero original,

dándose fractura en el metal base.

Los valores de Q_{net} entre 0.374 kJ/mm y 0.523 kJ/mm favorecen la ductilidad de la unión soldada y el S_u .

El voltaje como factor categórico, no mostró relevancia en los resultados mecánicos evaluados.

La Frecuencia de 20 Hz demostró ser la ideal para mejorar las propiedades mecánicas evaluadas.

Es recomendable utilizar velocidad de avance de 180 mm/min para lograr una penetración adecuada de soldadura debido a que el resultado mecánico adecuado para el acero HSLA al Cr-Ni experimental con aporte comercial.

Los parámetros no recomendados a utilizar en el acero balístico son 200 A, 25 °C, 20 Hz y 480 mm/min ya que no existe fusión del metal de aporte, S_u 191 MPa, S_f 166 MPa, datos mecánicos por debajo del acero HSLA original considerados como no deseables

Agradecimientos

Agradezco a la Dra. María Elena Álvarez Buylly y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) los apoyos y beca otorgados en el transcurso de mis estudios de Posgrado. Agradezco y reconozco a la M.C.I Graciela Rosel Palacios por su trabajo y apoyo incondicional en el desarrollo de este proyecto. A la Dra. María Verónica Estrella Suárez por sus útiles consejos en esta investigación, la Mtra. Glenda Fernández Bañuelos, al M.C.I Abraham Fuentes Villagómez, y al I.F Marco Antonio Leyva por su asistencia técnica.

Referencias

- [1] S. Cimpoeru. *The Mechanical Metallurgy of Armour Steels*. Technical Report. Commonwealth of Australia, Melbourne, 2016, pág. 2.
- [2] M. S. Vazquez. *Soldabilidad de Aceros HSLA Termo galvanizados para aplicaciones automotrices*. Nuevo Leon: Universidad Autonoma de Nuevo Leon, 2004, págs. 2-6.
- [3] R. J. García. *Efecto de la potencia laser del proceso HLAW en uniones de aceros HSLA 550 sobre la microestructura y propiedades mecánicas*. Saltillo Coahuila: COMIMSA, 2019, págs. 1-107.
- [4] American Welding Society. «Structural welding code». En: *AWS D1 1* (2015), pág. 131.
- [5] Hongliang Ming. «Jianqiu Wang y En-Hou Han». En: *Comparative study of microstructure and properties of low-alloy-steel/nickel-based-alloy interfaces in dissimilar metal weld joints prepared by different GTAW methods*, *Materials Characterization* 138 (2018), págs. 186-196.
- [6] B. Vargas Arista, C. Angeles Ch?vez y A. «Albiter y J». En: *Hallen, Metalurgical investigation of the aging process on tensile fracture welded joins in pipeline steel*, *Materials Characterization* 60 (2009), págs. 1-8.
- [7] J. C. García. «Análisis microestructural y mecánico de la ZAC en uniones soldadas CMT robotizadas en acero aleado HSLA». En: *Química hoy* 10 (2020), págs. 2-5.
- [8] A. Fuentes Villagómez. «Efecto del calor de entrada sobre la microestructura y micro dureza en uniones soldadas GTAW-P robotizadas para acero HSLA Química hoy». En: *10* (2020), pág. 14.
- [9] I. Guzmán Flores y col. «Cruz Gonzalez y J». En: *Prado Villasana, Effect of Torch Weaving on the Microstructure, Tensile and Impact Resistances, and Fracture of the HAZ and Weld Bead by Robotic GMAW Process on ASTM A36 Steel Soldagem & Inspectao* 22 (2017), págs. 73-76.
- [10] B. Vargas Arista, A. Albiter y F. «García Vazquez y O». En: *Mendoza Camargo, Effect of natural aging on the microstructural regions, mechanical properties, corrosion resistance and fracture in welded joints on API5L X52 steel pipeline* *Revista de Metalurgia*. 50 (2014), págs. 2-9.
- [11] American Welding Society. *Welding Inspection Technology*. en. Miami, Florida: AWS, 2000.
- [12] B. Graville. *Cold cracking in welds in HSLA steels*. ASM, 1976, págs. 405-407.
- [13] American Welding Society. *AWS A5*. 2005.
- [14] C. M. Douglas. *Diseño y analisis de experimentos*. LIMUSA, 2004, págs. 126-466.
- [15] A.S.T.M. E-8. *International, Standard test Methods for tension testing of metallic materials*. en. 2013.
- [16] Honggang Dong. «Xiaohu Hao y Dewei Deng». En: *Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint*, *Metallography, Microstructure and Analysis* 3 (2014), págs. 138-146.
- [17] American Welding Society y AWS. *D17. 1/D17.1M*, Specification for fusion Welding for Aerospace applications, American Welding Society, 2010.