

Efecto del calor de entrada sobre la microestructura y microdureza en uniones soldadas GTAW-P robotizadas para acero HSLA

Abraham Fuentes^{a,*}, Benjamín Vargas^a, Celso E. Cruz^b, Verónica Estrella^a, Irineo P. Zaragoza^a, Miriam Aguilar^c

^aTecnológico Nacional de México / IT de Tlalnepantla, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Instituto Tecnológico s/n, 54070 Col. La comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México.

^bCentro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) sede Estado de México, Av. Desarrollo s/n Parque Industrial Cuamala, 54763 Cuautitlán Izcalli, Estado de México, México.

^cUAM – Azcapotzalco, División de CBI, Departamento de Materiales, Área de Ingeniería de Materiales, Av. San Pedro No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco, 02200, CDMX, México.

*podorski@live.com.mx

Resumen

El efecto del calor de entrada (Q_{net}) sobre la calidad, microestructura y dureza Vickers en uniones soldadas con doble cordón robotizadas GTAW-P en acero aleado variando la corriente de soldadura, voltaje del arco, velocidad de soldadura y precalentamiento fue evaluado mediante inspección visual, estereoscopia, microscopia óptica y prueba de microdureza. Los resultados indicaron que Q_{net} alto (0.600 kJ/mm) favoreció unión GTAW5 con adecuada calidad, sin defectos, menor ancho de zona afectada por calor recalentada (ZAC_R) promedio (2.43 mm) con formación de ferrita de grano grueso y martensita con mayor microdureza promedio de 597 HV, mientras que en metal de soldadura se observaron agujas finas de martensita y granos alargados de ferrita primaria resultando la mayor dureza (644 HV). Sin embargo, con el mayor Q_{net} (0.645 kJ/mm) se generó corrida GTAW7 produciendo mayor ancho de ZAC (4.41 mm) con socavado y microestructura de ferritas idiomorfa y de grano fino resultando la menor dureza (536 HV), así como soldadura conteniendo ferritas acicular y primaria generando 540 HV. Se encontraron dos perfiles de microdureza: tipo A donde la ZAC_R alcanza mayor dureza que metal de soldadura y tipo B con mayor endurecimiento en soldadura que en ZAC_R .

Palabras clave: Acero al Ni-Cr, GTAW-P robotizado, calor de entrada, martensita, endurecimiento.

1. Introducción

El acero de alta resistencia y baja aleación (HSLA) está diseñado para proporcionar alta resistencia a la cedencia (350 a 1000 MPa) en condición de laminado en caliente [1]. Este acero tiene medio contenido de C (0.25 a 0.5%), 2.0% Mn máximo, Cr, Ni, Mo, V, Nb, Ti y Cu [2]. Las aplicaciones incluyen barcos, tuberías de línea de petróleo y gas, automóviles, recipientes a presión, tanques de almacenamiento, puentes y edificios debido a excelentes propiedades mecánicas [3].

La soldadura por arco pulsado con electrodo de tungsteno y protección de gas (GTAW-P) robotizada es adecuada alternativa para aumentar la productividad, debido a la alta repetitividad de soldeo y mejoramiento de tiempos de trabajo comparados con proceso GTAW manual. Además, la GTAW-P proporciona soldadura limpia, sin defectos, adecuado acabado superficial, no produce escoria y disminuye posibilidad de

inclusiones en metal depositado. Ortiz et al. [4] mostraron que en industria automotriz, la inclinación hacia el proceso de soldadura robotizada ha tenido gran impacto en la calidad, consumo de energía del 66% y productividad de 60 al 73%.

Debido al gran efecto que tiene Q_{net} generado por la soldadura sobre las diferentes zonas microestructurales y propiedades mecánicas de unión soldada, se han realizado diversos estudios sobre Q_{net} . Además, el decremento de microdureza en la ZAC está asociado con Q_{net} estudiado por varios investigadores. Por ejemplo, Sadeghian et al. [5] señalaron que con soldadura GTAW convencional con 120 A, 16.75 V y velocidad de soldadura (S) de 1.4 mm/s, resultó en Q_{net} alto (0.861 kJ/mm), por lo que valores de dureza Vickers alcanzaron 300 HV (100 gr) en la ZAC del acero API-X65. Mientras que con Q_{net} bajo (0.506 kJ/mm), la dureza HV aumento 25 %, es





decir, a 400 HV (100 g_f) en la ZAC, debido a la alta rapidez de enfriamiento, lo que llevo a formación de bainita superior.

López et al. [6] estudiaron acero microaleado de alta resistencia, con microestructura compuesta de martensita y bainita, unido con GTAW convencional con 200 A, 3 mm/s y 0.933 kJ/mm, lo que resulto en ablandamiento en la ZAC asociado con formación de diferentes fases microestructurales en subzonas de la ZAC. En la ZAC de crecimiento de grano (ZACCG) se formó martensita, bainita y ferrita Widmanstätten. La ZAC de recristalización (ZACRC) presento bainita, ferritas de borde de grano y poligonal. En la ZAC parcialmente transformada (ZACPT) encontraron ferritas de borde de grano, poligonal y acicular. También, se presento tamaño de grano tres veces mayor en la ZACCG (18.92 μm) que en la ZACRC (6.50 μm). Dong et al. [7] reportaron diferentes combinaciones de parámetros de soldadura GTAW resultando varios valores de Q_{net} (0.250, 0.400, 0.460, 0.570, 0.670 y 0.770 kJ/mm), afectando la microestructura del metal de soldadura, ZACCG y ZACFG en uniones soldadas del acero HSLA. Para 0.670 kJ/mm, observaron la formación de bainita inferior fina y ferrita acicular en la ZAC. Concluyeron que incremento del Q_{net} restringió la formación de martensita, promoviendo la transformación bainítica.

Sin embargo, hay mínimas publicaciones sobre caracterización mecánica y microestructural de la ZAC y metal de soldadura en uniones soldadas por robot mediante proceso GTAW-Pulsado en acero HSLA. Por lo que se complica tener conocimiento amplio sobre la metalurgia de soldadura para estas dos zonas microestructurales, con lo que se generaría mejor entendimiento de la correlación que existe entre las causas y efectos del comportamiento de la microestructura sobre propiedades mecánicas de unión soldada.

El objetivo de esta investigación es un análisis comparativo de la microestructura, ancho de ZAC y dureza Vickers de uniones soldadas a tope GTAW-P robotizado, utilizando como variables a la corriente de soldadura, velocidad de soldadura, voltaje del arco y precalentamiento, con el fin de mejorar la soldabilidad, sanidad y calidad de estas uniones. La originalidad del trabajo se encuentra en que el acero empleado para las uniones es experimental, lo que significa información limitada sobre las propiedades mecánicas y zonas microestructurales generadas con diferentes parámetros de soldadura GTAW-P robotizada. Además, con el estudio se podría aportar las

mejores combinaciones de parámetros de soldadura.

2. Parte experimental

2.1 Materiales

Se partió de placas de acero HSLA al Ni-Cr con dimensiones de 500x500x4 mm en longitud, ancho y espesor, respectivamente. Los cupones para realizar uniones soldadas a tope se cortaron con dimensiones de 110x110x4 mm, respectivamente, mediante maquina Water Jet Mitsubishi Electric Suprema DX510. La composición química del alambre de soldadura ER70S6 de acuerdo con especificación AWS A5.18 [8] y metal base HSLA en condición original, se incluye en tabla 1. Esta composición se obtuvo mediante espectrometría de emisión óptica de Spectrolab. Los contenidos de C y S se obtuvieron con método de combustión directa y detección infrarroja. Los valores de carbono equivalente (C_{eq}) se calcularon mediante ecuación 1 reportada en estándar AWS WIT [9].

Tabla 1. Composición química del metal de aporte ER70S-6 y acero HSLA.

Material	Elemento químico (% peso)								
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	P	S	C_{eq}
ER70S-6	0.105	1.625	0.975	0.15	0.15	0.15	0.025	0.025	0.490
Acero HSLA	0.280	1.340	0.420	1.82	0.53	0.544	0.015	0.003	0.867

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

Las propiedades mecánicas del metal de aporte en base a especificación AWS A5.18 [8] y metal base se presentan en tabla 2, indicando que metal base presento mayores valores de resistencias máxima a la tensión (S_u) y a la cedencia (S_0). Sin embargo, mostro menor ductilidad, comparados con valores del metal de aporte.

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

Material	Dureza Rockwell	S_0 0.2% (MPa)	S_u (MPa)	Elongación (%)
ER70S6	92.6 HRB	375	745	22
Acero HSLA	32.6 HRC	791	1252	11

2.2 Proceso de soldadura GTAW-P robotizada

La posición de soldadura GTAW-P en placas HSLA para uniones soldadas a tope con doble cordón fue plana 1G (figura 1a). Las placas se soldaron con ángulo de antorcha de 90° con electrodo tungsteno con óxido de cerio al 2% (CeO₂) con diámetro de 3.2 mm, longitud de arco pulsado de 2.5 mm, desplazamiento de soldadura tipo empuje, frecuencia de 20 Hz y velocidad de alimentación del alambre de 1.2 mm/s. Las placas presentaron bisel recto de 90° en área a soldar con abertura de raíz de 0.9 mm (figura 1b), que es diámetro del metal de aporte ER70S6. El gas de protección fue 99.99 % Ar con caudal de 14 L/min. Se utilizó transferencia de metal por corto circuito por medio de arco pulsado con cuatro parámetros de soldadura: corriente de soldadura (209 a 333 A) [5, 10], voltaje del arco (13 a 16.2 V), precalentamiento (25 a 150 °C) y S (3 a 8 mm/s) utilizando robot Fanuc Arc Mate 120ic, de acuerdo al código AWS D1.1 [11].

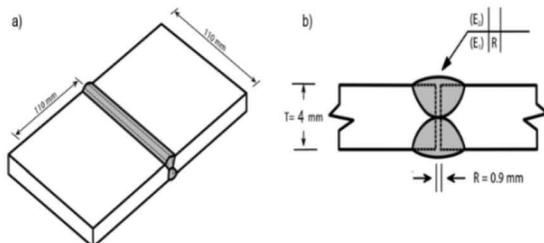


Figura 1. Esquemas de union soldada para placas de acero HSLA mediante proceso GTAW-P robotizado: a) union a tope y b) union sin preparacion en bisel con doble cordón.

De acuerdo con experimentaciones previas para ajuste de cuatro parámetros, se generó matriz experimental con siete corridas GTAW-P robotizadas, ver tabla 3. Adicionalmente, Q_{net} fue calculado con ecuaciones 2 y 3 [12] para cada unión.

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

Dónde: Q_{net} = calor de entrada neto (kJ/mm), η = eficiencia de transferencia de calor, 0.65 para GTAW-P.

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

Dónde: Q_{arc} = energía de arco (kJ/mm), E = voltaje de arco (V), I = corriente de soldadura (A) y S = velocidad de soldadura (mm/s).

El índice de rapidez de enfriamiento ($\Delta t_{8/5}$) fue calculado con ecuación 4 [7], que representa tiempo del enfriamiento desde 800 a 500 °C, ver tabla 3.

$$\Delta t_{8/5} = 5\eta Q_{net} \quad (4)$$

Adicionalmente, para medir el tiempo crítico ($\tau_{8/5}$), es decir, por debajo de este valor se encuentra martensita en la ZAC, se aplicó ecuación 5 [13] resultando valor de 2.65 s.

$$\log_{\tau_{8/5}} = 2.69C_{eq} + 0.321 \quad (5)$$

2.3 Caracterización macroestructural

Para este análisis se utilizaron probetas transversales de 27x15x4 mm de largo, ancho y espesor, respectivamente, las cuales se prepararon por metalografía en base al estándar ASTM E3 [14]. Las probetas se encapsularon en baquelita en montadora MTI Corporation LHM1000, las cuales fueron desbastadas con papel abrasivo de diferentes grados y pulidas con Al₂O₃ con diámetro de 0.3 μm en paño húmedo. Finalmente, las muestras fueron atacadas con picral (4 g ácido pícrico y 100 ml de alcohol metílico) mediante técnica de inmersión durante 90 s [15]. La estereoscopia se realizó con estereoscopio Carl Zeiss Stemi 2000-C incluyendo cámara Carl Zeiss AxioCam ERc 5s conectada a computadora con software Axio Vision Rel. 4.8. Las macrografías de uniones soldadas GTAW-P se obtuvieron a 6.5x para abarcar unión completa.

Tabla 3. Matriz experimental con siete corridas robotizadas GTAW-Pulsado.

Unión	Corriente de soldadura (A)	Voltaje del arco (V)	Precalentamiento (°C)	S (mm/s)	$\Delta t_{8/5}$ (s)	Calor de entrada (kJ/mm)
GTAW1	200	13	25	3	1.82	0.563
GTAW2	209	13	25	3	1.91	0.588
GTAW3	209	12.3	150	3	1.80	0.556
GTAW4	285	15.4	150	8	1.18	0.356
GTAW5	285	16.2	150	5	1.95	0.600
GTAW6	333	14.9	150	8	1.30	0.403
GTAW7	333	14.9	150	5	2.09	0.645

2.4 Análisis microestructural

Para evolución microestructural se utilizaron las anteriores probetas metalográficas de uniones soldadas GTAW-P para revelar características microestructurales del metal de soldadura, ZAC y metal base, mediante microscopio óptico Carl Zeiss Axiovert 40 MAT con cámara y software mencionados. Las micrografías de diferentes uniones soldadas se tomaron a 500x.

2.5 Prueba de dureza Vickers

Se realizaron mediciones de microdureza sobre muestras transversales habilitadas de uniones soldadas a tope de acuerdo al estándar ASTM E384 [16]. Se aplicaron veintidós lecturas divididas en dos perfiles (cordones de relleno y respaldo) por probeta desde el metal base y ZAC en ambos lados de unión y metal de soldadura central con 200 gr de carga y 12 s de prueba. Las indentaciones fueron realizadas cada 0.55 mm en distancia. Estas pruebas se realizaron con equipo Wilson Hardness Tukon 1102.

3. Resultados y discusiones

3.1 Defectos de soldadura GTAW-P robotizada

La calidad y sanidad de siete uniones soldadas GTAW-P con metal de aporte ER70S6 se evaluaron mediante inspección visual en base a defectos tales como socavado, falta de fusión y porosidad [9], así como concentricidad entre dos cordones, ancho y morfología de la ZAC. La mejor calidad, libre de defectos y adecuada concentricidad entre cordones, se observó en condición GTAW5 (285 A, 16.2 V y 5 mm/s), ver figura 2a). En segundo lugar, esta unión GTAW1 (200 A, 13 V y 3 mm/s) debido a que presentó desalineación entre ambos cordones de soldadura, sin defectos y adecuada fusión (figura 2b). En tercer lugar, siguió corrida GTAW6 (333 A, 14.9 V y 8 mm/s) mostrando cordón de respaldo con mayor tamaño que el de relleno y sin defectos, ver figura 2c).

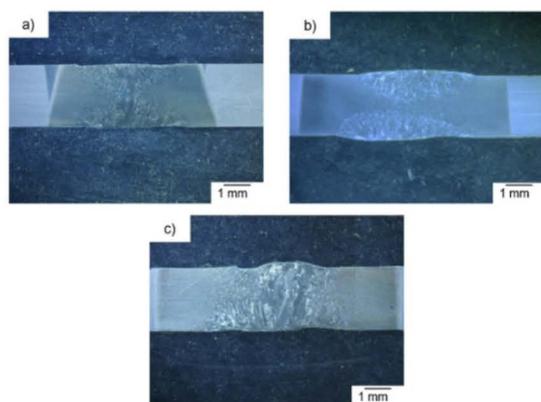


Figura 2. Macrografías obtenidas por estereoscopia a 6.5x para uniones de acero HSLA: a) GTAW5 sin defectos de soldadura, b) GTAW1 con desfaseamiento entre cordones y c) GTAW6 con cordón de respaldo de mayor tamaño que de relleno.

Siguiendo con análisis macroestructural, cuatro uniones resultaron con defectos bajo diferentes grados de severidad, principalmente falta de fusión generada entre cordones o límite de fusión

de soldadura. La probeta GTAW4 (285 A, 15.4 V y 8 mm/s) presentó mínima falta de fusión entre cordones de soldadura, así como su desalineación, ver figura 3a). La soldadura GTAW2 (209 A, 13 V y 3 mm/s) también mostró falta de fusión con mayor tamaño en la ZAC entre ambos cordones en comparación con GTAW4, la cual se atribuyó al Q_{net} alto (0.588 kJ/mm) y falta de precalentamiento, favoreciendo desfaseamiento entre cordones (figura 3b). Sin embargo, la corrida GTAW3 (209 A, 12.3 V y 3 mm/s) exhibió falta de fusión [17], localizada entre cordones, con el mayor tamaño en comparación con otras uniones, como se observa en figura 3c). Finalmente, la prueba GTAW7 (333 A, 14.9 V y 5 mm/s) presentó evidente socavado [9, 18] en ambos lados del cordón de relleno con mayor penetración, como consecuencia del gran aporte térmico medido como el mayor Q_{net} (0.645 kJ/mm) derivado de la mayor corriente de soldadura, ver figura 3d).

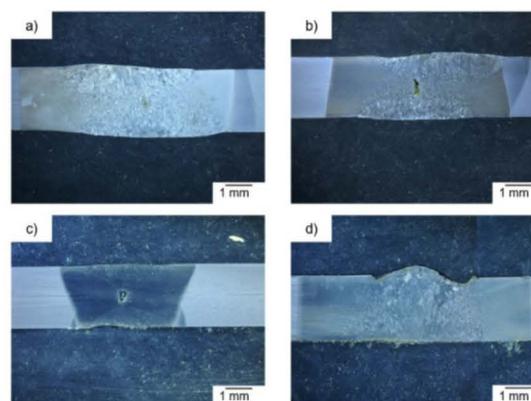


Figura 3. Macrografías obtenidas por estereoscopia a 6.5x para uniones de acero HSLA: a) GTAW4 con desfaseamiento entre cordones, b) GTAW2 y c) GTAW3 con falta de fusión entre cordones, y d) GTAW7 con socavado en cordón de relleno.

3.2 Ancho de ZAC en uniones GTAW-P robotizadas

En figura 4 se muestra los diferentes valores del ancho promedio de la ZAC para siete uniones soldadas GTAW-P. Se determinó rango desde 2.30 a 4.65 mm, es decir, el menor ancho de ZAC se observó para unión GTAW3 (2.30 mm) como consecuencia de Q_{net} mediano (0.556 kJ/mm) y baja corriente (209 A) [19], lo que formó la región más pequeña de ZAC, seguida de condiciones GTAW5 (2.43 mm) y GTAW4 (3.59 mm), en comparación con el mayor valor para soldadura GTAW6 (4.65 mm) [6]. Por lo tanto, se determinó incremento en ancho de ZAC, el mayor aumento

fue alcanzado para corrida GTAW6 (102%), seguida de GTAW7 (92%) y GTAW2 (75%) en comparación con GTAW3, lo cual se asoció con Q_{net} mediano (0.403 kJ/mm) favorecido por alta corriente (333 A). En base a lo anterior, se encontró relación incremental entre ancho de ZAC y Q_{net} para tres uniones: GTAW3 (2.30 mm con 0.556 kJ/mm), GTAW5 (2.43 mm con 0.600 kJ/mm) y GTAW7 (4.41 mm con 0.645 kJ/mm), es decir, ancho de ZAC aumento a medida que se incrementó Q_{net} junto con corriente de soldadura.

Adicionalmente, se analizó la morfología de la ZAC, observando dos tipos: ZAC convencional (ZAC_C) sobre metal base y ZAC recalentada (ZAC_R) entre cordones. La corrida GTAW3 mostro principalmente ZAC_R con forma trapezoidal y mínima cantidad de ZAC_C con forma semi-elíptica localizada junto al cordón de respaldo, ver figura 3c). La soldadura GTAW5 presento ZAC_R con morfología trapezoidal y mínima ZAC_C con formación rectangular junto al cordón de relleno en parte superior de unión, como se observa en figura 2a). Además, ambas uniones mostraron adecuada alineación entre centros de cordones. Por lo tanto, la forma trapezoidal de la ZAC se relacionó con menor extensión de zona afectada térmicamente, es decir, menor ancho de ZAC. Finalmente, una observación macroscópica relevante se encontró en condición GTAW7 con 100% de ZAC_R en forma rectangular a través de unión (figura 3d) [9] por lo que la ZAC_C se transformó, como consecuencia del mayor Q_{net} favorecido por alta corriente de soldadura (333 A), generando defecto de socavado.

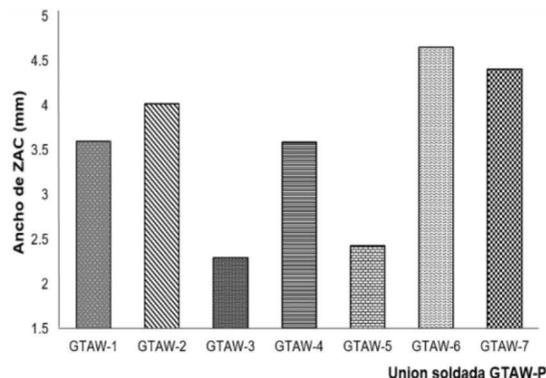


Figura 4. Ancho de ZAC promedio para diferentes uniones soldadas GTAW-P robotizadas en acero HSLA.

3.3 Análisis microestructural

Este estudio de microscopía óptica a 500x se basó en corridas que presentaron mejor calidad y sanidad sin defectos: GTAW5, GTAW1 y

GTAW6, así como condición GTAW7 con socavado. Se identificaron diferentes zonas microestructurales en unión soldada: cordón de relleno, ZAC_R izquierda (ZAC_{Ri}), ZAC_R derecha (ZAC_{Rd}) y cordón de respaldo. Para corrida GTAW5, en metal de relleno ER70S-6 se generaron granos alargados y finos (zonas blancas) de ferrita primaria (FP) y regiones de martensita lenticular (ML) en mayor cantidad [20] entre granos ferríticos (figura 5a). En la ZAC_{Ri} se formó matriz de ferrita de grano grueso (FGG) con límites de grano bien definidos y presencia limitada de agujas de ML [18], ver figura 5b). Mientras que la ZAC_{Rd} presento formación de FGG de mayor tamaño y ML en mayor cantidad (figura 5c). Además, en metal de respaldo se observaron granos de FP con agujas de ferrita acicular (FA) entre granos alargados (figura 5d). Estas fases microestructurales duras se generaron con Q_{net} alto (0.600 kJ/mm) asociado con valores medianos de corriente (285 A) y S (5 mm/s), así como adecuado índice de rapidez de enfriamiento ($\Delta t_{8/5}$) de 1.95 s favorecido por precalentamiento (150°C), resultando ancho promedio de ZAC bajo (2.43 mm). Finalmente, en figura 5e) se observó microestructura con morfología típica de acero HSLA laminado en caliente, la cual presento matriz ferrítica (F) de granos equiaxiales muy finos y presencia de colonias de perlita (P), ambas fases ordenadas en bandas alternadas y alineadas en dirección de laminación como resultado del proceso termo-mecánico [1]. Por lo tanto, es factible realizar soldadura GTAW-P con esta combinación de parámetros de soldadura GTAW5.

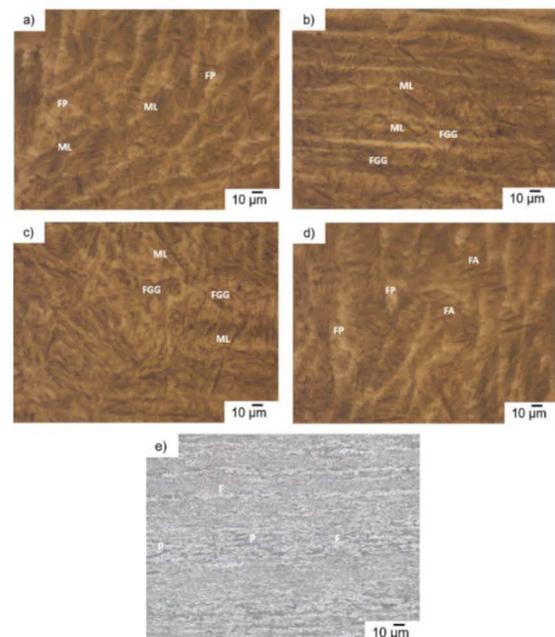


Figura 5. Micrografías obtenidas por microscopía óptica de zonas microestructurales de unión GTAW5: a) cordón de relleno con ferrita primaria, b) ZAC_{Ri} con martensita lenticular, c) ZAC_{Rd} con ferrita de grano grueso, d) cordón de respaldo con ferrita acicular, y e) metal base HSLA con perlita.

Para unión GTAW1, se observó en cordón de relleno formación de FP y agujas finas de FA entre granos ferríticos alargados (figura 6a). La ZAC_{Ri} mostro menor proporción de FGG y agujas finas de martensita lenticular, ver figura 6b). En la ZAC_{Rd} se encontró mayor cantidad de FGG y ML (figura 6c), tal como reporto Dong et al [7]. El cordón de respaldo exhibió FP de grano fino y agujas de FA (figura 6d). Estas fases resultaron de Q_{net} mediano (0.563 kJ/mm) y menor $\Delta t_{8/5}$ (1.82 s) favorecido por falta de precalentamiento, produciendo ancho de ZAC mediano (3.6 mm).

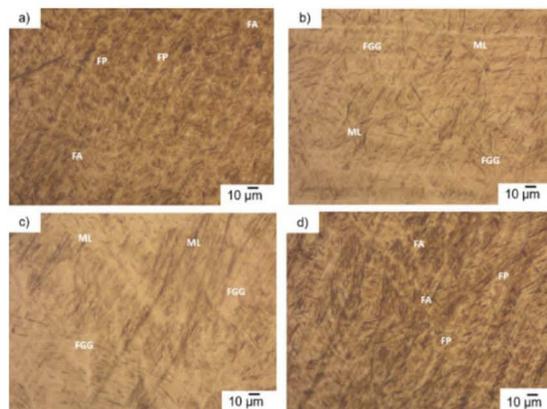


Figura 6. Micrografías obtenidas por microscopía óptica de microestructuras de corrida GTAW1: a) cordón de relleno con ferrita primaria, b) ZAC_{Ri} con ferrita de grano grueso, c) ZAC_{Rd} con martensita y d) cordón de respaldo con ferrita acicular.

La prueba GTAW6 exhibió cordón de relleno conteniendo mayor cantidad de agujas de ferrita Widmanstätten secundaria (FWS), granos finos de FP y agujas finas de FA (figura 7a). Para ambas ZAC_{Ri} y ZAC_{Rd} se encontró matriz de fase FGG y agujas de ML, ver figuras 7b) y 7c), respectivamente. Por otro lado, en cordón de respaldo se encontraron granos de FP, menor cantidad de FWS y agujas de ML (figura 7d). Estas fases frágiles se debieron al Q_{net} mediano (0.403 kJ/mm) asociado con valores altos de S (8 mm/s) y corriente (333 A) y precalentamiento (150°C). Además, $\Delta t_{8/5}$ pequeño (1.3 s), es decir, menor rapidez de enfriamiento favoreció transformación martensítica [6, 21]. Sin embargo, todos los factores mencionados influyeron en formación del mayor ancho de ZAC promedio

(4.65 mm), por lo que esta corrida GTAW-P no es recomendable para soldar.

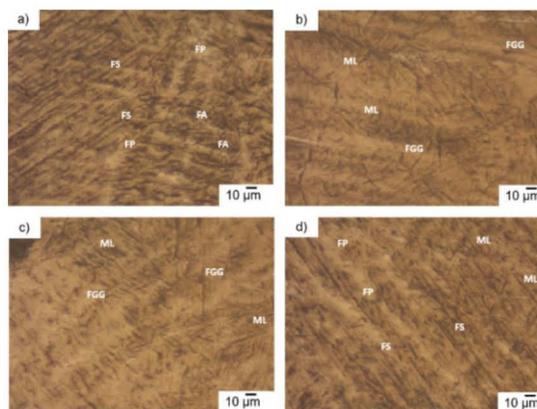


Figura 7. Micrografías obtenidas por microscopía óptica de microestructuras en unión GTAW6: a) cordón de relleno con ferrita Widmanstätten, b) ZAC_{Ri} con ferrita de grano grueso, c) ZAC_{Rd} con martensita, y d) cordón de respaldo con ferrita primaria.

Por último, unión soldada GTAW7 consistió del cordón de relleno con formación de granos alargados medianos de FP y granos de FA (figura 8a). Mientras que ambas ZAC_{Ri} y ZAC_{Rd} mostraron ferrita de grano fino (FGF) y ferrita idiomórfica I (FP) de tamaño mediano, ver figuras 8b) y 8c), respectivamente. Por otra parte, en cordón de respaldo se encontraron granos de FP con presencia de FA (figura 8d). Estas fases microestructurales se formaron con el mayor Q_{net} generado (0.645 kJ/mm) favoreciendo alto pico de temperatura, lo que genero disolución de precipitados y como consecuencia menos sitios de nucleación para nuevas fases que se producen durante enfriamiento de unión, así como formación de defecto de socavado. El comportamiento microestructural descrito en cuatro corridas descritas se relaciona directamente con dureza Vickers.

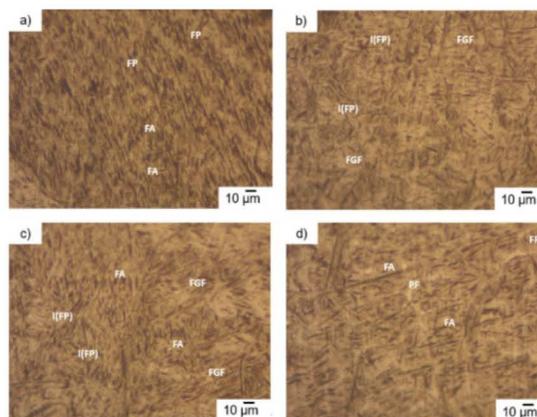


Figura 8. Micrografías obtenidas por microscopía óptica de microestructuras de corrida GTAW7: a) cordón de relleno con ferrita acicular, b) ZAC_{Ri} con ferrita idiomorfa, c) ZAC_{Rd} con ferrita de grano fino y d) cordón de respaldo con ferrita primaria.

3.3 Dureza Vickers

Los perfiles de microdureza promedio a través de ambos cordones de siete uniones soldadas GTAW-P son mostrados en figura 9. Se encontró que la tendencia de dureza Vickers cambia en todo el recorrido de cada unión con la menor dureza en acero HSLA comparado con la ZAC y metal (cordón) de soldadura, debido a diferentes combinaciones de parámetros de soldadura, ciclos de temperatura y composición química entre metales base (acero HSLA) y soldadura (ER70S6). Se encontraron dos comportamientos: primer perfil mostro tendencia A crítica de mayor dureza (endurecimiento) en ambas ZAC_{Ri} y ZAC_{Rd} en comparación con metal de soldadura central, para cuatro uniones (GTAW1, GTAW2, GTAW3 y GTAW4). Mientras que segundo perfil B típico mostro mayor endurecimiento en cordón de soldadura comparando con ambas ZAC_R en tres uniones (GTAW5, GTAW6 y GTAW7). Ambos tipos de endurecimiento se relacionaron con presencia de fases microestructurales duras como martensita [7].

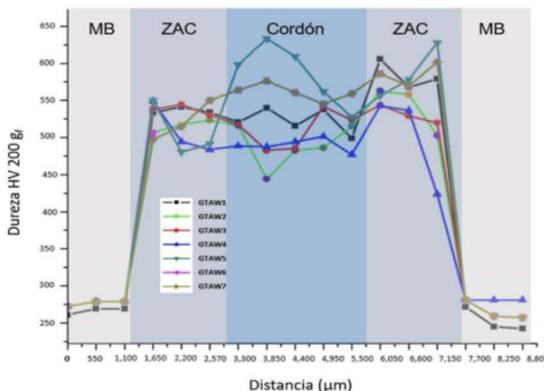


Figura 9. Perfiles de microdureza a través de zonas microestructurales para siete uniones GTAW-P robotizadas.

En figura 10 se ilustran durezas HV promedio para ambas ZAC_R y metal de soldadura en ambos cordones para siete uniones GTAW-P robotizadas, confirmando dos tipos de endurecimiento A y B. En caso de perfil A crítico es evidente que dureza promedio de ambas ZAC_R es mayor en comparación con respectivos valores del metal de soldadura para primeras cuatro uniones. Por lo tanto, el mayor endurecimiento se alcanzó para unión GTAW3, seguida por GTAW2 y GTAW1

como resultado de valores bajos y medianos de Q_{net} de 0.356 a 0.588 kJ/mm. Además, este perfil A es susceptible al agrietamiento en la ZAC_R, una vez que componente con soldadura sea puesto en servicio. Para comportamiento B típico donde metal de soldadura alcanza mayor endurecimiento comparando con ambas ZAC_R para últimas tres uniones. Por lo que, el mayor incremento de dureza se observó en corrida GTAW6, seguida de GTAW5 y GTAW7 debido a mayores valores de Q_{net} (0.403 a 0.645 kJ/mm) derivados de mayores valores de corriente de soldadura (285 a 333 A).

Analizando la microdureza promedio de ambas ZAC_R y cordón de soldadura de siete uniones soldadas, la mayor dureza HV se observó para metal de soldadura de corrida GTAW5, seguido de cordón de soldadura y ZAC_R de GTAW6 y ZAC_R de GTAW5. Por lo tanto, estas dos corridas alcanzaron mayor endurecimiento en comparación con otras cinco uniones y acero HSLA, como consecuencia de fases microestructurales duras como agujas finas de martensita y ferrita Widmanstätten secundaria en cordón de soldadura de pruebas GTAW5 y GTAW6, respectivamente. Mientras que para la ZAC_R se observaron fases duras tales como agujas finas de martensita [7] y ferrita de grano grueso en corridas GTAW6 y GTAW5. Esta evolución microestructural se derivó de combinación de parámetros de soldadura representada mediante Q_{net} alto de 0.600 kJ/mm (GTAW5) y Q_{net} mediano de 0.403 kJ/mm (GTAW6).

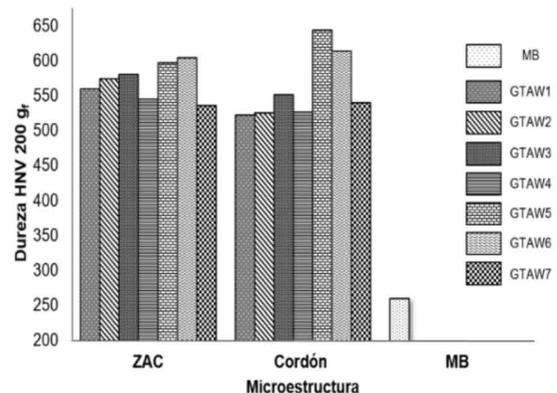


Figura 10. Valores de dureza Vickers promedio en ZAC_R y metal de soldadura para siete uniones soldadas GTAW-P.

4. Conclusiones

Después de inspección visual de siete uniones soldadas robotizadas, solamente GTAW5 con Q_{net} alto de 0.600 kJ/mm, GTAW1 (0.563 kJ/mm) y GTAW6 (0.403 kJ/mm) presentaron adecuada calidad sin defectos de soldadura. Sin embargo, solo unión GTAW5 (285 A, 16.2 V, 5 mm/s y

150°C de precalentamiento) mostro menor ancho de ZAC promedio (2.43 mm) y mejor calidad, en comparación con el mayor valor (4.65 mm) en GTAW6 (333 A, 14.9 V, 8 mm/s y 150°C) favorecido por mayor corriente de soldadura. Sin embargo, al aplicar el mayor Q_{net} (0.645 kJ/mm) en corrida GTAW7 (333 A, 14.9 V, 5 mm/s y 150°C) se observó ancho de ZAC mayor (4.41 mm) y defecto perjudicial de socavado en costados del cordón de relleno con mayor tamaño en comparación con el de respaldo.

Para corridas GTAW3, GTAW5 y GTAW7, con adecuada alineación entre ambos cordones, el efecto del calor de entrada sobre ancho de ZAC promedio de 2.30, 2.43 y 4.41 mm, respectivamente fue su incremento con aumento del Q_{net} de 0.556, 0.600 y 0.645 kJ/mm, respectivamente.

La mejor unión soldada GTAW5 presento dos cordones de soldadura con microestructura compuesta por granos alargados de ferrita primaria y agujas de martensita lenticular entre estos granos, produciendo la mayor microdureza promedio de 644 HV, mientras que la ZAC_R mostro ferrita de grano grueso y agujas de martensita, generando dureza Vickers alta de 597 HV. Este comportamiento microestructural y dureza se asoció con valor de Q_{net} alto (0.600 kJ/mm) derivado de valor mediano de corriente de soldadura (285 A).

El perfil de microdureza donde el metal de soldadura alcanzo mayor dureza en comparación con la ZAC_R se clasifico como tipo B típico encontrado en tres uniones soldadas robotizadas GTAW5, GTAW6 y GTAW7.

Sin embargo, se encontró segundo perfil de dureza tipo A critico donde la ZAC_R alcanzo mayor dureza Vickers que metal de soldadura, debido a que la microestructura exhibió agujas finas de martensita y ferrita de grano grueso originando microdureza de 560 HV, mientras que metal de soldadura mostro granos de ferrita primaria y ferrita acicular resultando la menor dureza de 523 HV, tal como lo observado en prueba GTAW1 (200 A, 13V y 3 mm/s) asociado con Q_{net} mediano (0.563 kJ/mm). Este comportamiento se encontró en cuatro corridas GTAW1, GTAW2, GTAW3 y GTAW4, por lo que podrían ser más susceptibles al agrietamiento en servicio. Entonces, no se recomiendan sus combinaciones de parámetros de soldadura robotizada.

5.- Referencias

1. T. Baker, *Microalloyed steels, Ironmaking & Steelmaking*, 2016, 4(43), pp. 264-307.
2. *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, vol. 1, The materials Information Company, 1990.
3. D.M. Viano; N.U. Ahmed; G.O. Schumann, *Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments*, Science and Technology of Welding and Joining, 2000, 5(1), pp. 26-34.
4. M. Ortiz; C. Sanches; H. Fuqen, *Automatizacion de los procesos de soldadura final para vehiculos de pasajeros en GM Colmotores*, Ingenio Magno, 2016, 7(1), pp. 10-21.
5. M. Sadeghian; M. Shamanian; A. Shafyei, *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints between super duplex stainless steel and high strength low alloy steel*, Materials & Design, 2014, 60, pp. 678-684.
6. E. López Martínez; B.F. Campillo Illanes; P. Garnica González; H.J. Vergara Hernández, *Efecto del calor aportado por soldadura en un acero microaleado*, Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM, 2013, pp. 701-707.
7. Honggang Dong; Xiaohu Hao; Dewei Deng, *Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of HSLA steel joint*, Metallogr. Microstruct., 2014, 3, pp. 138-146.
8. American Welding Society. AWS A5.18. *Specification for carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding*, AWS, 2005, pp. 2-6.
9. American Welding Society. *Welding Inspection Technology*, AWS, Miami, Florida, 2000.
10. E. Mortzavi, R. Amini Najafabadi, Amirhossein Meysami, *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of dissimilar joints of AISI 316L steel and API X70 high-strength low-alloy steel*, Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24, pp. 1248-1253.
11. American Welding Society. *AWS D1.1. Structural Welding Code*, AWS, Miami FL, 2000.
12. I. Guzman-Flores; B. Vargas-Arista; J. J. Gasca-Dominguez; C.E. Cruz-Gonzalez; M.A. González-Albarran; J. del 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 & inspecao, 2017, 1(22), pp. 72-86.
13. O.S. Odebiyi; S.M. Adedayo; L.A.T. Martins; O. Onuorah, *A review of weldability of carbon steel in arc-based welding processes*, Cogent Engineering, 2019, 6(1).
14. ASTM International, *ASTM E3-11, Standard guide for preparation of metallographic specimens*, ASTM, U.S.A, 2011.
15. ASTM International, *ASTM E407-15 Standard practice for microetching metals and alloys*, ASTM, U.S.A, 2016, pp. 13.
16. ASTM International, *ASTM E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, 2017, pp. 40.
17. ASTM International Handbook, *Welding brazing and soldering*, vol. 6, ASM international, 1993.
18. ASTM International, *Weld integrity and performance*, ASTM, 1997.
19. M.H.A. Musa; M.A. Maleque; M.Y. Ali, *An investigation of TIG welding parameters on microhardness and microstructure of heat affected*

- zone of HSLA steel*, IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering, 290, 2018.
20. G. Thewlis, *Classification and quantification of microstructures in steels*, Materials Science and Technology, 2004, 20, pp. 143-159.
21. M. Zalazar; H.J. Quesada; E.P. Asta. *Microestructuras producidas en la soldadura de unión de aceros para tuberías de gran diámetro*, Revista metalurgia, 1998, 6(36), pp. 469-475.

