

Agrietamiento en uniones soldadas de acero al carbono empleado en el tanque de descarga de lixiviación*

Francisco Cremé Revé

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se analizó el comportamiento microestructural y la dureza del acero AISI 1025 soldado con electrodos del tipo E 6010 y E 7018 de diámetros de 3,2 mm y 4 mm, respectivamente, empleando el proceso de soldadura SMAW. Para establecer el procedimiento se prepararon muestras que fueron soldadas y se caracterizó el comportamiento microestructural en la zona fundida, la zona de influencia térmica y la interfase del cordón para el depósito con ambos electrodos. La microdureza obtenida en el depósito con el electrodo E 6010 es de 35,2 HV y de 31,5 HV para el depósito con el electrodo E 7018; esto está asociado a la soldadura multipasadas, la cual se convierte en un tratamiento térmico de recocido, que disminuye la misma en la medida que se depositan los cordones.

Palabras clave: acero; soldadura SMAW; tanque de descarga.

*Trabajo tutorado por el Dr. Tomás Fernández Columbié y el Ing. Fernando de la Vara Fernández.

Recibido: 12 marzo 2015 / Aceptado: 19 septiembre 2015.

Cracking in carbon steel welded joints on leach discharge tank

Abstract: The objective was to analyze the microstructural behavior and the AISI 1025 steel welded with type E 6010 and E 7018 electrodes with 3,2 and 4 mm diameters; respectively by applying the SMAW welding procedure. Samples were prepared and welded in order to establish the procedure. This allowed characterizing the microstructural behavior of the welded area, the area of thermal influence and the bead interphase for depositing both electrodes. The micro- hardness results for the E 6010 and E 7018 electrodes were 35,2 HV and 31,5 HV; respectively. This is associated with multi-passes; which makes it an annealing thermal treatment. The micro- hardness decreases while the beads are being deposited.

Key words: steel; SMAW welding; discharge tank

Introducción

En la producción de objetos, mediante construcciones soldadas en la industria, la aplicación o ejecución de los procesos de soldadura están sujetos y se desarrollan de acuerdo con códigos y normas que regulan la fabricación de las construcciones.

La soldadura implica la aplicación de calor altamente localizado en metales que responden a la ley física de expansión contracción, capaces de afectar su estructura y en condiciones de movimiento restringido.

Uno de los métodos más eficaces para la unión de estructuras de acero es mediante el proceso de soldadura. Aunque la soldadura tiene muchas ventajas, también posee algunas desventajas como son las deformaciones, las tensiones residuales y los defectos propios del método de soldadura (Araque & Arzola, 2013).

La mayoría de los defectos en uniones soldadas son: porosidad, falta de penetración, falta de fusión, inclusión de escoria, socavación y desalineamiento. El tamaño e intensidad de las imperfecciones depende del proceso de soldadura, la geometría, la facilidad de acceso y el cuidado ejercido en el proceso de soldar, entre otros factores. Estas imperfecciones tienen diferentes características y en algunas situaciones son difíciles y costosas de detectar y definir sin destruir la junta soldada (Maddox, 1994).

Existen diversos tipos de defectos en las uniones soldadas debido a factores como la intensidad de corriente, el medio y factores humanos que afectan la calidad del depósito soldado (Mohammad, 2005).

El agrietamiento que se produce en las uniones soldadas de los tanques de descarga de lixiviación en la planta de Lixiviación de la empresa Pedro Sotto Alba afecta la conducción del mineral lixiviado. Los tanques de descargas tienen la función de recibir la pulpa lixiviada procedente de los enfriadores para eliminarle la presión de la misma, ya que en esta etapa del proceso las presiones que influyen en el mismo afectan la conducción del mineral, quien tiene un porcentaje de contenido entre 40-45 de sólido, lo cual ha provocado averías causadas por el agrietamiento en las uniones soldadas.

Por ello el objetivo de la investigación es determinar las causas del agrietamiento en las uniones soldadas de aceros de bajo contenido de carbono empleado en la fabricación del *flash tank* de la planta de Lixiviación.

Tanque de descarga (flash tank)

El flash tank es diseñado y fabricado con material de acero de bajo contenido de carbono y un espesor de plancha de 19 mm de espesor. La función del tanque es disminuir la presión existente en la pulpa de sulfuros procedente del autoclave y con ello garantizar que se desprenda el H₂S gaseoso y el vapor de agua disueltos en el licor, facilitando de esta manera la correcta sedimentación del sulfuro en los tanques.

Este tanque vertical posee recubrimiento de goma de 4,7 mm y ladrillos antiácidos.

Ø interior: 2 134 mm

Altura: 2 740 mm

Temperatura: 98 – 99 °C

Presión de trabajo: 0,002 MPa (250 mm de H₂O)

Estrangulador de titanio: Ø 50 mm y largo de 610 mm

Volumen: 3 322,7 galones

Material: AISI 1025.

Procedimiento experimental

Para lograr las condiciones de soldabilidad de las muestras se desarrolló un procedimiento experimental. Se seleccionó el material base del cuerpo del flash tank y se prepararon muestras para la soldadura de dimensiones 150 x 100 x 20 mm.

Materiales de aporte para la soldadura

Los materiales de aporte empleados para la soldadura y su empleo aparecen en la Tabla 1. Se clasifican según la norma AWS/ASME: A5.1-91.

Tabla 1. Materiales de aporte empleados para los depósitos

Junta	1	2
Pase de raíz (PR)	E - 6010	E - 7018
Pase en caliente (PC)	E - 7018	E - 7018
Pase de relleno (PRE)	E - 7018	E - 7018
Pase de acabado (PA)	E - 7018	E - 7018

Electrodo E 6010 AWS A 5.1

Es el electrodo más recomendable para soldaduras temporales en montaje por su rápida solidificación y altas propiedades mecánicas. Se caracteriza por su alta eficiencia de aporte y su gran contenido de polvo de hierro.

Electrodo E 7018 AWS A 5.1

Recomendable para soldadura de los aceros de bajo y medio carbono hasta 0,45 % C, aceros al carbono-manganeso, aceros de baja aleación con resistencia a la tracción hasta 70 000 Psi (490 MPa), aceros con alto contenido de azufre y fósforo considerados difíciles de soldar. El electrodo empleado según AWS se clasifica en: INFRA 718, básico (bajo hidrógeno).

Parámetros de soldadura

Los parámetros de soldadura definidos para cada probeta fueron: corriente de soldadura (I_s), tensión de arco (U_a) y velocidad de soldadura (V_s). El diámetro de los electrodos fue de 3,2 mm y 4 mm, con una longitud de 350 mm. La intensidad de la corriente de soldadura depende del diámetro del electrodo, el cual se selecciona atendiendo al espesor del material base, al tipo de construcción soldada, al revestimiento y a la posición del cordón en el espacio que influye en la magnitud de la intensidad. Según Quintero y colaboradores (2006) se determina como:

$$I_s = 2,5d_s^2 + 35,5d_s - 18$$

Donde: I_s : intensidad de corriente de soldadura; A
 d : diámetro del electrodo; mm.

Determinación del voltaje del arco eléctrico

La tensión de arco no influye en el ancho del cordón, sino en el refuerzo (forma cóncava o convexa del mismo), teniéndose soldaduras planas (con tensiones altas) y abultadas (con tensiones bajas), pero siempre en el rango de tener un arco estable. Según Rodríguez (1983) se determina como:

$$U_a = 0,05 \cdot I_s + 10.$$

Donde: U_a : tensión del arco; V

Cálculo del calor aportado

Debido a las actuales exigencias de mejorar la productividad en la deposición de recargues fue necesario estudiar el efecto de parámetros de soldadura y su resistencia al desgaste. Para ello se seleccionaron dos grupos relacionados con el aporte térmico. El calor aportado se calculó con base en la ecuación:

$$Q = \frac{U_a \cdot I_s}{V_s}$$

Donde: Q- calor aportado; kJ/mm

V_s - velocidad de soldadura; mm/s.

Cálculo de la energía lineal del proceso de soldadura

Cuando se deposita una pasada de soldadura sobre la superficie de una placa, el flujo de calor afecta cada punto produciendo tensiones en función de la distancia a la fuente de calor. Talero y Muñoz (2000) proponen la ecuación:

$$E_L = 60 \cdot \eta \cdot \frac{U_a \cdot I_s}{v_s}$$

Donde: E_L - energía lineal; J/m

η - eficiencia de la fuente de calor; %.

La eficiencia (η) del proceso de soldadura SMAW oscila entre 0,65 y 0,85 (Cary, 1998). A los efectos de los cálculos realizados se asumió una eficiencia de 0,7.

Para efectuar la soldadura de unión de un recipiente, una estructura o una construcción en particular, es necesario calcular el material de aporte (varillas, alambres, fundentes, electrodos) y el costo total de dicho trabajo.

$$C_e = \frac{S \cdot L_c}{10^6} \delta(1,2)$$

Donde: C_e Cantidad de electrodos; kg

S: Área de la sección transversal de la pieza; cm^2

L_c : Longitud a soldar; (mm)

10^6 : Factor de conversión

δ : peso específico del material; kg/dm³

1,2: Coeficiente que tiene en cuenta las pérdidas por salpicaduras, calentamiento, aprovechamiento del electrodo.

Máquina para soldar

La máquina soldadora del tipo transformador produce corriente alterna. La potencia es tomada directamente de una línea de fuerza eléctrica y transformada en el voltaje requerido para soldar.

La regulación de los parámetros se realizó modificando la velocidad de soldadura, actuando sobre la corriente y la tensión de arco. Se soldó con corriente directa de intensidades de corriente de 105 Amp y 160 Amp a 220 V y con electrodo positivo.

Preparación metalográfica de la probeta

Se realizaron las operaciones de corte, desbaste y pulido, lavado y ataque químico:

Corte: Las muestras con longitud de 15 x 15 (norma ASTM E3-95) se prepararon en una fresadora del tipo 6 H 82 Г. El corte se realizó con una fresa de disco marca P 6 M 5 de diámetro 80 mm y 12 dientes. Las probetas se elaboraron con abundante refrigeración, para lograr una superficie con la menor cantidad posible de rugosidad superficial. Cada corte proporcionó dos secciones transversales de la unión, donde no se aprecian poros, inclusiones de escoria, agrietamiento, falta de penetración, socavamiento ni exceso de sobremonta.

Desbaste y pulido: El pulido se hizo con papeles abrasivos (tipo 180, 400 y 600). En el pulido fino se empleó pasta abrasiva (GOI), sobre discos provistos de motas. El pulido se llevó a cabo con la lija sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro, de manera que se elimine la capa de metal distorsionado. Las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL. Para el acabado se utilizó un paño de fieltro y como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Limpieza y lavado de las superficies a investigar: Una vez pulida las probetas se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con tetracloruro de carbono para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

Ataque químico: Para atacar el material se empleó nital al 2 %, mezclando 2 ml de ácido nítrico (HNO_3) y 100 ml de alcohol etanol de 3 s a 5 s. Preparado el reactivo, se vertió un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se analiza la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada.

Ensayo de microscopía óptica

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL, modelo NIM-100, con cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe.

Comportamiento microestructural

Se observó una muestra patrón de acero AISI 1025, la cual se empleará para establecer la comparación en las microestructuras obtenidas luego de realizado el proceso de soldadura con electrodos revestidos del tipo E 6010 y el electrodo E 7018. La Figura 1 se corresponden con la estructura metalográfica del acero AISI 1025.



Figura 1. Microestructura del acero AISI 1045.

Los granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras) presentan una estructura bandeada como resultado del proceso de conformado en caliente de este material. Se seleccionó la zona del metal base, lo más alejado de donde pudiera tener influencia el ciclo térmico de soldadura. El objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que permita determinar posibles cambios ocurridos tanto en la ZF como en la influencia térmica.

Ensayo de dureza

Las mediciones fueron realizadas con un durómetro Rockwell, usando una carga de 100 kgf/mm^2 (10 MPa) en la escala Rockwell C para el material base y 310 kgf/mm^2

(31 MPa) en la escala Rocwell C para el material de aporte, con un indentador con punta de diamante. Se realizaron un total de cinco mediciones para cada caso posible por cordón con una separación entre lectura y lectura de un milímetro y se promediaron dichos valores. Se realizaron tres barridos: barrido 1: zona superior; barrido 2: zona central; barrido 3: zona inferior.

El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve solo como comparación entre materiales o tratamientos. El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tratamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metálica resultan generalmente en un cambio de dureza. Cuando se establece el valor resultante de la dureza de un tratamiento térmico a un material dado por un proceso determinado.

Análisis de la composición química

Para el análisis químico del material base y de la zona fundida (Tabla 2) se empleó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la zona fundida se observa una variación en el porcentaje de los elementos, disminución del carbono e incremento del manganeso y del silicio; elementos que durante el ciclo térmico de soldadura pueden formar carburos de manganeso y silicato, propensos a la fragilidad de la unión soldada.

Tabla 2. Composición química del material base y de la zona fundida

	C %	Mn %	Cu %	Si %	Cr %	Ni %	Fe %
Material base	0,24	0,98	0,03	0,31	0,05	0,08	97,96
Zona fundida	0,17	1,38	0,05	0,58	0,05	0,08	97,39

Análisis del cálculo del calor aportado

El acero AISI 1025 está constituido por una estructura de hierro α , al calentarlo, los cambios en la microestructura no son apreciables. Sin embargo, cuando en estos tipos de acero se realiza unión de soldadura con materiales de aporte que depositan alto contenido de carbono (0,5-0,9) la microestructura del metal base cambia.

El carbono equivalente se calcula por la ecuación 1, donde se consideran los diferentes elementos que intervienen en la composición química del acero AISI 1025, como son:

-Metal base:

C-0,24 %; Mn- 0,98 %; Cr-0,05 %; Ni-0,08 %.

$$C_{eq} = 0,24 \% + \frac{0,98}{6} + \frac{(0,05\%+0+0)}{5} + \frac{0,08+0}{15} = 0,41 \%$$

El carbono equivalente para el AISI 1025 es de 0,41 %. Se manifiesta que la cantidad de carbono afecta en el proceso de soldadura cuando el proceso se realiza con electrodo E 6010; un material con estas propiedades está considerado dentro del grupo de acero que presenta buena soldabilidad. Al analizar el material de aporte se aprecia que el carbono equivalente se encontrará en este intervalo, son los elementos del material de aporte lo que confieren a la zona fundida (ZF) y a la zona de influencia térmica un incremento en la dureza, la resistencia al desgaste y a la corrosión.

Análisis del ciclo térmico

En la Tabla 3 aparecen los resultados de los regímenes de soldadura. Las variables I_s , U y E_L son los parámetros que definen la reducción de tenacidad de la ZAT del electrodo con respecto a la ZAT de la junta similar; la cual está relacionada con el contenido de carbono en la composición química de la varilla donde se registra que el aumento de carbono en un acero reduce su tenacidad.

Tabla 3. Resultados de los regímenes de soldadura

Ecuación	Variabes	E 6010 M	E 7018	Unidad
1	I_s	120	160	A
2	U	16	18	V
3	Q	1 714, 2	2 571,4	kJ/mm
4	E_L	71 996,4	107 982	J/m
5	Ce	0,04	0,02	kg

Durante el calentamiento los granos iniciales del metal base se transforman y pueden alcanzar otro tipo de fase al superar la temperatura crítica. Luego de alcanzar esta temperatura, en el cambio de fase, la fase de formación que se obtiene puede tener un crecimiento relativamente lento superior hasta alcanzar la temperatura de sobrecalentamiento que es 1 200 °C, una vez alcanzada esta temperatura la celeridad de crecimiento, de la fase que se obtiene, puede incrementarse.

La zona adyacente a la zona de fusión puede superar esta temperatura y el crecimiento aumenta consiguiendo la formación de la región microestructural de grano grueso. En la zona de grano mixto la celeridad del crecimiento pueda disminuir y los

granos crecen en menor proporción que en la zona anterior, ya en la zona de grano fino el crecimiento de grano es de forma lenta.

Análisis de los regímenes de corte

La velocidad de corte se determinó teniendo en cuenta el diámetro de la fresa (120 mm) y el número de revoluciones (250 rev/min). Al sustituir en la ecuación 2, considerando la fricción entre la herramienta y el metal base y las condiciones de refrigeración, se tiene que la velocidad de corte a emplear es:

$$V_c = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 250}{1000} = 94,2 \text{ m/min}$$

La velocidad de corte calculada permite realizar el corte de la pieza sin dañar la superficie que luego será analizada. Durante el corte se precisó de abundante refrigeración para evitar el efecto de la acritud. El tiempo de maquinado calculado por la ecuación 3 fue de tres minutos para cada probeta.

Análisis de la dureza longitudinal

La evaluación de la dureza se realizó en dos ensayos diferentes. Para la dureza longitudinal solo se reportan los valores en el material de aporte a nivel superficial y se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Dureza en los cordones con electrodos E 6010 (un pase)

Probetas	Dureza	Promedio
1	35 - 31 - 35 - 34 - 34 - 36 - 32	33
2	34 - 34 - 33 - 34 - 34 - 34 - 33	34
3	34 - 39 - 39 - 36 - 36 - 31 - 38	36
4	35 - 37 - 37 - 37 - 38 - 37 - 35	36,5
5	35 - 36 - 34 - 35 - 37 - 37 - 37	35,8
6	35 - 37 - 36 - 36 - 35 - 37 - 38	36,2
7	33 - 35 - 35 - 36 - 35 - 32 - 35	34,4
8	36 - 32 - 36 - 35 - 36 - 35 - 35	35
9	36 - 38 - 36 - 37 - 36 - 37 - 35	36,4
Promedio general		35,2

Los cordones evaluados muestran variaciones en cada una de las mediciones a lo largo del ensayo, pero las mismas no representan diferencias significativas. Las durezas reportadas en todos los ensayos consecuentes son el promedio de dichas mediciones; esta dureza reportada no afecta la integridad del elemento soldado.

Tabla 5. Dureza de las muestras con cordones de dos pases (E 7018)

Probetas	Dureza	Promedio
1	33 - 30 - 32 - 31 - 31 - 32 - 32	31,5
2	31 - 31 - 31 - 33 - 32 - 30 - 32	31,4
3	32 - 31 - 32 - 32 - 33 - 32 - 32	32
4	33 - 32 - 32 - 33 - 31 - 32 - 33	32,2
5	32 - 33 - 32 - 32 - 31 - 33 - 32	32,1
6	32 - 33 - 32 - 31 - 30 - 33 - 31	31,7
7	32 - 31 - 31 - 30 - 30 - 31 - 32	31
8	30 - 33 - 32 - 33 - 30 - 31 - 30	31,2
9	33 - 31 - 31 - 30 - 31 - 32 - 31	31,2
Promedio general		31,5

En las probetas con el depósito del electrodo E 7018, la dureza en términos generales no sufre variaciones amplias, pero se delimita un decrecimiento en el valor de las mismas a medida que aumenta el número de pases. A partir de los valores reportados, se puede afirmar que todas las durezas del depósito se encuentran entre 31-33 HRC, por tanto, los cordones presentan buena resistencia.

Cuando se realiza soldadura multipasadas esta se convierte en un tratamiento térmico de recocido, lo que conlleva a la disminución de la dureza anterior del depósito con electrodos E 7018.

En las probetas ensayadas con tratamiento térmico de recocido se puede observar que la dureza, en términos generales, no sufre variaciones amplias, existe solamente una pequeña oscilación de los valores. Entre las diferentes pasadas se produjo un revenido de los cordones previos, lo cual se refleja a través del oscurecimiento de la martensita, debido a la precipitación de carburos, que fue mayor en la primera capa y fue disminuyendo hasta desaparecer en la última capa. Las zonas afectadas por el calor pueden producir una importante caída de dureza.

Caracterización microestructural de la zona fundida

Para la caracterización se analizó la zona fundida con material de aporte E 6010 y la zona de influencia térmica de la unión soldada.



Figura 2. (a) Zona fundida borde superior; (b) Zona fundida (centro); (c) Zona fundida borde inferior.

En la Figura 2 se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido, observado a 200 X (50 μm). En una zona cercana al borde se divisa la presencia de una red de ferrita en forma de placa (zonas claras), estructura equiaxial con una distribución del grano en forma homogénea. Se observa una estructura perlítica que corresponde a las zonas grises típica de un acero de bajo carbono. Se ve en las microestructuras una sección de estructuras del tipo ferrita, de perlita, de zonas claras y oscuras, respectivamente. La austenita se muestra en los límites de grano. La Figura 2(a), correspondiente a una sección del cordón, muestra la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

En las microestructuras no se revelan defectos típicos como falta de fusión y penetración del cordón, presencia de poros, inclusiones, microgrietas, lo que demuestra buena aplicación del cordón. En el detalle (c) se aprecia una microestructura más fina que la presentada por el material base en el detalle (b), debido a un proceso de recristalización forzada por un incremento en la temperatura y el posterior enfriamiento brusco de las zonas cercanas a la zona de fusión, generándose una zona de grano más fina, que trae como consecuencia una diferencia en cuanto a las propiedades mecánicas.

Comportamiento microestructural para la ZIT

En la Figura 3 se muestra el perfil microestructural del depósito (ZIT del cordón de soldadura) para probetas soldadas con electrodos E 6010.

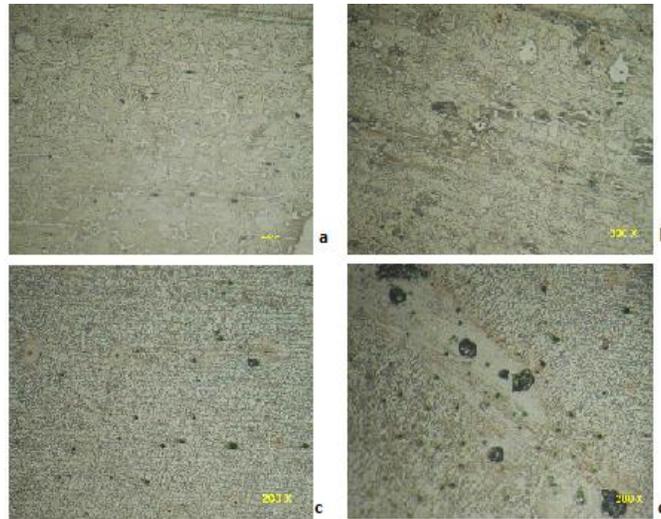


Figura 3. (a) Zona IT borde superior; (b) Zona IT (centro); (c) Zona IT borde inferior; (d) Zona de la interfase.

En la Figura 3(a) se muestra un detalle de la intercara del cordón, zona afectada por el calor. A mayor resolución se puede apreciar una variación morfológica local, comparando la microestructura desarrollada en el cordón con la de la zona afectada.

Esta diferencia está dada por la formación de una zona interfacial característica de estos procesos conocidos con el nombre de "Zona de Fusión del Material Base". En la unión soldada, la intercara de la soldadura es un estrecho límite que separa la zona de fusión del material de aporte del electrodo, de la zona afectada por el calor, constituida por una banda completa y delgada de metal base parcial o completamente fundido durante el proceso de fusión, el cual se ha solidificado inmediatamente después, pero antes de mezclarse con el metal en la zona del cordón. Por tanto, su composición química es idéntica a la del metal base.

En la imagen se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, perlita, zonas claras y oscuras, respectivamente. La austenita presente se muestra en forma de granos. La Figura 3(d) muestra una sección de la probeta correspondiente a la interfase del cordón, donde se observa la presencia de martensita, en color más oscuro, sobre una matriz de austenita retenida.

Comportamiento microestructural de la ZF con electrodo E 7018

El estudio de microscopía óptica realizado a la ZF permite observar el tamaño de grano promedio, la distribución de los microconstituyentes y algunos aspectos morfológicos

que surgieron durante el ciclo térmico de soldadura aplicado al mismo. La observación se realizó en el plano paralelo a la dirección de laminación, en la sección longitudinal.

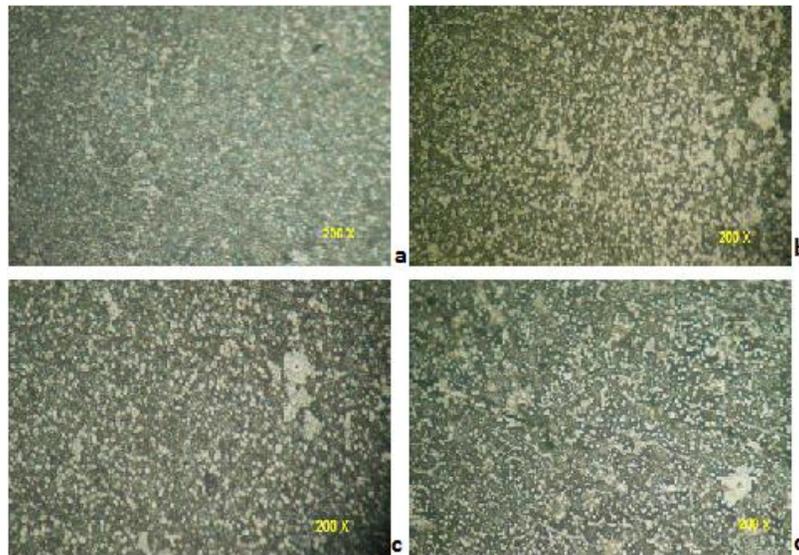


Figura 4. (a) Zona fundida borde superior; (b) Zona fundida (centro); (c) Zona fundida (centro); (d) Zona fundida (borde inferior).

La Figura 4 muestra una sección de la zona fundida del depósito, realizado con el electrodo E 7018, donde está presente la martensita en color más oscuro sobre una matriz de austenita retenida, representada por las zonas blancas (Figura 4a). Las zonas más oscuras de la microestructura representan la presencia de martensita, pero en forma masiva.

La microestructura en el material de aporte (4b), para dos pases, corresponde a una estructura de matriz austenítica con la presencia de martensita y la probeta (4d) posee una estructura de matriz austenítica con la aparición de carburos. Pero los resultados mostrados en la dureza nos indica que la dureza de la primera probeta es mayor, lo cual se corresponde con la teoría que explica que las estructuras martensíticas presentan la mayor dureza.

Comportamiento microestructural de la ZIT con electrodo E 7018

En la Figura 5 se muestra un detalle de la intercara del cordón zona afectada por el calor. Se puede apreciar una variación morfológica local, comparando la microestructura desarrollada en el cordón con la de la zona afectada por el calor.

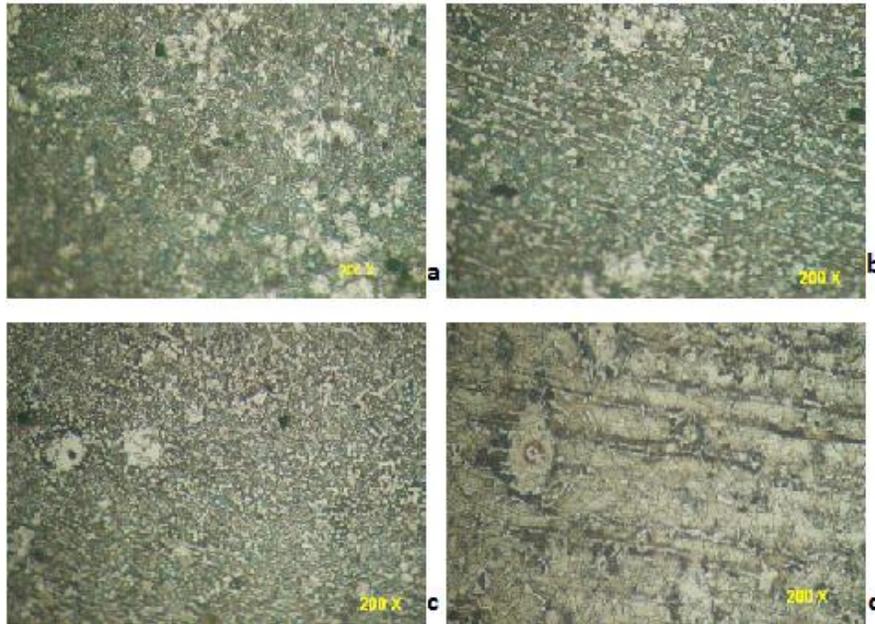


Figura 5. (a) Zona IT borde superior; (b) Zona IT centro; (c) Zona IT centro; (d) Zona IT borde inferior.

En la Figura 5 se presenta la microestructura del recubrimiento obtenido en la ZIT con el electrodo E 7018. La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón en la zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis. En la Figura 5(a) se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten y granos bien definidos de ferrita. La fotografía de la derecha (5b) muestra una sección del cordón donde se puede observar la presencia exclusiva de carburos en los límites de grano en una matriz austenítica.

Al aplicar al cordón un tratamiento térmico posterior las fases presentes son una matriz de austenita y martensita y presentan la forma de grano irregular, característica de dicha estructura con una distribución similar (Figura 5c). En la Figura 5(d) se muestra una sección de estructuras del tipo ferrita, de perlita, con zonas claras y oscuras, respectivamente. La austenita está presente en los límites de grano. Al aplicar en el cordón un tratamiento térmico posterior de temple, las fases presentes son Widmannstätten, perlita y ferrita; presentando la perlita y la ferrita tamaño de grano similar y la ferrita una distribución mayor.

En la región sobrecalentada de grano grueso, la ferrita proeutectoide se nuclea en las juntas del grano austenítico y forma también agujas dirigidas hacia el interior de los

granos grandes existentes (estructura de Widmanstaetten). Estructuras similares aparecen también en el enfriamiento del metal fundido.

Las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor varían con respecto al acero base y se notará un ligero aumento en la dureza, límite elástico y resistencia a la tracción, mientras que la estructura de la zona recalentada (estructura Widmantaetten) suponen una disminución de la resiliencia y como consecuencia un aumento en la fragilización, que en algunos casos se recomienda un posterior tratamiento térmico con la finalidad de regenerar el grano.

Análisis microestructural de la interfase del cordón

La Figura 6 muestra cortes transversales de las probetas soldadas, donde se observa el metal base, el material recargado y el bajo nivel de defectos macroscópicos (poros, inclusiones de escoria, fisuras). Sobre los cortes transversales de los cupones soldados se aprecia que para las probetas soldadas con electrodo E 7018, la composición del depósito es diferente al del electrodo E 6010. Se obtuvo un mayor espesor, así como un mayor ancho de cordón.

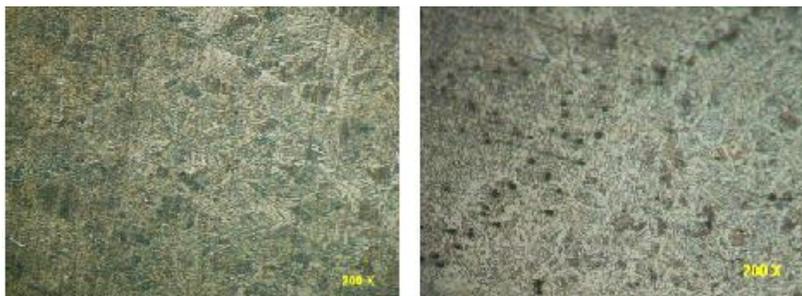


Figura 6. (a) Zona interfase borde superior; (b) Zona interfase (centro).

Durante el Post Welding Heat treatment (PWHT) tiene lugar la difusión de elementos segregados durante el proceso de solidificación, disminuyendo el gradiente de concentración de los mismos. Como consecuencia, la austenita retenida ya no se inestabiliza (6a) y puede transformarse en martensita (6b). La distribución de los mismos es relativamente uniforme a través de los mapeos de composición química.

La Figura 6(a) muestra la fase martensita y la austenita retenida así como la evolución microestructural en función de la distancia a la línea de fusión. La martensita se muestra más oscura en la zona inferior, debido al revenido que realizaron los sucesivos

cordones depositados, con la consecuente precipitación de carburos. Este efecto disminuye a partir de los 5 mm, estando prácticamente ausente en la superficie.

Análisis macrográfico de la unión soldada

En la muestra preparada con procedimiento de soldadura y sin precalentamiento se aprecia buena fusión del material de aporte (MA) y del material base (MB), libre de poros y fisuración.

La Figura 7 muestra la macrografía de la unión soldada con procedimiento de soldadura con el depósito de electrodos E 6010 y E 7018, sin precalentamiento, antes y después del proceso de la unión soldada.



Figura 7. Unión desarrollada con electrodos E 6010 y E 7018.

Mediante el precalentamiento se reduce la caída de temperatura y el riesgo de agrietamiento. Los índices de expansión y contracción queman la grasa, modifican la forma del cordón, evitan la fractura frágil y permiten la difusión del hidrógeno, con una temperatura de 150 °C como mínimo y 185 °C como máximo. La selección del metal de aporte se realizó en función de su resistencia mecánica a la tensión, la cual debe ser igual o superior al material base.

Conclusiones

El acero AISI 1025 se considera un acero de buena soldabilidad por presentar un 0,25 % C, sin embargo, el depósito con electrodos E 6010 incrementa la dureza hasta 36,5 HV, con respecto al electrodo E 7018 que es de 32,2 HV, por lo que los cordones no requieren de un tratamiento térmico para evitar el agrietamiento.

Las microestructuras obtenidas tanto en la zona fundida, en la zona de influencia térmica y en la interfase del cordón, con depósito de electrodos E 6010 y E 7018, son del tipo ferrita, de matriz austenítica, con presencia de martensita y estructura aislada

del tipo ferrita Widmannstätten, las cuales no se caracterizan por provocar agrietamiento en uniones soldadas.

Referencias bibliográficas

ARAQUE, O. & ARZOLA, N. 2013: Estado del arte sobre la integridad estructural de uniones soldadas y modelos de propagación de grietas para la gestión de vida en estructuras. *Revista chilena de ingeniería* 21(2): 279-292.

CARY, H. 1998: *Modern Welding Technology*. 4^{ta} ed. Prentice-Hall, New Jersey, 736 p.

MADDOX, S. 1994: Applying Fitness-for Purpose Concepts to the Fatigue Assessment of Welded Joints. In: The International Conference on Fatigue. Toronto, Canada. Vol. 1, p. 72-81.

MOHAMMAD, A. 2005: *Structural integrity and fatigue crack propagation Life assessment of welded and weld-repaired structures*. Tesis doctoral. South Dakota School of Mines and Technology.

QUINTERO, M.; CERPA, S.; MEJÍAS, G.; LEÓN, J. & QUINTERO, A. 2006: Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* 56(4): 1-3.

RODRÍGUEZ, H. 1983: *Metalurgia de la Soldadura*. Pueblo y Educación, La Habana, 613 p.

TALERO, J. & MUÑOZ, M. 2000: *Introducción al cálculo de estructuras metálicas según Eurocódigo 3*. España.