

Efecto térmico de la soldadura por arco sumergido en un acero API 5L x42*

René Legrá Rodríguez

rlrodriguez@mecanica.ismm.edu.cu

Alfredo Breffe Fernández

abreffe@ecg.moa.minem.cu

Tomás Fernández Columbié

tfernandez@ismm.edu.cu

Héctor Linares Suárez

hectorls87@nauta.cu

Especialidad: Ingeniería Mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se estableció el comportamiento microestructural de un acero bajo aleado API 5L X42 empleado en línea de tubería, soldado a través del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW). La soldadura se realizó a tope con preparación de los bordes a 30o, en tubería de diámetro de 250 mm; el material de aporte empleado fue el F 48 A0-EL-12 con fundente aglomerado H-400. El análisis microestructural se efectuó en la zona fundida, en la interfase y la zona de influencia térmica; en las cuales se obtuvieron las fases granos finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida del metal base, ferrita de estructura Widmanstätten. Al determinar los perfiles de dureza se obtiene que esta es de 163,8 HV en el metal base, la cual se incrementa hasta 207,6 HV en la zona fundida.

Palabras clave: acero microaleado; microestructura; tubería; fundente; dureza.

* Recibido: 3 febrero 2018 / Aceptado: 29 octubre 2018.

Thermal effect of submerged arc welding on API 5L x42 steel

Abstract: The microstructural performance of a low alloy steel API 5L X42 used in pipeline, welded through the submerged arc welding process (SAW) was established. The welding was done at the top with preparation of the edges at 30°, in a pipe with a diameter of 250 mm; the filler material used was F48 A0-EL-12 with agglomerated flux H-400. The microstructural analysis was carried out in the molten zone, in the interface and the thermal influence zone; where the fine grain phases of the troostitic type and coarse grain with ferrite network and the molten zone of the base metal, ferrite of structure Widmanstätten, were obtained. When determining the hardness profiles, it is obtained that this one is 163.8 HV with the base metal, which increases to 207.6 HV in the molten zone.

Key words: micro-alloyed steel; microstructure; pipeline; flux; hardness.

Introducción

En los últimos años han sido documentados diversos casos de fractura en ductos de transporte de hidrocarburos, los cuales han ocurrido principalmente en soldaduras longitudinales realizadas por el proceso de soldadura por arco sumergido (SAW) en tubos de acero API 5L. Muchas de estas fallas se han presentado durante la operación de dichas líneas, con la consecuente suspensión del servicio. Aún es limitada la información que permita predecir la vida en fatiga de las uniones soldadas de tubos API 5L con costura por soldadura de arco sumergido y considerar así las medidas preventivas para este tipo de fallas de manera oportuna (Jang-Bog & Kwon, 2002; Ishikawa, Shinmiya & Igi, 2006).

El proceso de soldadura por arco sumergido, o método SAW, consiste en la fusión de un electrodo continuo, que puede ser macizo o tubular, protegida por la escoria generada por un fundente, granulado o en polvo, con el que se alimenta el arco por separado. El proceso de arco sumergido permite depositar grandes volúmenes de metal de soldadura de excelente calidad (tasas de deposición de hasta 50 kg/hr) a bajo costo para una amplia gama de aplicaciones. El sistema es automático y posibilita obtener grandes rendimientos en producción (Cisilino, Chapetti & Otegui, 2000).

Plantea Yu-Ichi (2008) que con el proceso de soldadura por arco sumergido pueden conseguirse cordones muy gruesos. Desde el punto de vista de las propiedades mecánicas, resistencia a fisuración, dureza de las zonas afectadas térmicamente y deformación de los materiales que se sueldan, es recomendable y en este proceso con más motivo que en otros de soldadura al arco, comprobar que los cordones no resulten excesivos. Una forma adecuada es cuidando que el aporte térmico no supere el límite que se imponga según la aplicación, el material base y las propiedades que se deseen obtener. En ningún caso se recomienda que dicho aporte supere los 3 kJ/mm.

Según Batista-Sánchez (2015), en una unión soldada realizada mediante el proceso SAW, el material de aporte suministrado por el electrodo formará el metal depositado (MD), el cual deberá ser la parte más resistente en la junta formada. Como referencia se tiene el metal del tubo en el que se aplicará la soldadura, llamado metal base (MB), y la región con microestructura modificada por el calentamiento verificado durante el proceso, conocida como zona afectada por calor (ZAC).

Refieren Nolan, Sterjovski & Dunne (2005) que en este proceso, en los aceros al carbono templeables, la zona del metal base inmediatamente adyacente a la soldadura, puede ser de grano basto, se alcanzan temperaturas en el intervalo de 1 200 °C a 1 550 °C, en tanto, la porción de metal que alcanza las temperaturas comprendidas entre 900 °C a 1 200 °C, sufre una refinación del tamaño de grano. Aunque esta zona no ha sobrepasado la temperatura de transformación, ni la temperatura ni el tiempo de permanencia son lo suficientemente altas como para generar un crecimiento del tamaño de grano.

Jang-Bog & Kwon (2002) realizan un estudio enfocado en la correlación entre el cambio de la microestructura y las características de fractura en la ZAC, tanto en la costura y la circunferencia soldadas para tuberías de acero API 5L los autores obtuvieron valores de energía de impacto en la zona circunferencial soldada de la ZAC, alcanzando valores muy bajos en la línea de fusión, pero esta se incrementaba cuando se alejaba de la línea de fusión. En la zona longitudinal soldada de la ZAC no fue posible encontrar valores de energía de impacto Charpy.

Bang y otros investigadores (2002) desarrollan un modelo axisimétrico, bidimensional (2D), de elementos finitos, para simular la soldadura de un refuerzo metálico circunferencial a un tubo de acero API 5L. En los modelos desarrollados fueron considerados dos criterios límites: 982 °C como temperatura máxima en la superficie interna del tubo y 350 HV como la dureza máxima en la zona afectada por el calor (ZAC) para hidrocarburos no amargos y 250 HV como dureza límite para hidrocarburos amargos. En este artículo fue considerada, también, la termodependencia de las propiedades físicas y mecánicas del acero.

Oddy & Mcdill (1999) reconocen como una necesidad operacional la necesidad de soldar bifurcaciones en las tuberías de gas, con estas totalmente presurizadas. También en este trabajo se mencionó la necesidad de establecer un calor de entrada de la soldadura lo suficientemente bajo para evitar perforaciones en el tubo, de forma tal que pudiera ocurrir agrietamiento en frío. Fue mencionada la dificultad de encontrar datos que muestren las propiedades de los aceros de tuberías en función de la temperatura.

El trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento microestructural de un acero bajo aleado API 5 X 42, empleado en línea de tubería, soldado a través del proceso de soldadura por arco sumergido (SAW).

Desarrollo experimental

Composición química de los materiales

La composición química del material se determinó mediante análisis espectral. Se utilizó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 se muestra la composición química.

Tabla 1. Composición química del acero API 5L X42, en %

Grado	C	Mn	Si	P	S
API 5L*	0,3	1,2	0,20	0,018	0,010

*API 5L Especificación para tubería de línea

Según la composición química se corresponde a un acero microaleado, los cuales poseen, en su forma más sencilla, una microestructura ferrita/perlita y una composición similar al de los aceros al carbono, pero normalmente contienen un mayor contenido de manganeso entre 1,4 % y 1,7 %, con adiciones de microaleantes de aproximadamente de 0,1 % en total, lo cual les proporciona a los mismos propiedades mecánicas superiores a las de los aceros de bajo carbono.

Elaboración de la soldadura

Esta se realizó sobre la sección de la tubería preparada para la unión (Figura 1). Se colocó la tenaza de soldadura en un ángulo aproximado a los 90° con respecto al metal base, con una distancia pieza-electrodo de 3 mm (aproximadamente el diámetro del electrodo); se determinó el tiempo y la distancia recorrida durante el proceso (distancia entre la marca inicial y la marca final) para obtener la velocidad de avance (Vs).

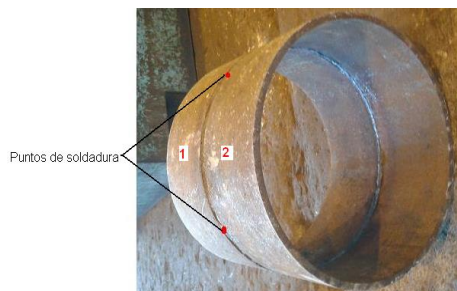


Figura 1. Preparación del área para la soldadura.

La preparación de la unión fue a tope, con preparación de bordes a 30°, en una tubería de diámetro 250 mm, para efectuar soldadura multipasadas en proceso de arco sumergido. La soldadura de múltiples pases es más propensa a las inclusiones de escoria que la soldadura de un solo pase. El atrape de la escoria puede ocurrir cuando esta se mezcla con el baño de fusión o cuando la escoria presente en la superficie no es completamente removida, cubriéndose los pases sucesivos.

Material de aporte para la soldadura

El material de aporte empleado para la soldadura y sus características principales se muestran en la Tabla 2. Se clasifica según la norma AWS: F 48 A0-EL-12.

Tabla 2. Composición química del material de aporte, en %

C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cr
0,05	1,20	0,55	0,01	0,006	0,02	< 0,01	0,01

Es un alambre de bajo contenido de carbono, de manganeso y de silicio. Presenta excelente ductilidad y resistencia al agrietamiento. La delgada capa de cobre en su superficie mejora el contacto eléctrico entre este y la boquilla, mejorando la estabilidad del arco y aumentando la vida de esta última.

En el sistema de soldadura por arco sumergido se utiliza un alambre sólido recubierto por una capa de cobrizado, para evitar su oxidación y mejorar el contacto eléctrico. Generalmente contiene elementos desoxidantes, que junto a los que aporta el fundente, limpian las impurezas provenientes del metal base o de la atmósfera y proporcionan elementos de aleación seleccionados, según sean las características químicas y mecánicas del cordón de soldadura que se desee.

En el proceso de soldadura se empleó el fundente aglomerado H-400, el cual está diseñado para ser utilizado en uniones de una o varias pasadas. Su escoria es de fácil desprendimiento y deja cordones de excelente apariencia. Se recomienda para soldaduras de acero dulce y baja aleación que requieran una resistencia a la tracción mínima de 420 MPa a 490 MPa. El envase es en sacos de 40 kg.

Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3-95, 2001 y Norma NC 10-56: 86). En el desbaste se emplearon papeles abrasivos del tipo No. 400, 600 y 800 (ASTM E 3-95, 2001). Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Una vez pulidas las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro; se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono (Cl_4C) para evitar cualquier vestigio de grasa y pasta de pulir. Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante cinco segundos con el reactivo nital al 4 % (mezcla de 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 100 mL de alcohol etanol (ASTM E-262 Practice A, 2015). Para el ataque de la parte inferior del vástago se empleó el agua regia al 10 %. Mezcla de 10 mL de ácido nítrico (HNO_3) y 30 mL de ácido clorhídrico a temperatura ambiente y durante cinco minutos.

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca NOVEL, dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador, en la cual se encuentra un programa analizador de imágenes tomadas desde la cámara donde se evalúan las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos.

Ensayo de microscopía óptica

Se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM-100; está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Para colocar las probetas en el microscopio se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada de estas. La Figura 2 se corresponde con la estructura metalográfica del acero API 5L.

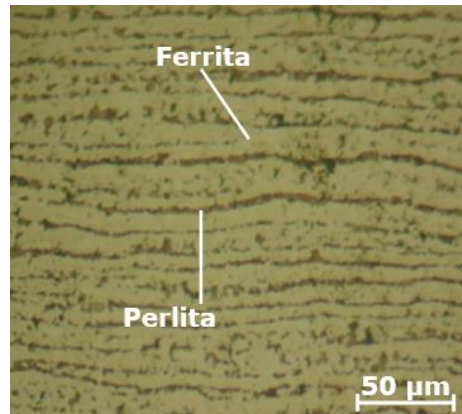


Figura 2. Microestructura del acero API 5L.

En la microestructura del acero API 5L se observa una estructura de ferrita + perlita. Se observan los granos de ferrita (zonas blancas) y colonias de perlita (zonas oscuras), presentando una estructura bandeada, como resultado del proceso de conformado en caliente de este material.

El análisis empleado para la medición de la dureza fue el Vickers, con tres mediciones realizadas aleatoriamente en la superficie de las muestras. Considerando las características metalúrgicas de las uniones soldadas tipo SAW en tubos de acero API 5L X42, se definieron tres regiones de interacción, que son en el MB-ZAC-ZF. En la Figura 3 se muestra el barrido realizado.

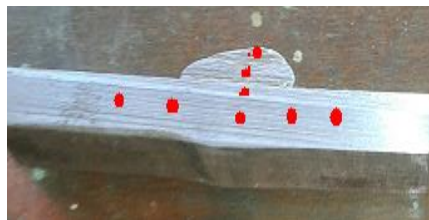


Figura 3. Barrido de dureza.

Se realizaron un total de cinco mediciones para cada caso posible por cordón, con una separación entre lectura y lectura de un milímetro, además se promediaron dichos valores.

Barrido 1: Zona superior

Barrido 2: Zona central

Barrido 3: Zona inferior.

Resultados y discusión

Análisis de las micrografías del cordón de soldadura

Se realizó un análisis de las microestructuras en la raíz del cordón. En las Figuras 4(a) y 4(b) se muestra el comportamiento obtenido. Estas variaciones están asociadas al ciclo térmico introducido al material base, la utilización del tipo de alambre, así como del tipo de fundente. Existen otros parámetros que también afectan la geometría del cordón, como la altura del electrodo, la separación de este, así como el ángulo en que se posicionen. Sin embargo, su influencia es menor, además de que dichas variables generalmente se mantienen constantes.

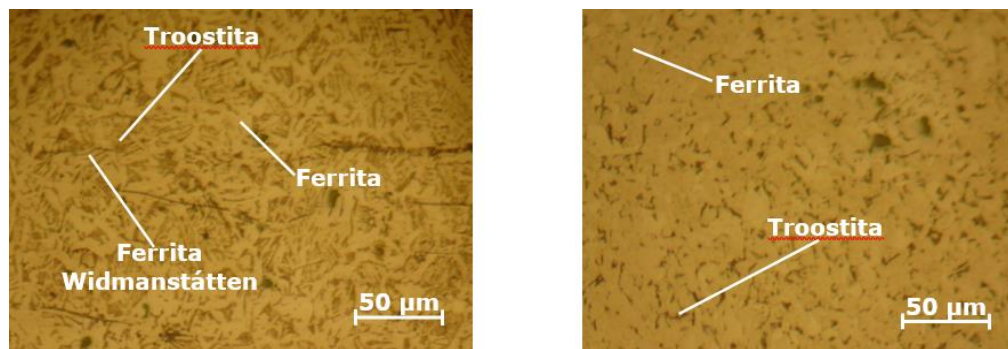


Figura 4. (a) Raíz del cordón (transversal). (b) Raíz del cordón (longitudinal).

Se puede observar que en la unión soldada la estructura del metal depositado presenta un fondo de granos muy finos del tipo troostítico y grano grueso con red de ferrita y la zona fundida del metal base (parte clara) presenta granos finos, alineados y aciculares (estructura Widmanstátten). Se aprecia el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un reacomodo columnar típico de la solidificación del metal. Los resultados de estos ensayos muestran una estructura de forma de ferrita acicular en la superficie del cordón, en la zona media se observa ferrita más ferrita acicular en regiones preferenciales, en la parte inferior del cordón se encontró ferrita. La estructura ferrita acicular se forma a partir de un enfriamiento rápido.

Análisis en la interfase del cordón

La forma de los granos en la zona de fusión es controlada por la forma de la pileta líquida a través de la acción de un fenómeno conocido como crecimiento competitivo (se le llama así porque los nuevos granos columnares que están creciendo compiten

entre sí para crecer uno a expensas del otro, según favorezca su orientación cristalográfica). Las Figuras 5(a) y 5(b) se corresponden con la interfase.

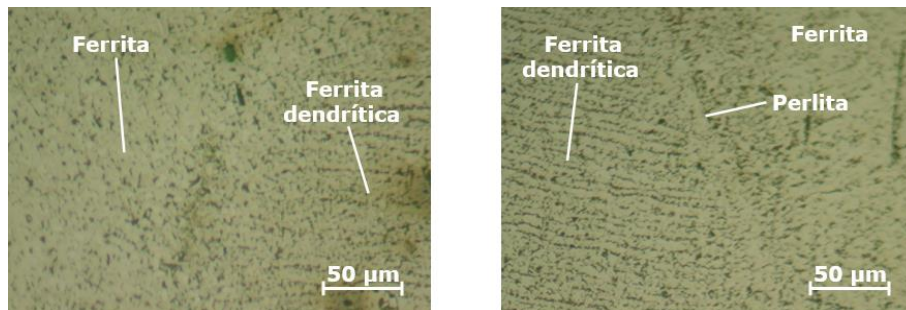


Figura 5. Interfase del cordón.

Como se observa en ambas microestructuras, la dirección principal de crecimiento durante la solidificación de la soldadura por fusión es la misma que la dirección de extracción de calor, es aproximadamente perpendicular a la interfase sólido-líquida en todos los puntos de la pileta. Sin embargo, el crecimiento de cada grano individual tiende a dirigirse en forma paralela a una dirección cristalográfica en particular, llamada dirección de fácil crecimiento.

En esta zona se ha obtenido un tamaño de grano similar al del metal base. Su microestructura se compone de granos poligonales de ferrita con una ligera mezcla de granos aciculares y perlita fina. El intervalo de temperaturas alcanzado en esta zona es de 950 °C a 1 250 °C aproximadamente. A estas temperaturas la perlita se convierte en austenita durante el ciclo de calentamiento de la soldadura, que se transformará en finos granos de ferrita y perlita durante el enfriamiento.

Análisis de la zona de influencia térmica

Los posibles defectos que pueden inducir a una rotura catastrófica de sus elementos estructurales se encuentran fundamentalmente localizados en la zona afectada por el calor (ZAC), región que abarca varios milímetros desde la línea de fusión de la soldadura. Los cambios microestructurales que en esta región se producen son debidos a la energía calorífica aportada por la soldadura y cuyo ciclo térmico genera productos de transformación, que dependen fundamentalmente de la temperatura alcanzada, velocidad de enfriamiento y composición química del material base. Las Figuras 6(a) y 6(b) se corresponden con la ZAC en la unión soldada.

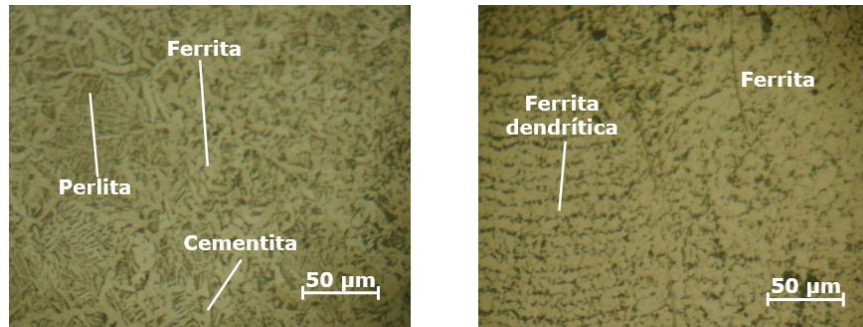


Figura 6(a). Zona influencia térmica (ZIT).

Esta zona está próxima a la línea de fusión y forma parte de la zona supercrítica de la ZAC, cuya temperatura está por encima de 1 100 °C; la microestructura del material base se destruye completamente y una nueva microestructura surge, dependiendo de la composición química. Los granos de ferrita de esta zona son mayores que los del material, lo que quiere decir que la microestructura del material base cambia totalmente, granos grandes y bien delimitados, como corresponde a una zona que alcanzó plenamente el campo austenítico; se observan lajas de cementita, estrechas y delgadas, en direcciones preferentes.

Análisis microestructural en la dirección longitudinal del cordón

Las probetas fueron cortadas en ángulo con respecto a la dirección del cordón. Se realizó una medición del tamaño de grano columnar en la soldadura, ya que el plano obtenido con dicho corte corresponde a una dirección perpendicular al crecimiento de dichos granos. Las Figuras 7(a) y 7(b) muestran este comportamiento.

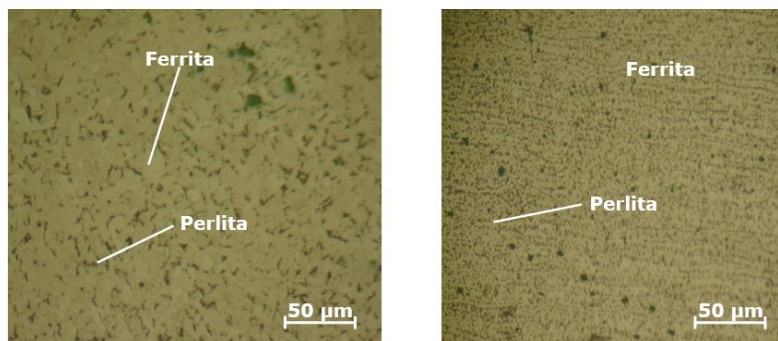


Figura 7. (a) Zona fundida. (b) Zona de Influencia térmica.

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía que muestra el cordón en la zona fundida y en la zona afectada por el calor y la sección

tomada en la probeta para el análisis siguiente. Se muestra una sección de estructuras del tipo ferrítica, pero refinada y austenita retenida. En la primera, se puede apreciar un tamaño de grano mayor que en la ZAT y la presencia de porciones pequeñas de ferrita. Esta estructura implica un valor de dureza ligeramente superior al que se mide para el metal base después del proceso de soldadura, por tener una buena penetración y fusión de la soldadura y presentar una superficie más uniforme.

Análisis del ensayo de dureza

El análisis de la dureza se consideró con el barrido en la zona superior del cordón (pileta), en la zona central del cordón y en la zona inferior del cordón. En la Tabla 3 se muestra el comportamiento obtenido de esta propiedad.

Tabla 3. Durezas obtenidas en las diferentes zonas

Zona	Dureza HV					Promedio HV
MB	166	164	163	164	164	163,8
ZF	208	206	208	208	208	207,6
ZAC	178	180	182	184	184	181,6

En el barrido de dureza se observa que el último cordón de relleno presenta una mayor dureza debido a la estructura formada, mayoritariamente constituida de ferrita acicular y estructura dendrítica. Los cordones anteriores a este presentan una menor dureza, ya que se ven afectados por el calor generado durante la ejecución de los pases posteriores. La zona afectada por el calor cercano a la raíz del cordón es la que presenta menor dureza, motivado porque la zona es afectada por el calor generado por el pase de raíz y los pases de relleno, creando una condición que simula a un recocido.

Para tener un criterio de evaluación se toma el Anexo I del código AWS D1.1(2000), el cual en el punto I 3.3 refiere que, según pruebas de laboratorio, la fisuración en la zona afectada por el calor de juntas en filete no ocurre si esta zona presenta durezas por debajo de 350 HV, aún para electrodos de alto hidrógeno. Para electrodos de bajo hidrógeno, durezas de 400 HV pueden ser toleradas sin fisuración. Se considera que la soldadura del acero API 5L X42 con proceso de soldadura SAW, por los resultados de las microestructuras y de la dureza, no debe presentar fisuración.

Conclusiones

El ciclo térmico de la soldadura de la junta generó en la zona térmicamente afectada por el calor granos muy finos del tipo troostítico y granos gruesos con red de ferrita y la zona fundida del metal base, alineados y aciculares en la dirección horizontal y en forma de banda ferrítico-perlítico en la dirección horizontal.

En el análisis de dureza se pudo determinar que esta es superior en la pileta del cordón (207,6 HV) y que en la medida que se depositan los demás cordones, esta disminuye (181,6 HV) producto del recocido al que se someten los mismos durante el proceso.

Referencias bibliográficas

ANSI, C. C. AWS D1. 1/2000. 2000. *Publicaciones AWS, USA*.

ASTM E3-95. 2001. Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM A262-15. 2015. Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels. ASTM International, West Conshohocken, PA.

BATISTA-SÁNCHEZ, W. 2015. *Efecto térmico de la soldadura por arco sumergido en un acero bajo aleado*. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

BANG, I.; SON, Y.; OH, K.; KIN, Y. & KIM, W. 2002. Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines. *Welding Research Supplement, Welding Journal* 34(12): 273-282.

CISILINO, A.; CHAPETTI, M. & OTEGUI, J. 2000. Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines. *International Journal of Pressure Vessel and Piping* 79(12): 67-76.

ISHIKAWA, N.; SHINMIYA, T. & IGI, S. 2006. Toughness evaluation on seam HAZ of high strength line pipe. *International Journal of Fracture* 23(3): 23-32.

JANG-BOG, J. & KWON, D. 2002. The effect of microstructural change on fracture behavior in heat-affected zone of API 5L pipeline steel. *International Journal of Fracture* 12(2): 10-18.

NOLAN, D.; STERJOVSKI, Z. & DUNNE, D. 2005. Hardness prediction models based on HAZ simulation for in - service welded pipeline steels. *Science and Technology of Welding and Joining* 6(10): 681-694.

ODDY, A. & MCDILL, J. 1999. Burn through prediction in pipeline welding. *International Journal of Fracture* 97(4): 249-261.

YU-ICHI, K. 2008. Overview of recent Welding technology relating to pipeline construction. *Transactions of JWRI* 37(1): 1-5.