



Efecto térmico de la soldadura por arco sumergido en un acero bajo aleado*

Wilber Batista Sánchez

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

Resumen: Se propuso establecer la relación microestructura-propiedades en la zona fundida y en la zona de influencia térmica de un acero bajo aleado al manganeso, unido mediante el proceso de soldadura bajo arco sumergido. Se estableció el procedimiento de cálculo a considerar durante el proceso de soldadura en la junta de la línea de tubería, fabricada de acero del tipo API 5 L. En el análisis de dureza se determinó que la misma es superior en la piletta del cordón (207,6 HRB) y que en la medida en que se depositan los demás cordones esta disminuye (181,6 HRB), producto del recocido al que se someten los mismos durante el proceso. El análisis de las áreas de las juntas de soldar diseñadas, los procedimientos de soldadura y la preparación de las piezas a soldar pueden proveer oportunidades para minimizar costos.

Palabras clave: Soldadura por arco sumergido; acero; microestructura metálica.

* Trabajo tutorado por el Dr. C. Tomás Fernández Columbié.

Recibido: 18 febrero 2016 / Aceptado: 30 agosto 2016.

Thermal effect of the arc welding immersed in low alloyed steel

Abstract: It was proposed to establish the microstructure-properties relationship in the molten zone and the zone of thermal influence of low alloyed steel manganese coupled by the welding process under submerged arc. The calculation method to take into consideration was established during the weld process on the joint of the pipeline, made of steel API 5L. It was determined by the hardness analysis that it is superior in the sink of the cord (207, 6 HRB) and that to the extent that the other strands are deposited, it decreases (HRB 181.6) as a result of the annealing they are subjected to during the process. The analysis of the boards designed welding areas, the welding procedures and the preparation of the pieces to be weld can provide opportunities to minimize costs.

Key words: submerged arc welding; steel; metallic microstructure.

Introducción

La soldadura de aceros es empleada en la fabricación de tubería de gran diámetro para la conducción de petróleo y sus derivados. Los esfuerzos a los que están sometidos las estructuras de tuberías para el transporte de fluido, acompañados por la agresividad del medio ambiente, son elementos a considerar para establecer los posibles defectos que pueden inducir a una rotura de sus elementos estructurales, que se encuentran localizados fundamentalmente en la zona afectada por el calor (ZAC), región que abarca varios milímetros desde la línea de fusión de la soldadura (L.F.).

Los cambios microestructurales que en esta región se producen se deben a la energía calorífica aportada por la soldadura, cuyo ciclo térmico genera productos de transformación, los que dependen fundamentalmente de la temperatura alcanzada, la velocidad de enfriamiento y la composición química del metal base.

Estos productos de transformación fragilizan la zona, reduciendo sus propiedades mecánicas cuando la estructura es sometida a cargas cíclicas que facilitan la propagación de una grieta, iniciada en aquellas regiones de la ZAC más proclives a la formación y propagación de microgrietas, cuya elevada velocidad de propagación hace colapsar la estructura en unos instantes.

Las plantas industriales no pueden controlar sus procesos de fabricación en algunos casos, por lo tanto, el obtener una calidad óptima en sus productos se vuelve una tarea por demás difícil, que día a día enfrentan los responsables de producción. La investigación y desarrollo aplicados en planta puede resolver gran parte de este problema, siempre y cuando exista coherencia en el planteamiento de los proyectos a realizar, enfocándose en problemas específicos y llevar a cabo estudios preliminares que permitan el conocimiento básico del proceso de fabricación y su comportamiento.

La zona de soldadura es una región crítica por presentar heterogeneidad microestructural con microconstituyente que muchas veces no es recomendable bajo las condiciones de operación, además de la contribución de los esfuerzos residuales generados por el proceso de soldadura. En dicha zona es más fácil que se generen problemas de fragilización o agrietamiento, que muchas veces se combinan con agentes corrosivos, favoreciendo diversos mecanismos de daño.

Las operaciones de soldadura al arco utilizan metales de aportación que dependen de muchos factores económicos que están relacionados con la cantidad de metal de aporte consumido al realizar una soldadura. Todo esfuerzo debe ser hecho para reducir la cantidad de metal de relleno requerido por cada junta soldada, conforme con los requerimientos de calidad.

Las pérdidas por oxidación de los elementos útiles, como el carbono en los aceros, el silicio en las fundiciones, modifican las características mecánicas (Mathar, 1934; James y Back, 1980). El análisis de las áreas de las juntas de soldar diseñadas, los procedimientos de soldadura y la preparación de las piezas a soldar pueden proveer oportunidades para minimizar costos.

Por tanto, el objetivo del trabajo es determinar la relación microestructura-propiedades en la zona fundida y en la zona de influencia térmica de un acero bajo aleado al manganeso, unido mediante el proceso de soldadura bajo arco sumergido.

Este es un proceso en el cual el calor necesario para la soldadura se suministra mediante un arco (o arcos) que se lleva a cabo entre una barra de metal consumible o electrodo y la pieza de trabajo (Harvey & William, 2008). El arco se cubre mediante una cama de fundente que protege al metal líquido y al metal base que está cerca de la junta, funcionando como una capa protectora.

Materiales y métodos

Elaboración de la soldadura

Se realizó, de manera automática, sobre la sección de la tubería preparada para la soldadura. Se colocó la tenaza de soldadura en un ángulo aproximado de 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).

La preparación de la unión de soldadura en la tubería, de diámetro 250 mm, se realizó a tope con preparación de los bordes a 300 para efectuar soldadura multipasada 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 mientras la misma se mezcla con el baño de fusión 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 aparecen en la Tabla 1. Se clasifica según la norma AWS: F 48 A0-EL-12.

Tabla 1. Composición química del material de aporte

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

Alambre de bajo contenido de carbono, de manganeso y de silicio. Presenta excelente ductilidad y resistencia al agrietamiento. Usado con fundente INDURA 400 y 401. La delgada capa de cobre en su superficie mejora el contacto eléctrico entre el alambre y la boquilla, optimizando la estabilidad del arco y aumentando la vida de la boquilla.

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.

Según la AWS, los alambres se clasifican por dos letras y dos números, que indican la composición química de estos.

Clasificación del fundente

En el proceso de soldadura se empleó el fundente aglomerado INDURA H-400. El fundente H-400 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.

Para garantizar la soldabilidad de este tipo de acero su carbono equivalente (% CE) no debe ser mayor de 0,50; tal como se muestra en la ecuación 1 (Seferian 1967):

$$\%CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} \left[\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{6} \right] + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} \quad (1)$$

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:

$$Q = \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (2)$$

Donde:

Q- calor aportado, kJ/mm;

U_a- tensión del arco, V;

I_s- corriente de soldadura, A;

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 de la fuente de calor. Talero y Muñoz (2000) proponen la siguiente ecuación:

$$E_L = 60 \cdot \eta \cdot \frac{U_a \cdot I_s}{V_s} \quad (3)$$

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 a 0,85 (Cary, 1998). A los efectos de los cálculos realizados, se asumió una eficiencia de 0,7.

Ataque químico

Para atacar el material se empleó Nital al 2 % y 5 litros de acero API. Se mezcló 2 mL de ácido nítrico (HNO₃) y 100 mL de alcohol etanol de 3 a 5 seg. Preparado el reactivo, se vertió un poco en una cápsula en la que se introdujo la probeta unos instantes,

mojando la superficie pulida. La operación se repitió hasta que la superficie a examinar estuvo bien atacada.

Análisis de la composición química

El análisis químico se realizó empleando un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Tabla 2. Composición química del material base

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
0,18 %	0,77 %	0,25 %	0,05 %	0,09 %	0,17 %	98,27 %

Según la composición química obtenida en el espectrómetro, como consecuencia de tres chispazos, se puede observar que en relación a la composición química del material base existe diferencia significativa en algunos elementos, muestra de ello está dado en los elementos químicos: carbono y manganeso. Se consideran estos fundamentalmente, ya que el primero, proporciona más dureza en la soldadura y el segundo es formador de carburo de manganeso. Este material se clasifica en el grupo de buena soldabilidad.

La Tabla 3 se corresponde con la composición química de la zona fundida del acero.

Tabla 3. Composición química zona fundida

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
0,071 %	1,75 %	0,38 %	0,03 %	0,04 %	0,09 %	97,50 %

Y la Tabla 4 con la composición química de la zona de influencia térmica.

Tabla 4. Composición química de la zona Influencia térmica

C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Fe
0,095 %	0,83 %	0,25 %	0,04 %	0,06 %	0,10 %	98,50 %

Se aprecia en la composición química obtenida en ambas zonas, diferencia marcada en la obtención de los diferentes elementos, un manganeso de más porcentaje en la zona fundida, lo cual presumiblemente esté asociado a las características química del alambre empleado en la soldadura, donde presenta un contenido de 1,20 % y durante el proceso de licuación y solidificación se une con los demás elementos.

Análisis del carbono equivalente

Para determinar el carbono equivalente se tuvo en cuenta cada uno de los elementos que intervienen en la ecuación, así como los obtenidos en el análisis de composición química efectuado al acero. En consideración con la ecuación 1 y remplazando los valores declarados se tiene que el carbono equivalente (CE) es de 41,0 %.

En los aceros al carbono y de baja aleación la propiedad de templabilidad determina la propiedad de soldabilidad. El contenido de carbono obtenido afecta esta propiedad, de ahí que con el resultado del carbono equivalente de 0,41 %, aún se garantiza una unión soldada sin necesidad de aplicar temperatura de postcalentamiento para mejorar la ductibilidad de la unión.

En aceros al carbono templables la zona del metal base, inmediatamente adyacente a la soldadura, puede ser de grano basto (Nolan, Sterjovski & Dunne, 2005) al alcanzar 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 altos como para generar un crecimiento del tamaño de grano.

Análisis de los regímenes de soldadura

Los cálculos de los regímenes de soldadura para el proceso con material de aporte, donde se considera por la ecuación 2 el cálculo del calor aportado, se sustituyen los valores y se establece que este parámetro remplazando la $U_a = 35$ V, la intensidad de corriente de 600 A para un alambre de 3,2 mm y una velocidad de soldadura de 9 mm/seg es de 2 333,3 J/mm.

El calor involucrado durante el proceso de soldadura afecta la extensión de la ZAC y las microestructuras generadas en esta y en el material de soldadura. Las condiciones térmicas en la soldadura y cerca de ella deben mantenerse bajo ciertos límites, para controlar la estructura metalúrgica, las propiedades mecánicas, los esfuerzos residuales y las distorsiones que resultan de la operación de soldadura.

Dentro de esto es importante mencionar la conexión entre la velocidad de solidificación del material que se aporta, la distribución de la temperatura máxima o pico en la ZAC y, por último, la velocidad de enfriamiento en la soldadura en la ZAC.

Para junta de pequeño espesor la penetración depende de la tensión de arco, de la velocidad de avance y de la corriente. La penetración varía alrededor de un valor inestimable con la velocidad y la tensión; sin embargo, con la corriente, la variación es lineal. Las funciones principales de la tensión (voltaje) son estabilizar el arco y proporcionar un cordón liso, sin salpicaduras. Para electrodos de 3,2 mm la tensión de arco no influye significativamente en el ancho del cordón y sí en el refuerzo.

El cálculo de la energía lineal del proceso de soldadura se determinó por la ecuación 3, sustituyendo los valores en el cálculo para ambos materiales de aporte se obtuvo que la energía lineal es de 97 998,6 J/m.

Los efectos más graves en el material base serán en las zonas cercanas al cordón, debido a la disipación del calor. Esta zona alcanza temperaturas mayores a la de fusión del propio material y la estructura del titanio varía.

El valor de la energía lineal alcanzado en cada punto está relacionado con varios factores, como por ejemplo, la distancia a que se encuentra la fuente, la velocidad de traslación e intensidad de la misma, donde para el caso correcto de la distancia, la temperatura lograda en un punto determinado guarda una relación inversa con la separación desde la línea de aplicación del calor.

Análisis de la penetración y el área de soldadura

Luego de realizado el proceso de soldadura se realizó una inspección visual a la unión soldada entre ambas tuberías, como lo muestra la Figura 1. Se determinaron los posibles errores que pudieran haber quedado y que los mismos garantizaran la continuidad del cordón de soldadura.



Figura 1. Penetración del cordón y área de soldadura.

En la unión soldada aparece una mordedura, defecto que consiste en una detención del electrodo al concluir la unión. Este desperfecto no influye en la calidad de la unión soldada, además, el fluido que circula no presenta una presión que pueda dañar o afectar la misma.

Las variables que más afectan la geometría del cordón de soldadura son el amperaje, el voltaje y la velocidad de soldadura; dichas variables están también involucradas en el cálculo del calor de entrada a la soldadura, pero muchas veces el valor de H_{net} no proporciona información de cómo es la geometría del cordón, dos factores que están estrechamente relacionados con esta son la penetración y área de soldadura.

La penetración de una soldadura depositada en un surco o en la superficie del metal base generalmente se define como la distancia, bajo la superficie original, a la cual la fusión del metal culmina. La corriente es la variable más significativa en la penetración: la velocidad de soldadura y el voltaje son menos importantes.

En cálculos del aporte térmico y velocidades de enfriamiento, el contenido calórico del metal de soldadura fundido es proporcional al área de sección transversal del cordón, el cual representa la cantidad de material que ha sido calentado hasta el estado líquido.

Análisis de las micrografías del cordón de soldadura

Se realizaron micrografías en las juntas soldadas, en las secciones atacadas, donde se observaron, muy bien definidas, las diferentes zonas existentes (metal base, zona afectada por el calor y cordón de soldadura), así como el pase de raíz y los pases de relleno; también se observó buena geometría (uniformidad y simetría) del cordón.

Se realizó el análisis microestructural de la zona afectada y del metal base (Figura 2). Se pudo determinar el tamaño aproximado de la zona afectada por el calor, el cual arrojó un promedio de $4,3 \pm 0,4$ mm, siendo una zona pequeña, tomando en cuenta el número de pases realizados.

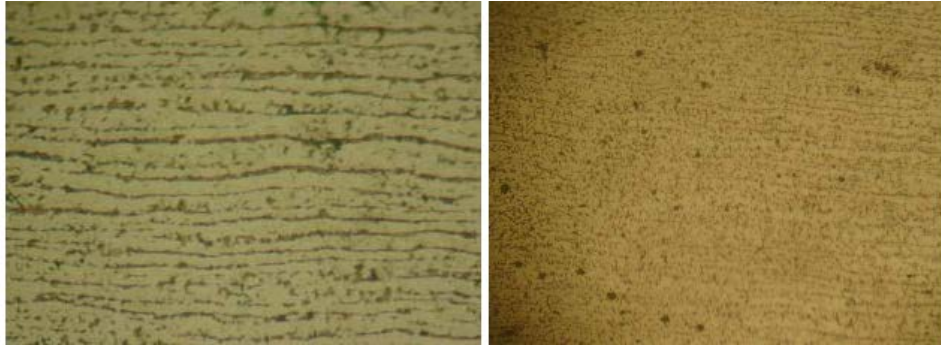


Figura 2. Metal base.

En cuanto al barrido realizado en el material base se observó una estructura en forma de banda ferrítico-perlítico. Hay que destacar que esta estructura va disminuyendo de grosor hasta desaparecer en la zona adyacente al cordón, lo cual se debe al calor generado en el proceso de soldadura. Estas bandas ferrítico-perlítico se formaron por una mala práctica de laminación y su eliminación es conveniente, ya que en presencia de humedad produce atrapamiento de hidrógeno lo cual puede provocar un daño.

Además, esta estructura aumenta la tenacidad del material, es decir, que en el cordón se espera que esta estructura aparezca, pero hay que destacar que cuando se realizan más de un cordón la estructura de los cordones internos cambia debido al calor generado por pase siguiente. Esto se demuestra con los resultados obtenidos, en los cuales se ve que la ferrita acicular se encuentra en mayor cantidad en la superficie del cordón y en menos proporción en el interior de este.

Análisis de la microestructura de la raíz del cordón

La Figura 3 muestra las microestructuras obtenidas de la raíz del cordón; el comportamiento de las mismas 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 de los electrodos, la separación entre ellos, así como el ángulo en que se posicionen. Sin

embargo, su influencia es menor, además de que dichas variables generalmente se mantienen constantes.

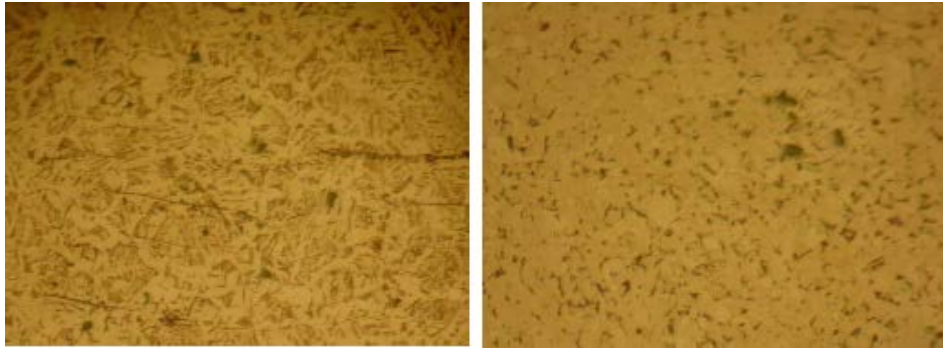


Figura 3. Raíz del cordón.

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 Widmanstätten). Se aprecia el efecto del tratamiento térmico que ejerce el pase de relleno sobre la raíz y entre pase; esto origina un reacomodo columnar típica de la solidificación del metal.

Los resultados 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 imágenes de la Figura 4 se corresponden con la interfase.



Figura 4. Interfase del cordón.

Como se observa en ambas microestructuras la dirección principal de crecimiento durante la solidificación de una 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.

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 se deben 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. La Figura 5 se corresponden con la ZAC en la unión soldada.



Figura 5. 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 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$; 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, que fueron cortadas en ángulo con respecto a la dirección del cordón, se emplearon para realizar 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 (Figura 6).

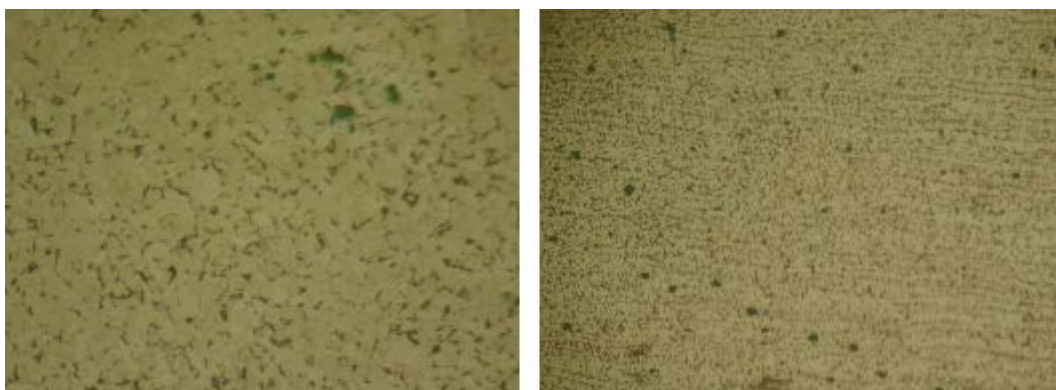


Figura 6 (a). Zona fundida (b). Zona de Influencia térmica.

La trayectoria seguida en forma ascendente comienza con una macrofotografía, que muestra el cordón en la zona fundida y en zona afectada por el calor y la sección tomada en la probeta para el análisis siguiente. Se muestra una sección de estructuras del tipo Widmannstätten, 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 contra el desplazamiento del electrodo, donde se consideraron el barrido en la zona superior del cordón (pileta), el barrido en la zona central del cordón y el barrido en la zona inferior del cordón. En la Tabla 5 se recoge el análisis de las pruebas de dureza Rockwell C realizadas en cada una de las zonas de estudio. Los ensayos de dureza se llevaron a cabo en el mismo plano de la observación metalográfica. Se realizaron tres barridos en la probeta: el primero hacia la superficie exterior, el segundo en el centro y el tercero hacia la superficie interior del espesor del tubo.

Tabla 5. Durezas obtenidas en las zonas consideradas

Zona	Dureza HRB					Promedio HRB
MB	164	164	163	164	164	163,8
MD	208	206	208	208	208	207,6
ZAC	178	180	182	184	184	181,6

En el barrido de dureza el último cordón de relleno presentó 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 al verse afectado 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, debido a que 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.

Conclusiones

La falla de la línea de petróleo se debe a un efecto combinado de corrosión erosión en la que la corrosión es inducida por hidrógeno, sulfuros y cloruros, de manera intergranular en todo el cuerpo de la línea, provocando un comportamiento frágil de la estructura y la disminución de sus propiedades mecánicas.

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 grano grueso 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 determinó que la misma es superior en la pileta del cordón (207,6 HRB). En la medida que se depositan los demás cordones esta disminuye (181,6 HRB) producto del recocido al que se someten los mismos durante el proceso.

Referencias bibliográficas

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

HARVEY, P. & WILLIAM, A. 2008: Study of Synergistic effect of Erosion and Corrosion of TiN and CrN Hard Coatings on AISI 1045 Mild Steel. *Scientia et Technica* Año XVI(38).

JAMES, M. & BACK, O. 1980: Medidas no destructivas cuantitativas de tensiones residuales. *CRC, Revisión crítica en ciencias de los materiales en estado sólido* 9(1).

MATHAR, J. 1934: Transaccions. *ASME* 56(4): 249-254.

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

SEFERIAN, D. 1967: *Metalurgia de la soldadura*. Editorial Revolucionaria. 397 p.

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