



UAZ

El nuevo rostro del
Orgullo Universitario

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
"Francisco García Salinas"



Memorias del XXVII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva

“Avances en Metalurgia, Materiales y Medio Ambiente”

Editores:

Dr. Juan Antonio González Anaya

Dra. Carolina de Jesús Rodríguez Rodríguez

Dr. Omero Alonso González

Dr. Simón Bello Teodoro

Dra. Haidee Ruiz Luna

M. en C. Paula Cristina Santos Munguía

M. en C. Martha Araceli Elizondo Álvarez

Zacatecas, Zacatecas, México

23-27 de abril de 2018



ANÁLISIS DE LA APARICIÓN DE POROSIDAD EN EXTREMOS DE TUBERÍAS DE ACERO API 5L X670 FABRICADAS PARA LA INDUSTRIA PETROLERA

L.G. Velasco-Hernández¹, R. Saldaña-Garcés², J.J. Ruíz-Mondragón¹,
G. García-Cerecero³

¹*Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA),
Saltillo, Coah., México.*

²*CONACYT-Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA),
Saltillo, Coah., México.*

³*Tubacero, S. de R.L. de C.V.,
Monterrey, N.L., México*

RESUMEN

Para cubrir la demanda de tuberías de grandes diámetros, es necesario cumplir con altos estándares de calidad para el transporte de hidrocarburos, por lo que defectos como la porosidad se deben evitar para garantizar un buen funcionamiento en operación. Durante su fabricación, una de las soldaduras es en los extremos donde se exponen aberturas que se rellenan con soldadura GMAW para después soldar de forma longitudinal el tubo, por el interior y exterior mediante SAW. Para determinar el origen de la porosidad se realizó una caracterización del charco de soldadura solidificado mediante microscopía electrónica de barrido, MEB, encontrando residuos que son asociados a lubricantes y elementos provenientes del fundente. Este estudio propone profundizar en el conocimiento del efecto en el charco de soldadura, considerando el quemado de los residuos de operaciones anteriores, la abertura de raíz en rangos de 0 a 4 mm empleando diferentes velocidades de avance de 30 a 45 in/min; los experimentos fueron evaluados mediante radiografía industrial y metalografía. Se encontró mayor porosidad al incrementar la abertura de raíz y la velocidad de soldadura, esto debido al atrapamiento de fundente en la unión y a la disminución de energía suministrada al material.

Palabras clave. SAW, Porosidad, API 5L X70, Tubería

ABSTRACT

Nowadays pipeline demand is raising due to new oilfields on and offshore. The aggressive conditions where they are installed need high specifications of quality and durability, so defects as porosity shall be avoid for having the best operation. During their fabrication, one of the welds is applied at the end of each side of the pipe with the GMAW process, for then, weld the pipe longitudinally with the SAW process inside and outside. A Scanning Electron Microscope, SEM, was used in order to determinate the origin of the porosity in the weld pool, finding particles associates to lubricants and elements from the flux. This study proposes to deepen the knowledge of the effect in the weld pool, modifying the root opening of the weld from 0 to 4 mm applying several welding speeds from 30 to 45 in/min and burning the oil impregnated into the joint before the welding; the experiments were evaluated by radiography and a metallography. It was found that the porosity increases when the root and the speed increases, this due to the flux entrapment and the decrease of energy supplied to the base metal.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales que se han implementado para la fabricación de tuberías para transporte de hidrocarburos son los aceros de baja aleación y alta resistencia, conocidos como HSLA por sus siglas en inglés, como el acero API 5L X70, ya que ofrecen altas propiedades mecánicas y tiempo de vida útil mayor en comparación con los aceros convencionales (Das, 2010).

Estas tuberías se fabrican mediante el proceso UOE, el cual define el inicio del rolado de una placa y la unión de la misma por resistencia eléctrica de alta frecuencia, HF-ERW por sus siglas en inglés, teniendo altas velocidades de producción (Tomohiro et al., 2013). Sin embargo, por la geometría de los equipos, la unión no es realizada en los extremos ya que se observa una falta de fusión la cual tiene que ser rellenada utilizando el proceso de soldadura a gas y arco metálico, GMAW por sus siglas en inglés, de manera manual.

El proceso de soldadura por arco sumergido, SAW por sus siglas en inglés, se ocupa para realizar la unión final de la soldadura longitudinal. Por su alta deposición y aporte térmico es posible soldar cédulas grandes (Forouzan et al., 2012), sin embargo, durante su aplicación se presentan defectos como la porosidad en los extremos de los tubos derivados de problemas en estaciones anteriores de fabricación lo que genera pérdidas de tiempo y dinero.

El mecanismo de formación de porosidad puede originarse por diferentes causas. Dhollander y colaboradores (Dhollander et al., 2012) estudiaron la soldabilidad de uniones de espesor grueso en acero estructural y Alipooramirabad y colaboradores (Alipooramirabad et al., 2016) analizaron las propiedades mecánicas resultantes de una soldadura por FCAW en aceros HSLA, ambos mencionan que la porosidad puede ser formada debido a altas velocidades de soldadura. Paniagua y Saucedo (Paniagua y Saucedo, 2007) durante su estudio sobre los distintos fundentes utilizados en SAW comentaron que estos pueden influir en la aparición de porosidad debido a la basicidad de los mismos. Yu y Cho (Yu y Cho, 2017) estudiaron la unión en aceros galvanizados por CMTW y encontraron que elementos con bajos puntos de fusión se llegan a evaporar y generan gases causantes de porosidad. En la soldadura láser, Courtois y colaboradores (Courtois et al., 2016) mencionan que una inestabilidad en el keyhole puede ocasionar porosidad debido a un colapso dentro del charco de soldadura. Sin embargo, no se han encontrado suficientes estudios experimentales que analicen la aparición de porosidad generada por el proceso de arco sumergido.

La literatura menciona diversas variables esenciales en un proceso de soldadura donde se puede generar porosidad; este estudio propone el análisis del origen de la porosidad en el charco de soldadura por el proceso SAW considerando tres variables como abertura de raíz, velocidad de avance y calentamiento en la zona soldada para eliminar elementos volátiles, previo a la soldadura.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

En la experimentación se utilizó el proceso SAW, donde la unión de las placas se logra a partir de un arco eléctrico realizado entre el material base y el electrodo. Éste último se encuentra sumergido dentro de un fundente, como se muestra en la Figura 1. Este proceso es sugerido para espesores gruesos donde la velocidad de fabricación es importante, ya que un paso por cada lado de la unión es suficiente para obtener una soldadura sana y resistente, limitándose solo a la posición plana y horizontal en filete debido al uso del fundente.

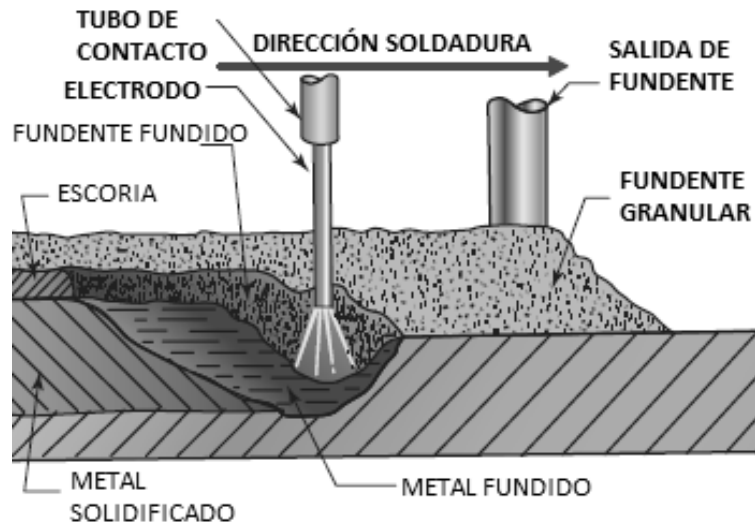


Figura 1. Esquema representativo del proceso de soldadura por arco sumergido (Jeffus, 2012)

Se usó electrodo recubierto de cobre de 4 mm de diámetro como material de aporte, con un espacio entre la placa y la punta de contacto de 22.5 mm a 90° con respecto a la placa, interpuesto en un fundente aglomerado; en la Tabla I se muestra la composición química de ambos consumibles.

Tabla I. Composición química de consumibles para realizar la soldadura (% e.p.)

ELECTRODO								
C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	P	S	Cu
0.1	0.13	1.55	0.49	0.02	0.05	0.014	0.011	0.08
FUNDENTE								
$SiO_2 + TiO_2$		$Al_2O_3 + MnO$		$CaO + MgO$		CaF_2		
20%		35%		20%		20%		

Las dimensiones de los cupones que se ocuparon durante la soldadura fueron de 350 x 177 x 17 mm de acero API 5L X70. La composición química se obtuvo mediante espectrometría de emisión óptica y los resultados se muestran en la Tabla II los cuales indican que cumplen con la especificación API (API, 2013).

Tabla II. Composición química del acero API 5L X70 (% e.p.)

C	Mn	P	S	Ti	Nb+V+Ti	Si	Cr	Mo	Al	Ni	Co
0.14	1.62	<0.01	<0.01	0.02	0.09	0.31	0.21	0.02	0.05	0.04	0.03

Las placas soldadas fueron inspeccionadas mediante rayos X. Después fueron cortadas y preparadas en dirección transversal al cordón para su examinación metalográfica y por medio de microscopía electrónica de barrido, MEB.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La experimentación se llevó a cabo con una máquina Lincoln IDEALARC DC1000®. Las pruebas se realizaron con un amperaje de 1050 A y un voltaje de 40 V con el objetivo de emular las condiciones de fabricación en planta. Se realizó una serie de experimentos considerando 3 variables, la velocidad de avance, la adición de lubricante con y sin quemado previo a la unión y la abertura de raíz, ver tabla III. Ésta última incluida en la experimentación debido a que en producción la abertura de los extremos de los tubos aumenta al irse acercando a la orilla, como se muestra en la Figura 2.

Los cupones se unieron primero por medio del proceso GMAW para tener un respaldo de soldadura, posteriormente se impregnó la unión de cada cupón con lubricante por 1 día para simular los contaminantes presentes en la planta. Una vez transcurrido ese tiempo, se aplicó flama directa a los cupones esperando eliminar el lubricante impregnado, y finalmente se soldaron por cada lado empezando por la cara interior, y siguiendo la matriz de diseño de la Tabla III.

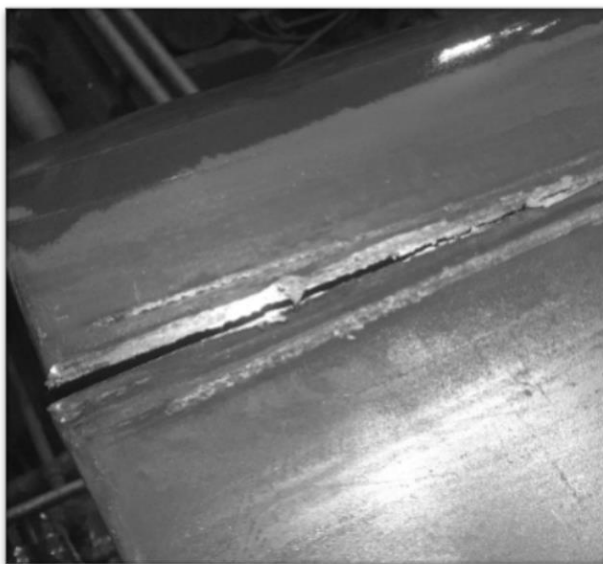


Figura 2. Extremo de tubería soldada por SAW con falta de fusión en ascenso

La experimentación se realizó de acuerdo a un diseño factorial 2^3 con 6 puntos centrales para conocer los efectos principales de las variables tomando los factores y niveles mostrados en la Tabla III usando el software Minitab para la realización de las corridas correspondientes.

Tabla III. Matriz de diseño para corridas experimentales

Parámetro de entrada	Unidades	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
Calentamiento (A)	°C	25	112.5	200
Velocidad de Avance (B)	in/min	30	37.5	45
Abertura de raíz (C)	mm	0	2	4

Obtenidos los cupones de soldadura, se inspeccionaron por radiografía de rayos X con parámetros de 192 kV y 4.5 mA por 4 minutos. El análisis se hizo dividiendo la placa radiográfica cada 5 mm tomando un total de 150 mm en base al centro para contabilizar la presencia de discontinuidades. Una vez detectadas, se cortaron para obtener probetas de esas zonas, para luego caracterizarlas metalográficamente y analizarlas mediante MEB.

Para la metalografía se desbastaron con lijas de SiC con granulometría de 80 hasta 1200 para después pulirlas con pasta de diamante de 1 μ m. Una vez obtenido el acabado espejo, se atacaron químicamente con el reactivo Berahas para observarlas en el microscopio óptico. Las discontinuidades encontradas en la

soldadura fueron observadas mediante MEB a 15 kV y empleando espectrometría de dispersión de energía de rayos X, EDX por sus siglas en inglés.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En la Figura 3 se muestra de forma representativa los resultados obtenidos por inspección radiográfica. En los incisos (a-e) de la misma figura, se observan los más frecuentes como porosidad, socavado y atrapamiento de escoria; mientras en el inciso (f) se observa porosidad al final de la soldadura. Ésta última se mostró en más de un cupón, atribuyendo esto al decremento de energía suministrada debido a la suspensión del arco eléctrico, lo cual promueve la disminución del tiempo de solidificación, forzando a dejar atrapado material de fundente o gases producto de la evaporación generada durante la soldadura (Cho et al., 2017) (Kou, 2007).

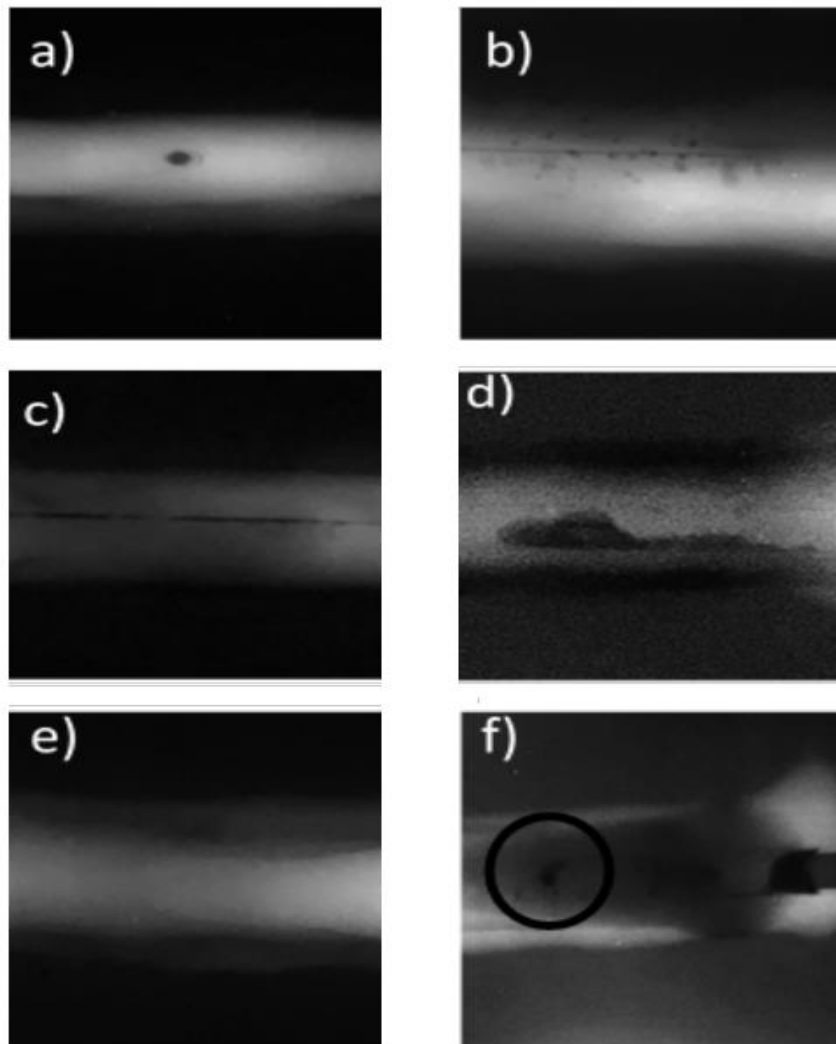


Figura 3. Radiografía por rayos X, a) porosidad aislada, b) porosidad agrupada, c) falta de fusión, d) atrapamiento de escoria, e) socavado, f) porosidad al final de la soldadura.

La presencia de discontinuidades en los cupones se cuantificó de acuerdo al mallado de las placas radiográficas, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla IV.

Tabla IV. Valores obtenidos de respuesta de la experimentación realizada

N	A	B	C	% Aparición
1	200	45	4	50
2	112.5	37.5	2	0
3	200	30	0	0
4	112.5	37.5	2	13.333
5	112.5	37.5	2	6.667
6	200	45	0	0
7	25	30	0	0
8	25	45	4	26.667
9	112.5	37.5	2	3.333
10	112.5	37.5	2	3.333
11	200	30	4	30
12	25	45	0	6.667
13	25	30	4	36.667
14	112.5	37.5	2	6.667

La influencia de las variables sobre el proceso se determinó al tomar la media de cada nivel y observar el comportamiento de estos. En la Figura 4, se observa la relación de cada nivel con respecto al porcentaje de porosidad presentado en los experimentos. En todos los casos se observa un incremento en el nivel alto, sin embargo, este cambio solo es significativo para la abertura de raíz.

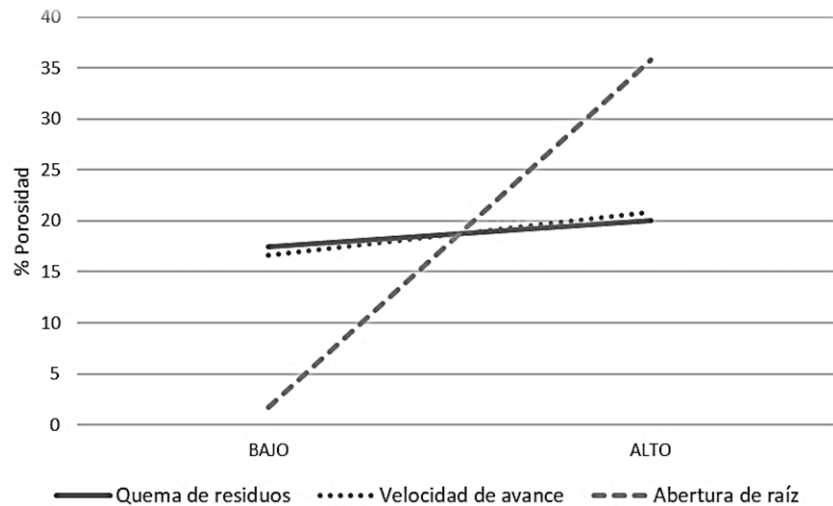


Figura 4. Comportamiento de los niveles contra el porcentaje de porosidad

La porosidad está asociada a un atrapamiento de gas, lo que ocasiona una discontinuidad en la formación del charco de soldadura. Típicamente, en la zona de fusión de una soldadura de acero API 5L se presentan fases como bainita, ferrita poligonal, ferrita Widmanstätten, ferrita acicular y ferrita alotriomórfica (Aucott, 2015), evitando la presencia de fases frágiles generadoras de grietas que disminuyen las propiedades mecánicas del material (Masoumi et al., 2015).

En la Figura 5 se muestran fotografías tomadas a una muestra con porosidad, donde la Figura 5 (a) se muestra la micrografía de una zona de fusión sana, mientras que en la Figura 5 (b) se observa una zona con porosidad aislada. Cabe hacer mención que no hay algún cambio significativo en la microestructura aledaña al poro.

Autores como Kou (Kou, 2007), Singh y Pandey (Singh y Pandey, 2009) y Cho y colaboradores (Cho et al., 2017) mencionan que el fundente en una soldadura realizada por SAW es otro factor generador de porosidad y atrapamiento de escoria, ya que la entrada de calor disminuye al aumentar la velocidad de avance, trayendo dificultades para dejar escapar el fundente o gases producto del charco de soldadura.

En la Figura 6 se muestra un corte transversal al cordón, el cual se observó mediante MEB, realizando acercamientos de hasta 1000X para observar la forma y tamaño de las partículas contenidas dentro de la cavidad.

En la Figura 7 se muestra el análisis EDX, este reveló la composición química en la zona de la partícula seleccionada, encontrando como mayor elemento el oxígeno (O) el cual interactúa con elementos como aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg) y silicio (Si), también encontrados en el estudio pero en menor proporción, para formar óxidos.

El resultado sugiere que estos pudieran estar asociados al fundente. Adicional a ello se encontraron elementos como el sodio (Na) y el cloro (Cl), estos pudieron ser incorporados por el lubricante (composición química confidencial), el cual no se haya quemado adecuadamente.

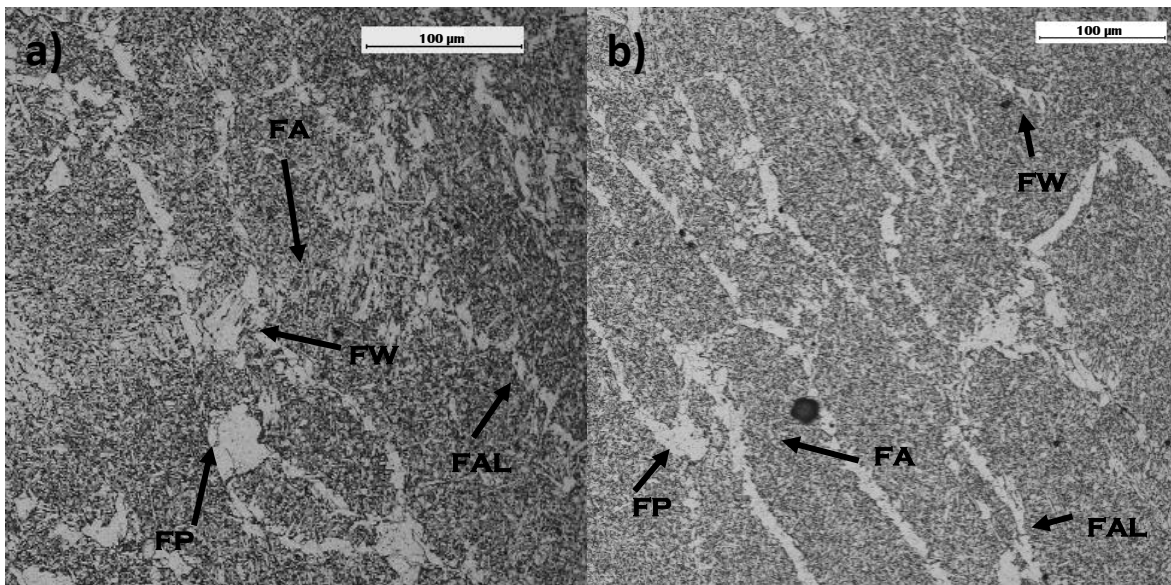


Figura 5. Micrografía óptica del charco de soldadura de cupones soldados de acero API 5L X70 a) microestructura de la zona de fusión, b) microestructura en zona de fusión con porosidad. Fases presentes: Ferrita primaria (FP), 2) Ferrita Alotriomórfica (FAL), 3) Ferrita Widmanstätten (FW), 4) Ferrita acicular (FA)

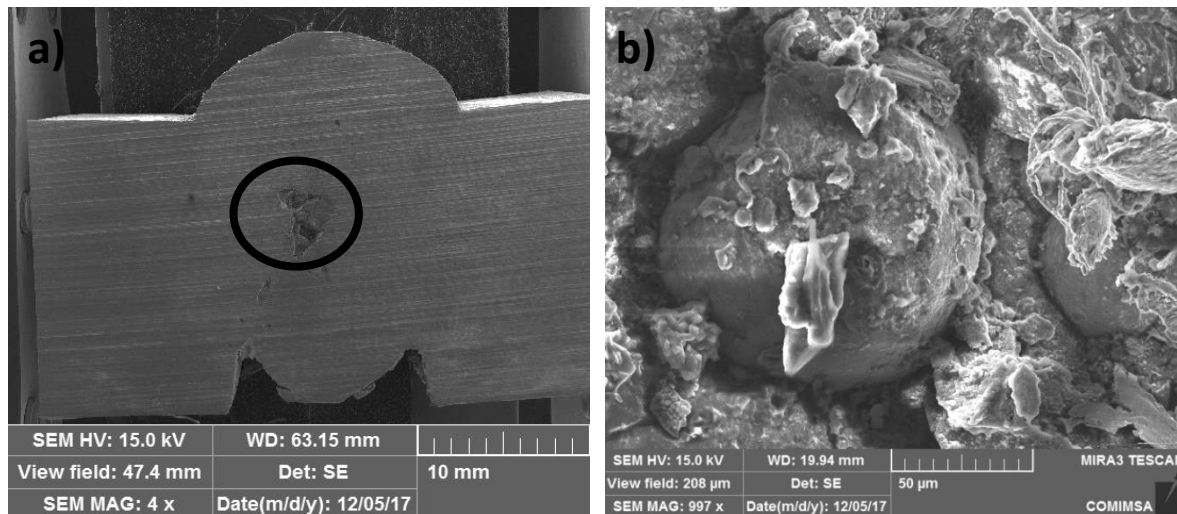


Figura 6. Fotografía tomada mediante MEB, a) muestra de soldadura con presencia de discontinuidades, b) partículas encontradas en la zona interior de la discontinuidad a 1000x

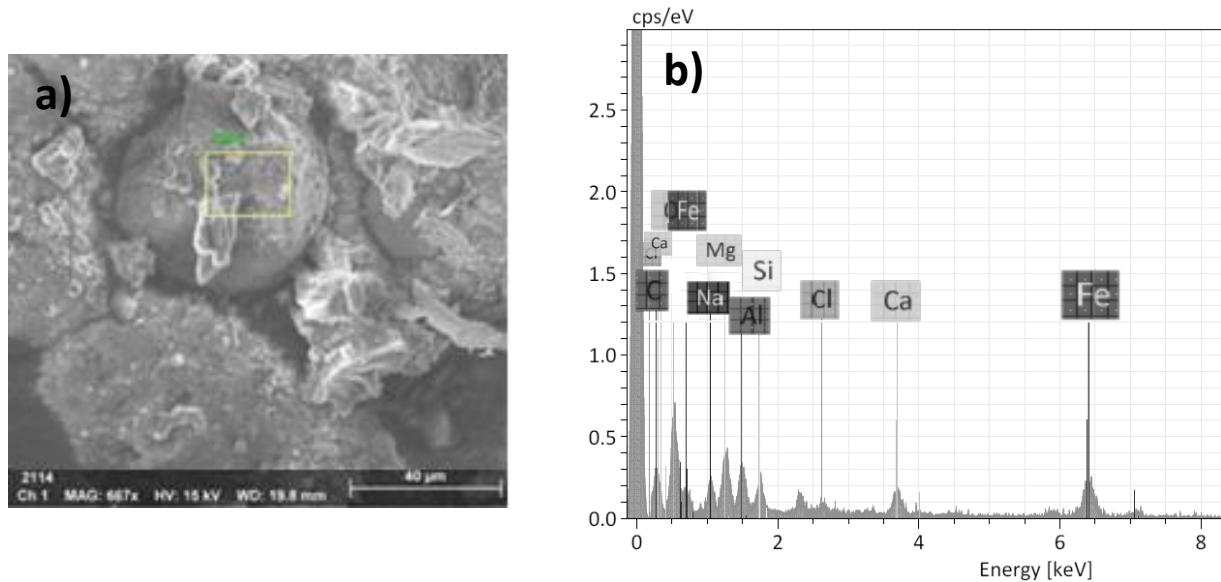


Figura 7. Estudio de EDX mediante el MEB para conocer los elementos concentrados en el área seleccionada, a) área estudiada mediante EDX, b) análisis resultado del EDX en la partícula.

5. CONCLUSIONES

De acuerdo al trabajo de investigación sobre el estudio de la aparición de porosidad en los extremos de tuberías fabricadas por el proceso SAW para el transporte de hidrocarburos se puede detallar lo siguiente:

- La presencia de porosidad en base en las radiografías se pudo cuantificar para determinar que al aplicar un cordón de soldadura por SAW se puede encontrar ésta al aumentar la abertura de raíz.
- El aumento de la velocidad de soldadura provocó socavados en la unión, así como aparición de porosidad y atrapamiento de escoria debido al decremento de energía y de tiempo para dar salida a los gases generados durante la soldadura.
- El análisis de EDX determinó que los elementos más abundantes en la zona discontinua pertenecen al fundente.
- El exceso de fundente debido al aumento en la abertura de raíz provoca una sobresaturación en el charco de soldadura generando atrapamiento de escoria y porosidad.
- No se reportó algún cambio microestructural atípico en la zona discontinua dentro del charco de soldadura.

AGRADECIMIENTOS

El agradecimiento a la empresa TUBACERO S. de R.L. de C.V. por su apoyo incondicional y reconocimiento al grupo de doctores de COMIMSA que apoyaron para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Alipooramirabad, H., Ghomashchi, R., Paradowska, A., & Reid, M., 2016. Residual stress- microstructure-mechanical property interrelationships in multipass HSLA steel welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 231: 456–467.
- API., 2013. *API 5L: Specification for Line Pipe*. USA.
- Aucott, L. A., 2015. *Mechanism of Solidification Cracking during Welding of High Strength Steels for Subsea Linepipe*. University of Leicester, Leicester.
- Cho, D., Kiran, D. V., & Na, S., 2017. Analysis of molten pool behavior by flux-wall guided metal transfer in low-current submerged arc welding process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110: 104–112.
- Courtois, M., Carin, M., & Balabane, M., 2016. Guidelines in the experimental validation of a 3D heat and fluid flow model of keyhole laser welding. *Physics D: Applied Physics*, 49: 155503-155516
- Das, A. K., 2010. The Present and the Future of Line Pipe Steels for Petroleum Industry. *Materials and Manufacturing Processes*, 25(1–3): 14–19.
- Dhollander, R., Vancauwenberghe, S., Waele, W. De, Caenegem, N. Van, & Pottelberg, E. Van., 2012. *Multiwire submerged arc welding of structures*. Belgica: Universidad de Ghent.
- Forouzan, M. R., Nasiri, S. M. M., Mokhtari, A., Heidari, A., & Golestaneh, S. J., 2012. Residual stress prediction in submerged arc welded spiral pipes. *Materials and Design*, 33: 384–394.
- Jeffus, L., 2012. *Welding Principles and Applications* (7th ed.). New York, USA: Delmar Cengage Learning.
- Kou, S., 2007. *Welding Metallurgy*. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Masoumi, M., Flavio, L., Herculano, G., Ferreira, H., & De Abreu, G., 2015. Study of texture and microstructure evaluation of steel API 5L X70 under various thermomechanical cycles. *Materials Science & Engineering A*, 639: 550–558.
- Paniagua-mercado, A. M., & Saucedo-muñoz, M. L., 2007. Effect of Active and Nonactive Fluxes on the Mechanical Properties and Microstructure in Submerged-Arc Welds of A-36 Steel Plates. *Materials and Manufacturing Processes*, 31–34.
- Singh, K., & Pandey, S., 2009. Recycling of slag to act as a flux in submerged arc welding. *Resources, Conservation and Recycling*, 53: 552–558.
- Tomohiro, Masahito, S., Takatoshi, O., & Yutaka, M., 2013. Development of Advanced Electric Resistance Welding (ERW) Linepipe “ Mighty Seam ” with High Quality Weld Seam Suitable for Extra-Low Temperature Services. *JFE Technical Report*, 18–22.
- Yu, J., & Cho, S. M., 2017. Metal-cored welding wire for minimizing weld porosity of zinc-coated steel. *Journal of Materials Processing Tech.*, 249(January): 350–357.