Análisis fractográfico en la fractura de una unión soldada

Juan Manuel Salgado López*, Abraham Silva Hernández, Francisco Ignacio López Monroy, José Luis Ojeda Elizarráras y Jesús Mauricio Tello Rico.
* msalgado@cidesi.edu.mx
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Querétaro, Qro.
México.

Resumen

En este trabajo se pretende demostrar mediante un caso de falla que, a través del análisis fractográfico, es posible caracterizar los defectos de soldadura que llevan a la falla de uniones soldadas, además de establecer una relación con la información bibliográfica existente sobre su posible origen, con las evidencias encontradas in situ. De igual manera, se pretende poner en relevancia la necesidad de utilizar análisis fractográfico en el aseguramiento de la calidad de las uniones soldadas, ya que, en los procedimientos de soldadura, se utilizan pruebas mecánicas como el ensayo de carga máxima a la torsión, ensayo mecánico a la carga máxima. Sin embargo, es recomendable realizar fractográfia en las superficies de fractura de las probetas falladas para determinar las causas verdaderas de estas y corregirlas.

Palabras clave: Soldadura, fractografía, defecto.

Abstract

This paper pretends to show how, by applying fractographic analysis, it is possible to characterize defects of the welding process, which leads to failure in welded components and then to match it with the bibliography about the possible origin of such problem with the in situ evidences. In the same way, it is pretended to highlight the need of using fractographic analysis to assess the quality of welded joints; since in the welding procedures only mechanical tests such as maximum torsional load test, mechanical test at maximum load are require, then it would be a good practice to analyze the fracture surface of the tested specimen to characterize the flaws and to correct them.

Keywords: *welding, fractography, defect.*

Artículo arbitrado

Recibido:	aceptado:
12 de abril de 2019	02 de agosto de 2019

Introducción

La necesidad de unir partes metálicas hace de la soldadura un proceso clave en la construcción, ya que la seguridad en el trabajo de dicho componente soldado dependerá de la confiabilidad de la unión soldada.

Entonces, es posible decir que la seguridad de la unión soldada dependerá de la calidad de la soldadura. En este sentido la ingeniería de soldadura es clave para evitar imperfecciones o defectos en las soldaduras necesarias en la manufactura de distintos componentes.

Los conocimientos propios de la ingeniería en soldadura se encuentran plasmados en las especificaciones del procedimiento de soldadura ("WPS" por su siglas en inglés), el cual es el documento que contiene las indicaciones a seguir para garantizar la seguridad de las uniones soldadas y, con ello, la sanidad de los componentes soldados.

De manera muy simple, puede mencionarse que la normatividad en soldadura no solicita el análisis fractográfico, el cual es clave para caracterizar imperfecciones o defectos en las soldaduras y permite el entendimiento de las causas de los defectos generados durante el proceso (Colangelo, Dewan. Eksytron).

Una vez caracterizado el defecto, se puede determinar el origen de este y, entonces, es posible tomar acciones correctivas en el proceso de soldadura. Este trabajo en particular se enfoca en un proceso de soldadura por arco, se pretende mostrar la utilidad del análisis fractográfico en la caracterización de defectos de soldadura y su utilidad como herramienta para la toma de acciones correctivas.

Caso de estudio

En este trabajo se presenta un estudio de soldadura del componente mostrado en la Figura 1. Este componente era parte de un mecanismo eléctrico y es manufacturado por la unión soldada de una placa de acero ASTM A36 (acero al carbono) y dos placas de acero ASTM A514. El proceso de unión utilizado para enlazar las placas fue soldadura de arco con electrodo tubular relleno de fundente (FCAW por su siglas en inglés) E71T-1C. La composición química de los materiales aquí utilizados es mostrada en la tabla 1.

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V	Ti	B	Cu
A36	0.29-0.25	1	3.5	0.05	0.28	-	-	-	-	-	0.2
A514	0.2-0.12	1	4	0.008	0.35-0.20	0.65-0.40	0.25-0.15	0.08-0.03	0.08	0.05	-
E71T-1C	0.18	1.75	0.03	0.03	0.9	0.2	0.3	0.08	-	-	0.4

Tabla 1. Composición química de los materiales utilizados en porcentaje en peso. Fuente: elaboración propia.

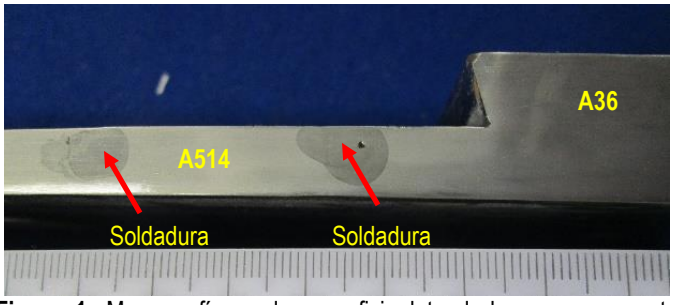

Figura 1. Macrografía en la superficie lateral de un componente soldado donde se observa defectos. Cada división de la escala equivale a 1 milímetro. Fuente: elaboración propia.

La inspección visual del componente mostró imperfecciones en las uniones soldadas, las cuales, en primera instancia, asemejaban el defecto conocido como escoria atrapada, como se muestra en la Figura 2. Este tipo de imperfecciones fue consistente en los componentes soldados a través del procedimiento de soldadura.

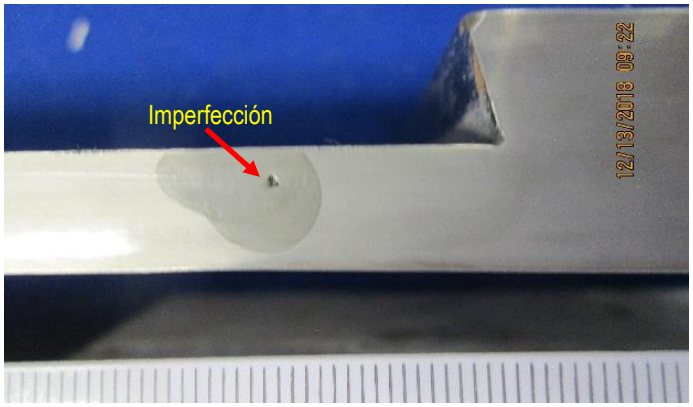

Figura 2. Macrografía a 7X de la imperfección mostrada en la Figura 1.Se puede observar que se encuentra en la parte interna del cordón de soldadura. Cada división de la escala equivale a 1 milímetro. Fuente: elaboración propia.

Las inclusiones de escoria son partículas no metálicas atrapadas en el cordón de soldadura o en la interfaz de soldadura. Este tipo de defecto es comúnmente asociado a una falta de habilidad del soldador. No obstante, también pueden ser el resultado de un acceso inadecuado a la junta por una preparación defectuosa o por el diseño de la unión soldada, las muescas afiladas en los límites de las juntas por una limpieza defectuosa o deficiencias en la

preparación entre pasadas de soldadura (Ekstrom,1973; Méndez, 2003; Smith, 1982).

A partir de esta información, es evidente que la inspección visual o una macrografía no son suficientes para lograr determinar la causa de la escoria encontrada.
La Figura 3 muestra a simple vista la superficie de fractura del componente soldado y fracturado después de ensamble.

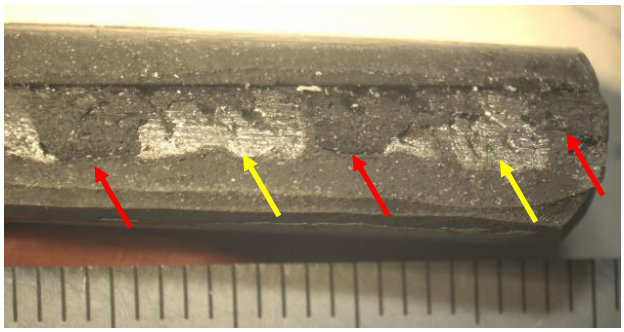

Figura 3. Superficie de fractura de componente soldado A514. Mostrado a 7X. Se observa la evidencia de escoria atrapada (flechas rojas) y falta de fusión (flechas amarillas). Cada división de la escala equivale a 1 milímetro. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra la misma superficie de fractura a través de un microscopio. A partir de este análisis fractográfico, con el uso del microscopio estereoscópico, puede decirse que los especímenes soldados con escoria atrapada visible en la parte lateral, contenían también el defecto llamado falta de fusión del lado del acero ASTM A514, el cual sólo fue visible una vez que se fracturó el componente.

La inspección por microscopia electrónica de barrido (MEB) en las superficies de fractura de los especímenes se llevó a cabo utilizado fue un JEOL JSM 6610LV.

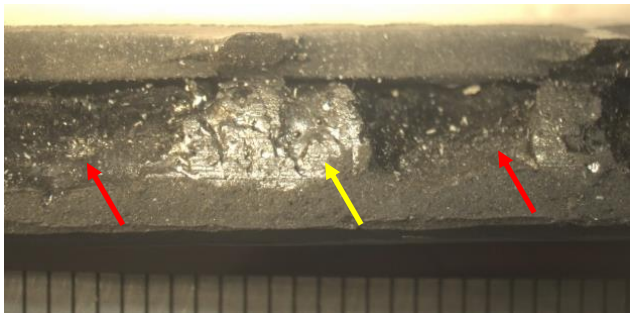

Figura 4. Superficie de fractura de componente soldado del lado de ASTM A514. Mostrado a 10X. Se observa la evidencia de escoria atrapada (flechas rojas) y falta de fusión (flechas amarillas). Cada división de la escala equivale a 1 milímetro. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5 se puede observar la superficie de fractura dentro de la cámara del microscopio, después de haber sido limpiada en un ultrasonido con baño de alcohol.

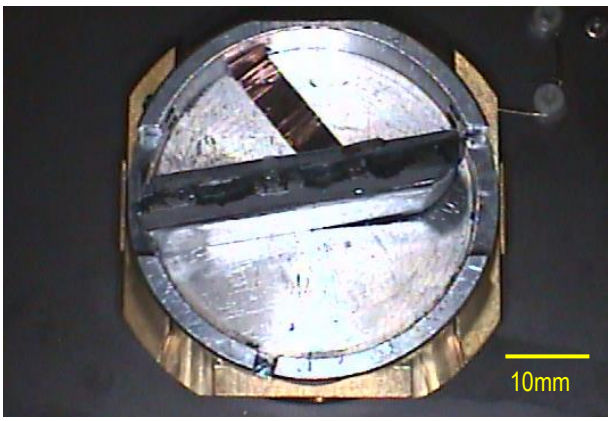

Figura 5. Muestra con la superficie de fractura de componente soldado mostrado en las figuras 3 y 4 dentro de la cámara del microscopio electrónico de barrido. Fuente: elaboración propia.

La Figura 6 muestra el patrón de fractura en el cordón de soldadura, el cual consiste de clivaje. Esta evidencia indica que la grieta ocurrió por una sobrecarga en tensión y que creció de manera descontrolada. Además de lo anterior, es posible observar la porosidad por gases atrapados. Esto puede ser evidencia de: mala preparación de la ranura, una defectuosa protección por gases del arco de soldadura, humedad en la unión soldada, o de contaminación por aceites, grasas o humedad.

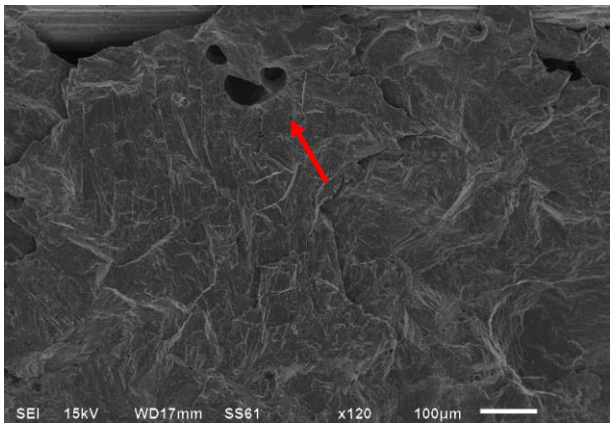

Figura 6. Muestra el patrón de la superficie de fractura del metal depositado del componente soldado que se muestra en la figura anterior. Se observa un patrón de clivaje y porosidad (flecha roja). Fuente: elaboración propia.

En el caso de la figuras 7 y 8, muestran claramente la presencia del defecto denominado falta de fusión. Con la imagen del MEB, queda clara la falta de fusión, así como el espacio existente entre el metal base y el metal

depositado (cordón de soldadura), además se confirma la presencia de inclusiones de escoria en la unión soldada.

La Figura 7 muestra la fractura en una región de la muestra. Se pueden observar escorias atrapadas en el cordón de soldadura. Esta evidencia refuerza la hipótesis de una mala preparación de la unión soldada.

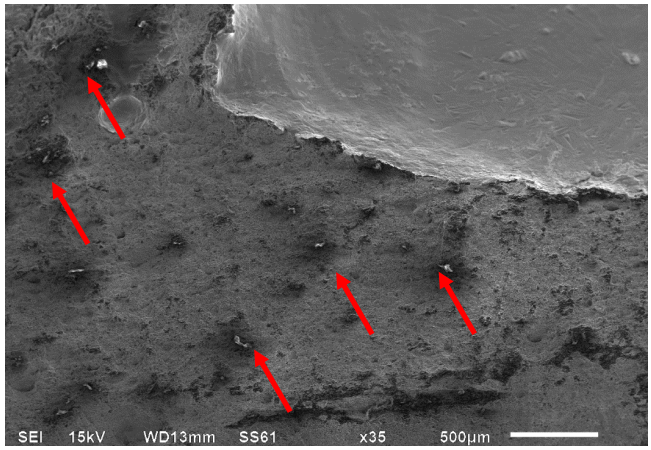

Figura 7. Superficie de fractura de componente soldado mostrado en la figura anterior. Se observan escorias atrapadas (flechas rojas). Fuente: elaboración propia.

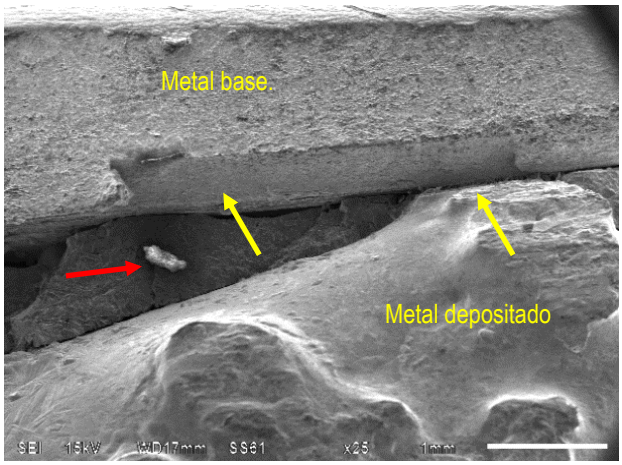

Figura 8. Superficie de fractura de componente soldado bajo estudio a 54x. Se observan escorias atrapadas (flecha roja) y una falta de fusión (flecha amarilla). Fuente: elaboración propia.

Las áreas más relevantes de la superficie de fractura de la muestra soldada fueron inspeccionadas mediante la técnica de análisis químico elemental por dispersión de energía (EDS por sus siglas en inglés) en el MEB. Los resultados más importantes demostraron la existencia de escoria del cordón atrapada. Esta aseveración fue demostrada por los microanálisis EDS realizados en diferentes secciones de la superficie de fractura bajo estudio. Como ejemplo se presenta la Figura 9, en ella se muestra una sección de la superficie de fractura donde se observa parte de la fisura del metal depositado, falta de fusión y escoria atrapada. En este caso, puede verse que la escoria atrapada está asociada con la penetración incompleta.

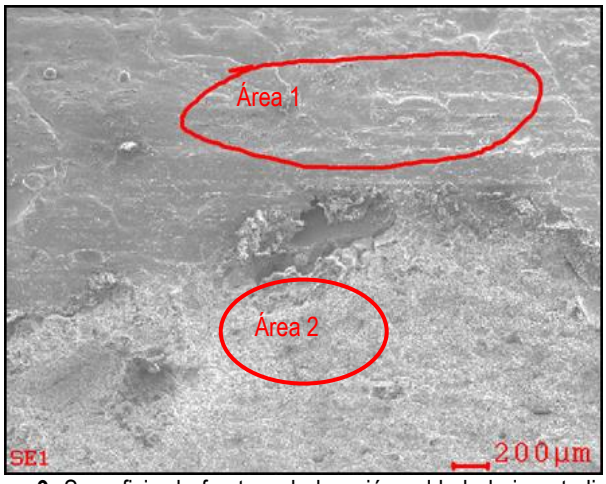

Figura 9. Superficie de fractura de la unión soldada bajo estudio del lado del acero ASTM A514. En esta superficie se observa la región donde fue realizado el microanálisis EDS. Fuente: elaboración propia.

Es evidente, en esta región de la fractura, la penetración incompleta encontrada dentro de los múltiples defectos que causaron la falla de este componente. En el área roja se muestra la región donde fue realizado el microanálisis EDS. Los resultados se muestran en la Figura 10, donde es patente la presencia de diferentes tipos de óxidos.

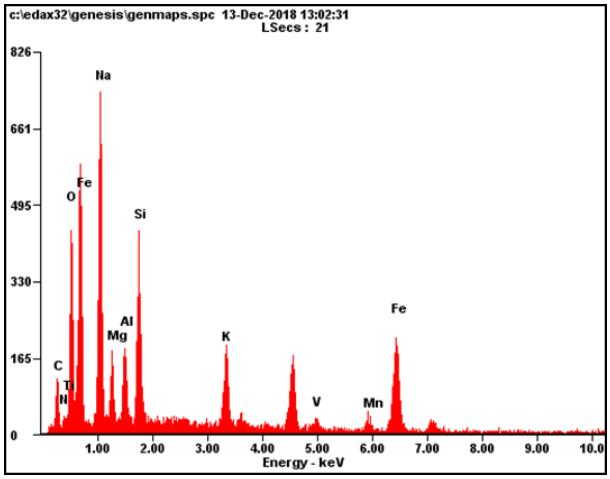

Figura 10. Resultados del microanálisis EDS realizado en la sección de la superficie de fractura mostrada en la Figura 9. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, cabe mencionarse que también fueron realizados microanálisis EDS en la sección de la fractura del metal depositado. Una sección donde se llevó a cabo

el análisis se muestra en la misma Figura 9 y los resultados pueden ser vistos en la Figura 11. Estos revelan la presencia predominante de hierro sin evidencia de óxidos, por lo que es claro que es la fractura del metal de aporte.

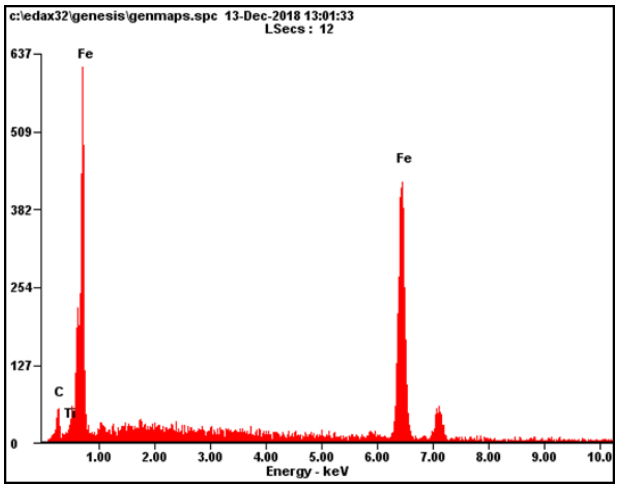

Figura 11. Resultados del microanálisis EDS realizado en la sección de la superficie de fractura señalada como área 2 en la Figura 9. Fuente: elaboración propia.

A partir de esta evidencia, es claro que el defecto denominado escoria atrapada o inclusión de escoria está presente en la unión soldada. No obstante, en la Figura 12 se muestra otra sección de la superficie de fractura, donde se realizó otro microanálisis EDS. Es posible observar que los resultados (Figura 13) también muestran diferentes óxidos. Cabe mencionarse que esta inclusión de escoria estaba localizada dentro del metal depositado, por lo que se deduce que este defecto también se debió a una limpieza deficiente entre pasos de soldadura.

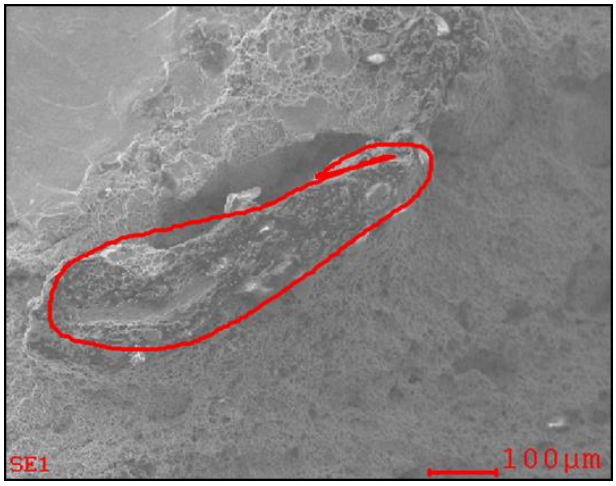

Figura 12. Superficie de fractura de la unión soldada bajo estudio. En esta superficie se observa la región donde fue realizado microanálisis EDS. Fuente: elaboración propia.

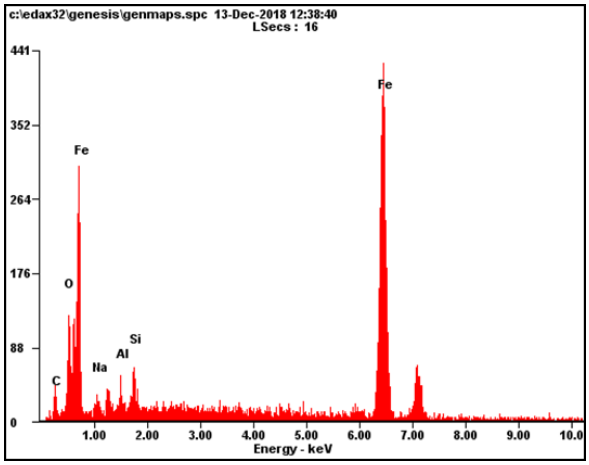

Figura 13. Resultados del microanálisis EDS realizado en la sección de la superficie de fractura mostrada en la Figura 12. Fuente: elaboración propia.

Entonces, este caso demuestra que la inspección por MEB es capaz de caracterizar, sin lugar a dudas, defectos tales como: escoria atrapada, falta de fusión y porosidad, los cuales llevan a la fractura de componentes soldados.

En la literatura técnica está documentado que los defectos de soldadura en componentes soldados juegan un papel muy importante en las fallas de estos; ya que, al conjugarse las cargas de trabajo con los defectos que actúan como concentradores de esfuerzos, se dan las fallas por fatiga; o bien, el caso de fallas por sobrecarga. Tales defectos reducen el área de carga, razón por la cual el esfuerzo se eleva y lleva a sobrecargas. En este caso, esto queda de manifiesto por la cantidad y tipo de defectos encontrados, los cuales hacen patente que la fractura ocurrió por este mecanismo. Entonces, de esta caracterización, queda claro que la fractura se debió a la interacción de los defectos antes mencionados con la carga de trabajo del material, ya que estos actuaron como concentradores de esfuerzos durante el trabajo del componente (Peterson, Méndez, Smith).

Ahora bien, una vez que los defectos fueron caracterizados sin lugar a dudas, y que el mecanismo de fractura fue identificado, entonces, es necesario conocer las causas más comunes del origen de los defectos encontrados, para determinar las causas de la aparición de los defectos y tomar medidas necesarias para evitar que estos aparezcan durante el servicio del componente soldado.

Una estrategia para acercarse a las causas de los defectos es la investigación bibliográfica acompañada de la observación en campo del proceso de soldadura desde la preparación de las ranuras de los metales base, el depósito del metal de aporte, la limpieza e inspección entre capas, hasta la inspección no destructiva final. Con ello, se tendrá un panorama real del proceso en un marco de información técnica que posibilita corregir de manera eficiente los errores que sean detectados en el procedimiento de soldadura, así como la adopción de medidas que faciliten el control del proceso de soldadura, con el fin de mantener la sanidad y seguridad de las uniones soldadas.

En el caso aquí presentado, la literatura técnica reporta que las causas más comunes para la aparición de defectos tales como la falta de fusión en un proceso de soldadura por arco con electrodo tubular relleno de fundente son: una preparación de juntas demasiado estrecha, ajustes incorrectos de los parámetros de soldadura, una técnica deficiente del soldador y soplo del arco eléctrico. La limpieza insuficiente de las superficies engrasadas o incrustadas también puede contribuir a la falta de fusión. Es más probable que estos tipos de imperfecciones ocurran cuando el acceso a la articulación está restringido. En este caso, la evidencia indica que la falta de habilidad del soldador juega un papel muy importante, ya que la presencia de faltas de fusión con defectos tales como porosidad y escoria atrapada dentro de la misma área da una idea de ello (Peterson, 2006; Smith, 1982; Svenson, 2017).

Por otro lado, derivado de la inspección en sitio, el inspector reportó se llevaba a cabo un proceso manual, pero la preparación de la ranura en los metales base tenían defectos en su limpieza, además del ángulo de la ranura. Lo mismo ocurría con la inspección visual entre pasos de soldadura, la cual era deficiente. Con estas evidencias se comprobó que la caracterización de los defectos de soldadura mediante MEB coincide con lo encontrado en el sitio de soldadura. Asimismo, las causas reportadas en la literatura técnica coinciden con las causas de estos defectos encontradas en el sitio del proceso de soldadura. Finalmente, fue necesario modificar el procedimiento de soldadura para evitar que continúe ocurriendo.

Conclusiones

En este trabajo se demuestra que el análisis de las superficies de fractura mediante MEB es de gran utilidad para caracterizar completamente los defectos o imperfecciones de las uniones soldadas.

La inspección por medio de MEB es capaz de caracterizar, sin lugar a dudas, defectos tales como: escoria atrapada, falta de fusión y porosidad.

Los resultados de la inspección MEB, llevada a cabo en este caso, comprobaron que la preparación defectuosa lleva a fallas en las uniones soldadas.

En ese sentido, esta herramienta es de gran utilidad en el control de calidad de soldaduras y para la adopción de medidas que eviten la aparición de defectos que pongan en peligro la integridad de la soldadura.

Este trabajo deja en claro que la estrategia para evitar problemas de este tipo, mediante la aplicación de análisis fractográfico en la etapa de calificación del procedimiento de soldadura (WPS), es muy efectiva para procesos donde se utiliza soldadura de pernos por descarga de condensador, aunque también puede utilizarse en la soldadura de pernos por arco.

Referencias

Colandero, V. J., & Heiser, F. (1974). Analysis of Metallurgical Failures. (Retroactive Coverage). John Wiley & Sons, Inc., pp 361.

Cosham, A., & Kirkwood, M. (2000, October). Best practice in pipeline defect assessment. *In Proceedings of IPC. Engineering Failure Analysis,* 12(6), pp. 1027-1037.

Deshmukh, A. R., Venkatachalam, G., Divekar, H., & Saraf, M. R. (2014). Effect of weld penetration on fatigue life. *Procedia Engineering,* 97, pp. 783-789.

Dewan, M. W., Wahab, M. A., & Okeil, A. M. (2014, June). Effect of Weld Defects on Tensile Properties of Lightweight Materials and Correlations with Phased Array Ultrasonic Nondestructive Evaluation. In *ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference* pp:68-75 *DOI:10.1115/MSEC2014-3950.*

Ekstrom, D. H., & Munse, W. H. (1973). *The effect of internal weld defects on the fatigue behavior of welded connections*. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012). Fatigue-prone details in steel bridges. *Buildings*, 2(4), pp. 456-476.

Kim, S., Jin, K., Sung, W., & Nam, S. (1994). Effect of lack of penetration on the fatigue strength of high strength steel butt weld. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 8(2), pp. 191-197.

Mc Connell, I. A., & Mc Pherson, N. A. (1997). The application of statistical process design to a FCAW process. *Signal*, 2, 7.

Méndez, G. T., Cuamatzi-Meléndez, R., Hernández, A. A., Capula-Colindres, S. I., Ángeles-Herrera, D., Velázquez, J. C., & Vázquez-Hernández, O. (2017). Correlation of Stress Concentration Factors for T-Welded Connections–Finite Element Simulations and Fatigue Behavior. *Soldagem & Inspeção,* 22(2), pp. 194-206.

Mendez, P. F., & Eagar, T. W. (2003). Penetration and defect formtion in high-current arc welding*. Welding Journal*, 82(10), p. 296.

Mostafa, N. B., & Khajavi, M. N. (2006). Optimization of welding parameters for weld penetration in FCAW. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering,* 16(1/2), pp. 132-138.

Ottersböck, M. J., Leitner, M., Stoschka, M., & Maurer, W. (2016). Effect of Weld Defects on the Fatigue Strength of Ultra High-strength Steels. *Procedia Engineering*, 160, pp. 214-222.

Panjeh S., E. (1995). Stress concentration factors for multiplanar joints *in RHS. HERON*, 40 (4).

Perović, Z. D. (2011). The weld profile effect on stress concentration factors in weldments. *In 15th International Research/Expert Conference: Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Prague*.

Peterson, W., Accorsi, I., & Coon, T. (2006). Review of weld mechanical property specification requirements in *AWS D8. 1 (Proposed). In Sheet metal welding conference XII, Livonia, MI.*

Pollard, B., & Cover, R. J. (1972). *Fatigue of steel weldments. Weld. J,* 51(11), *83*(c), 544-554.

Rudzey, G. F. (2014). Effect of welding defects and the number of repair passes on the fatigue resistance of welded joints in aluminum alloys. *Welding International,* 28(11), pp. 907-909.

Smith, I. F. C., & Smith, R. A. (1982). Defects and crack shape development in fillet welded joints. Fatigue & Fracture of Engineering *Materials & Structures*, 5(2), pp. 151-165.

Svenson, L. E. (2017*). Control of microstructures and properties in steel arc welds.* Routledge.

Williams, H. E., Ottsen, H., Lawrence, F. V., & Munse, W. H. (1970). *The effects of weld geometry on the fatigue behavior of welded connections*. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Wintle, J. B., & Pargeter, R. J. (2005). *Technical failure investigation of welded structures (or how to get the most out of failures*. American Society of Mechanical Engineers. *Engineering Failure Analysis*, *12*(6), p.p. 1027-1037.

Zapffe, C. A., & Sims, C. E. (1941). Hydrogen embrittlement, internal stress and defects in steel*. Trans. AIME,* 145(1941), pp. 225-271.