

Efecto del ciclo térmico sobre la microestructura de la zona afectada térmicamente de juntas soldadas de aceros inoxidables disímiles obtenidas por el proceso SMAW

Miguel Olmos Molinares

Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, miguelolmosmolinares@gmail.com

Katherine Martínez Orozco

Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, kathrenmar@hotmail.com

Mentor:

Jimmy Unfried Silgado, PhD.

Docente e investigador, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia, jimy.unfried@uac.edu.co

RESUMEN

En este trabajo se estudian las modificaciones microestructurales de la zona afectada térmicamente (ZAT) de la unión disímil entre un acero inoxidable austenítico AISI/SAE316L y uno ferrítico, AISI/SAE 430 usando el proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido SMAW y material de aporte de acero inoxidable dúplex E2205. Se efectuó caracterización microestructural y determinación de la composición química de los aceros en estado de entrega, las cuales fueron comparadas con caracterización de las juntas soldadas llevadas a cabo con microscopía óptica y barridos de dureza. La medida de los ciclos térmicos a lo largo de la junta soldada fue realizada mediante la instalación de termopares estratégicamente localizados y un sistema de adquisición de datos (ADQ). Fueron relacionados los cambios microestructurales de la ZAT de cada acero con la dureza y los ciclos térmicos medidos, observándose cambios estructurales y de propiedades más drásticos en el acero ferrítico.

Palabras clave: Soldadura, acero inoxidable, ciclos térmicos.

ABSTRACT

In this work are studied the microstructure changes at heat affected zone (HAZ) in a dissimilar welded joint between austenitic AISI/SAE316L and a ferritic AISI / SAE 430 stainless steels using shielded metal arc

welding process and E2205 duplex stainless steel filler metal. Microstructure characterization and measurements of chemical composition were carried out with the aim to compare with characterized welded joints. Characterization was completed with optical microscopy and hardness measurements. Thermal cycles along welded joint were measured by installing thermocouples and a data acquisition system (ADQ). HAZ microstructure changes were associated with hardness and the measured thermal cycles, showing the most drastic changes in ferritic stainless steel side.

Key words: Welding, stainless steels, thermal cycles.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de estudiar las modificaciones microestructurales en la unión disímil de aceros inoxidables, se debe a que estos aceros son cada vez más usados en las industrias química, petroquímica, alimentaria, farmacéutica, debido, principalmente, a sus excelentes propiedades mecánicas y químicas. La soldadura en aceros inoxidables disímiles reviste gran importancia a nivel industrial, ya que hace posible la combinación de las mejores propiedades químicas y mecánicas de cada material en una sola estructura (Ospina et al., 2007).

Los aceros inoxidables austeníticos 316L contienen entre 16-18%Cr, 10-14%Ni y 2% Mn (máx), con bajos contenidos de Carbono 0,03% máx. (de ahí la denominación L de *low*), (Lee, 1998). Estos aceros

permiten trabajo en frío y en caliente, poseen gran resistencia al impacto, buena soldabilidad y baja maquinabilidad. Tienen la mejor resistencia a la corrosión en altas temperaturas entre los aceros inoxidable austeníticos; también pueden llegar a ser ligeramente magnéticos. (Madhusudhan et al., 2005).

Los aceros inoxidable ferríticos 430 poseen 16-18%Cr, 0,75% y 1% máximo de Ni y Mn, respectivamente, con un contenido de Carbono 0,12% máx. Estas aleaciones son magnéticas, tienen buena ductilidad y son resistentes a la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas, presentando buena resistencia a la corrosión bajo esfuerzos y a la corrosión por picadura (Moreno, 2009). La presencia de interfase austenita- martensita induce esfuerzos internos debido al cambio volumétrico que conlleva a su formación, aumentando la susceptibilidad a la fisuración

Cuando se realizan soldaduras disímiles entre aceros inoxidable austeníticos y ferríticos es necesario controlar la entrada de calor, debido a las diferencias metalúrgicas en la ZAT que pueden llevar a la precipitación de carburos en el austenítico y transformaciones de fase indeseables en el acero inoxidable ferrítico (Laufgan, et al., 2003). La precipitación de carburos de cromo y nitruros, revisten especial atención, ya que estos empobrecen los límites de grano en contenido de cromo. Tres fenómenos de fragilización influyen en las propiedades mecánicas de los aceros inoxidable ferríticos: (1), fragilización a 475°C, (2) precipitación de fase sigma, y (3) fragilización a altas temperaturas (Bran, 2008). La formación de fases indeseables tales como la fase sigma, Chi y alfa prima, podrían causar agrietamiento durante la solidificación (Granjon, 1991).

En este trabajo se estudiará la unión disimil de aceros inoxidable austeníticos AISI/SAE 316L y aceros inoxidable ferríticos AISI/SAE 430 con aporte de acero inoxidable dúplex E2205, principalmente para determinar los ciclos térmicos, no reportados en la literatura, y evaluar su influencia sobre el comportamiento microestructural a cada lado de la ZAT de la junta soldada obtenida.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Para el estudio se prepararon placas de acero inoxidable austenítico AISI/SAE 316L y AISI/SAE ferrítico 430, con dimensiones 100 × 50 × 4 mm, como se muestra en la Figura 1. La junta soldada se preparó de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 1. La

composición química de cada acero se obtuvo a través de espectrometría por emisión óptica, y los resultados se muestran en la Tabla 1.

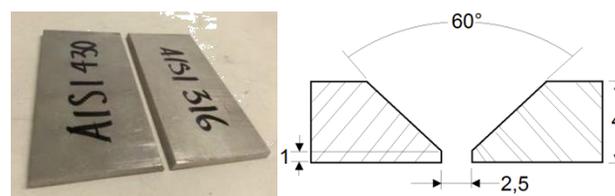


Figura 1. Placa de soldadura y configuración de junta.

Tabla 1: Composición química de los aceros [%peso]

Material	Fe	C	Si	Ni	Cr	Mo	Mn
316L	Bal.	0,011	0,56	9,99	16,8	2,02	1,35
430	Bal.	0,03	0,49	0,15	16,7	0,0	0,35

2.2. PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

El proceso de soldadura al arco eléctrico con electrodo revestido SMAW se realizó en una máquina Lincoln RX450® con EPDC. Se usaron electrodos de acero inoxidable dúplex E2205 marca Eutectic Castolin® con Ø1/8" y longitud 95mm. Los parámetros de soldadura usados son mostrados en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros de soldadura aplicados.

Parámetros	s (mm.,min ⁻¹)	V (V)	I (A)
Valor	180,5	48,7	51,6

La medición de la intensidad de corriente y el voltaje se llevaron a cabo con una pinza voltiamperimétrica Fluke® 336. Para la medición del tiempo se utilizó un cronómetro digital, y para la medida de longitud del cordón, un calibrador digital.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE JUNTAS

A partir de las probetas de juntas soldadas se extrajeron muestras con un ancho total de 25mm montadas en Baquelita utilizando una cortadora de disco Metkon® - Metacut-250 con abundante refrigeración. Se usó preparación metalográfica estándar lijando con papeles de granulometría 200, 320, 400, 600, 1200 y 2000. El pulido posterior se realizó con pasta de diamante de 3 µm y 1 µm, seguido de Alúmina de 0,5 µm y 0,3 µm. El ataque químico fue realizado con agua regia (30 ml de ácido Nítrico, 30 ml de ácido Clorhídrico más 10 ml de Glicerina) por espacio de 20 segundos. (ASTM E 407, 2011). La observación metalográfica se llevó a cabo en un microscopio óptico Olympus® GX51.

2.4. MEDIDA DE CICLOS TÉRMICOS

Para medir los ciclos térmicos durante el proceso de soldadura se instalaron termopares tipo K en los lugares mostrados en la Figura 2. Los datos de temperatura durante la soldadura fueron detectados mediante un sistema de adquisición de datos National Instrument® CDAQ-9188.

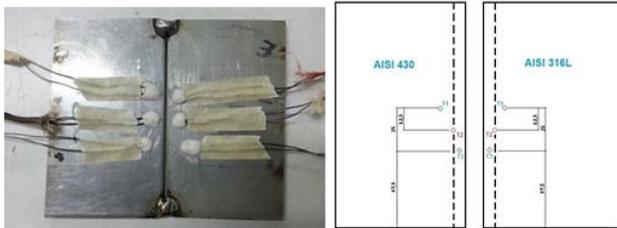


Figura 2. Ubicación e instalación de los termopares.

Cada termopar fue instalado a 2mm de profundidad de la superficie de raíz y se adherió con ayuda de un cemento térmico que aísla y protege la punta en contacto con la zona de la ZAT que se pretende medir. Debe destacarse que raramente las medidas de los ciclos térmicos en aceros inoxidable disimiles son reportadas en la literatura, por lo cual se convierte en un aporte importante de este trabajo.

2.4. MEDIDA DE DUREZAS

Barridos de dureza en la escala Vickers con una carga de 3000grf y duración de 10s se llevaron a cabo en el centro y a lo ancho de la junta a intervalos de 2 mm. Los barridos se realizaron con la ayuda de un durométero Zwick/ZHU® 187.5.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL METAL BASE

La figura 3 muestra la microestructura de los metales de base antes de la soldadura. El acero 316L en estado de entrega, presenta una estructura de grano recocido donde se aprecian granos de tamaño heterogéneo con abundante maclado, posible presencia de precipitados ($Cr_{23}C_6$), mientras que en el medio del espesor de la placa es notoria una línea de bandeado que atraviesa toda la placa. El acero AISI/SAE 430 en estado de entrega, presenta una estructura de deformación en frío con morfología de granos alargados heterogéneos, en la cual no es perceptible la presencia de segunda fase, pero con posible presencia de precipitados ricos en Mo (Olmos, 2014).

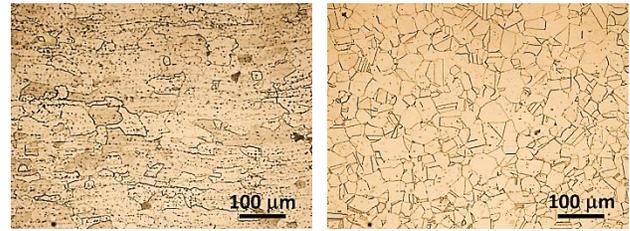


Figura 3. Estructura del metal base en estado de entrega 316L (derecha) y 430 (izquierda).

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ZAT

La figura 4 muestra el aspecto del cordón de soldadura después de realizada la union. La figura 5 muestra una macrografía de la sección transversal de soldadura donde se aprecian las notorias diferencias entre la microestructura de la ZAT a cada lado de la junta.



Figura 4. Aspecto del cordón de soldadura.

Del lado del acero AISI/SAE 316L (derecho), no se aprecian cambios drásticos de tamaño de grano ni de fase en la ZAT. En el lado del acero AISI/SAE 430 los cambios microestructurales son notorios, con una marcada ocurrencia de recristalización en la ZAT y el crecimiento de una segunda fase dentro de los granos con crecimiento anormal. Se muestra la línea de fusión (LF) de ambos lados.

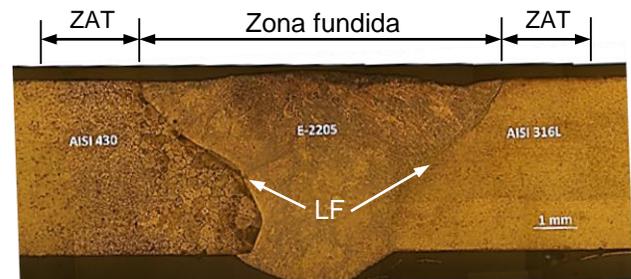


Figura 5. Macrografía de la junta soldada disímil.

La Figura 6 muestra los resultados de los barridos de dureza, los cuales son coherentes con la ocurrencia de diferencias en la ZAT de ambos aceros a lado y lado de la zona de fusión.

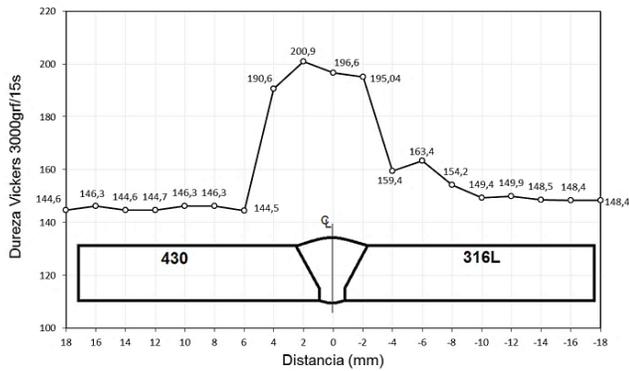


Figura 6. Barrido de durezas de la junta soldada.

Los resultados del ensayo de dureza muestran un cambio ligeramente mayor en la ZAT del lado del acero ferrítico donde los valores coinciden con los cambios microestructurales observados y la mayor dilución obtenida (Olmos, 2014).

El barrido de durezas muestra un cambio significativo en la ZAT del lado del acero ferrítico donde los mayores valores coinciden con la región donde ocurre recristalización en los agregados policristalinos adyacentes a la línea de fusión del acero ferrítico, los cuales también presentan crecimiento de martensita en los límites, lo que junto a la dilución, explicaría ese aumento súbito en el valor de la dureza (hasta casi ~200 HV), como se observa en la Figura 7.

En el acero austenítico, el aumento de dureza en la ZAT es más progresivo, alcanzando valores inferiores a los del lado del ferrítico. Los cristales de este acero, por su estado de recocido, no presentan deformación acumulada, por lo cual no poseen la energía interna necesaria para promover recristalización y no hay cambios visibles en el tamaño de grano de la ZAT en este acero, salvo ligeras modificaciones en el maclado de los granos, como se muestra en la Figura 8 (Briones et al., 2014).

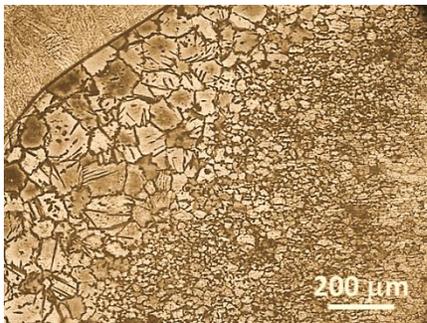


Figura 7. Microestructura de la ZAT en el lado del acero ferrítico.

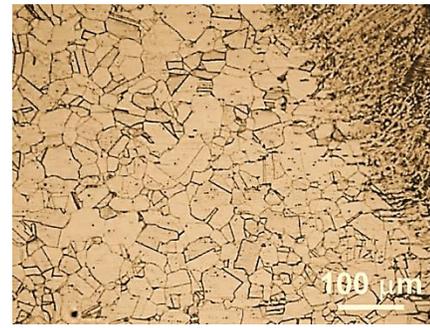


Figura 8. Microestructura de la ZAT en el lado del acero austenítico.

En la Figura 9 se muestran los ciclos térmicos medidos en la junta soldada. En el acero 430 se obtuvieron picos de temperaturas mayores para distancias equivalentes en la ZAT del 316L. Si se observan los resultados de los picos de temperatura registrados por los termopares, se notará que el punto del 430 más cercano a la ZAT registró un valor más alto de temperatura en comparación al mismo punto en el lado del 316 L (1311,29°C vs. 1262,90°C, respectivamente).

Las diferencias en los ciclos térmicos a lado y lado de la zona fundida están íntimamente relacionadas con los cambios microestructurales observados en la ZAT. Las velocidades de enfriamiento en el intervalo 1800 a 1300°C experimentadas en el acero ferrítico hacen que se toque la nariz de la transformación martensítica, por lo cual esta fase aparece como agujas que crecen desde los límites de grano como se aprecia en la Figura 7, lo cual explica las altas durezas en la ZAT de este material, a diferencia de la ZAT del acero 316L. La aparición de Martensita puede afectar el comportamiento frente a la corrosión en el acero inoxidable ferrítico (Vargas, 2010).

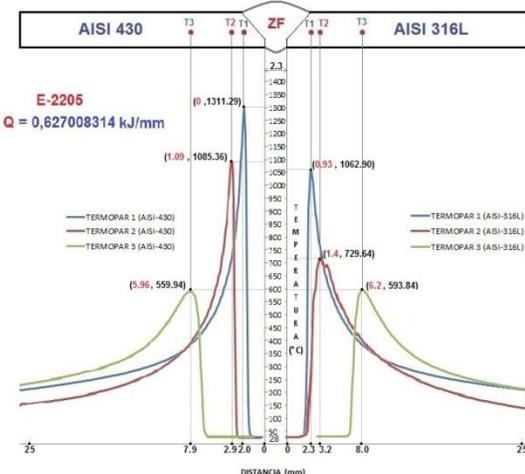


Figura 9. Ciclos térmicos medidos experimentalmente en la junta soldada de aceros disimiles.

Por último, se observa en la Figura 5 que ocurrió dilución diferenciada en la zona de fusión contribuyendo a la diferencia de durezas en ambos lados de la línea de fusión en el cordón. De la Figura 5 se aprecia que la dilución en el acero austenítico podría ser mayor que en el ferrítico, lo que podría incidir en el modo de solidificación en la zona fundida y este a su vez, en las propiedades, lo cual explica el aumento de durezas heterogéneo en la zona fundida.

4. CONCLUSIONES

Se determinaron los ciclos térmicos en soldaduras disímiles de aceros inoxidable AISI 316L/430 con proceso SMAW, valores difícilmente reportados en la literatura. La entrada de calor obtenida por causa de estos ciclos térmicos produjo modificaciones microestructurales heterogéneas en la zona afectada térmicamente en la junta soldada. Estos cambios fueron más drásticos en el lado del AISI 430, en el que se aprecian cambios en la morfología de granos adyacentes a la zona de fusión por recristalización, la formación de Martensita en la zona de grano de grueso y posibles precipitados, además de mayor dilución. En el acero AISI 316L no se presentaron cambios morfológicos visibles, tal como la modificación del tamaño de grano o en las maclas. Los fenómenos metalúrgicos en la ZAT y región parcialmente mezclada del acero inoxidable ferrítico explica sus ligeramente mayores durezas. En contraste la baja alteración microestructural en el acero inoxidable austenítico es coherente con la baja alteración de la dureza en la ZAT.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar sus agradecimientos a la Universidad Autónoma del Caribe (UAC), al Grupo de Investigación en Materiales, Procesos y Tecnologías de Fabricación – IMTEF por el apoyo institucional y financiero otorgado para la realización de este trabajo. A la Dra. Claudia Serna y a la Ing. Sara Aguilar de la Universidad de Antioquia, por el suministro de los materiales y el apoyo en los resultados. Agradecimiento especial a los Ing. Jorge Pacheco Yepes y Jennifer Villa Domínguez por su colaboración en la fase experimental.

REFERENCIAS

ASTM Standard E 407, 2007 (2011), "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys," ASTM International, West Conshohocken.

Bran R. Julio, (2008). "Estudio de la soldabilidad del acero inoxidable ferrítico AISI 430 en soldaduras circunferenciales por el proceso GTAW". PhD. Tesis, Universidad de Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pp. 18-26.

Briones Flores et al., (2014). "Caracterización microestructural y mecánica de una soldadura disímil de aceros inoxidables 316L/A1-6XN" Rev. LatinAm. Metal. Mat. 2014, 34(2): 306-315

Madhusudhan G. Reddy, T.Mohandas, A.Sambasiva Roa. (2005). Influence of welding processes on microstructure and mechanical properties of dissimilar austenitic-ferritic stainless steel welds. Materials and Manufacturing Processes, 20(2), pp. 147-173.

Moreno R. Arturo, (2009), "Caracterización y propiedades mecánicas de la soldadura de un acero inoxidable ferrítico AISI 430". PhD. Tesis, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.,pp 27-28

Granjon Henry. (1991). "Fundamentals of welding metallurgy" Woodhead Publishing Ltd.

Laufgan, Sergio G. (2003). "Tratamiento térmico de soldadura". TERMO SOLDEX S.A., pp 18-24.

Lee, Ch (1988). Soldabilidad y análisis microestructural de aceros inoxidables austeníticos grado nuclear. PhD. Tesis. Universidad de Tennessee. pp. 465-465.

Olmos, Miguel (2014). Efecto de los ciclos térmicos sobre la microestructura de la zona afectada térmicamente de juntas soldadas de aceros inoxidables disímiles obtenidas por el proceso SMAW. Trabajo de pregrado. Universidad Autónoma del Caribe. pp. 120-145.

Ospina, Ricaurte et al. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disímiles, Scientia et Technica Año XIII, 34, pp. 273-278.

Vargas H., Jesús (2010). "Fabricación y caracterización del acero inoxidable 430 como estándar en las pruebas de polarización de acuerdo a la norma ASTM A65" Instituto Politécnico Nacional, diciembre de 2010, pp. 75.