



TRANSFORMACIONES MICROESTRUCTURALES DE UNIONES SOLDADAS DE ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO CON ACERO INOXIDABLE FERRÍTICO

Sara Aguilar^{1*}, Ramón Tabares², Claudia Serna³

1 Estudiante Maestría en Ingeniería, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

2 Estudiante Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

3 PhD Ingeniera Mecánica, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia

*saritamaría272@gmail.com

RESUMEN

En este trabajo se estudian los fenómenos metalúrgicos que ocurren en la soldadura SMAW de un acero inoxidable ferrítico AISI 430 con un acero inoxidable austenítico AISI 316L. Para el estudio se utilizaron dos tipos de electrodos: austenítico AWS E309L y dúplex AWS E2209-16, ambos con un diámetro de 3.2 mm. La unión se realizó con un solo pase y manteniendo alta la entrada de calor. Se evaluó la influencia del tipo de electrodo en la evolución microestructural de la zona afectada por el calor y de la zona de fusión, encontrando diferencias en la morfología de la ferrita δ para ambos depósitos, evidenciando crecimiento y refinación de grano ferrítico y formación de martensita en la zona afectada por el calor del metal base ferrítico. Se evaluó también la resistencia a la tensión hallando similitudes en los dos depósitos. La dureza y el porcentaje de ferrita δ fueron medidos.

Palabras Clave: Soldadura de aceros inoxidables, SMAW, metalurgia de la soldadura, acero inoxidable austenítico, acero inoxidable ferrítico.

ABSTRACT

The metallurgical transformations of SMAW welding of AISI 316L austenitic stainless steel with AISI 430 ferritic stainless steel were studied. Two different electrodes, AWS E309L austenitic and AWS E2209-16 duplex stainless steels 3.2 mm diameter were used to perform the study. The joining was made with a single pass welding and keeping a high heat input. The influence that the electrodes have on the microstructural evolution in the heat affected zone and fusion zone was evaluated. Differences between δ ferrite morphology were found for both weld metals. The heat affected zone of the ferritic side showed grain coarsening and grain refinement with martensite at the grain boundaries. Tensile strength was similar for both welding conditions. Microhardness and δ ferrite percentage were measured as well.

Keywords: Stainless steel welding, SMAW, welding metallurgy, austenitic stainless steel, ferritic stainless steel.

1 INTRODUCCIÓN

La soldadura de un acero inoxidable austenítico con un acero inoxidable ferrítico se estudia cuidadosamente por la pobre soldabilidad de los aceros inoxidables ferríticos y el agrietamiento en caliente de los aceros inoxidables austeníticos. De un lado los aceros inoxidables austeníticos

(AIA) son muy resistentes al impacto y difíciles de maquinarse, tienen la mejor resistencia a la formación de escamas de los aceros inoxidables, además su resistencia a la corrosión suele ser mejor que las de los aceros inoxidables martensíticos o ferríticos. Su soldabilidad no es problemática. Es necesario escoger electrodos que puedan proporcionar de 5 a 10% de ferrita delta en la zona de fusión, lo que es esencial para prevenir el agrietamiento en caliente [1].

Por otro lado, los aceros inoxidables ferríticos (AIF) presentan mayor resistencia a la corrosión bajo tensión que los aceros inoxidables austeníticos. Asimismo, por su alta conductividad térmica y baja expansión térmica, los AIF son utilizados en intercambiadores de calor, tuberías y recubrimientos [2]. Sin embargo, durante la soldadura de estos aceros se presentan problemas de engrosamiento de grano en la zona de fusión y la zona afectada térmicamente, lo que disminuye la tenacidad y la ductilidad. Además, puede presentarse refinamiento de grano y formación de martensita [3].

El objetivo de este trabajo es estudiar los fenómenos metalúrgicos que ocurren en la soldadura SMAW de un acero inoxidable ferrítico AISI 430 con un acero inoxidable austenítico AISI 316L, empleando dos tipos diferentes de electrodos: austenítico E309L y dúplex E2209-16, y alta entrada de calor.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se realizaron uniones soldadas disímiles mediante el proceso SMAW a tope con bisel en “V”. Los metales base utilizados fueron acero inoxidable austenítico AISI 316L y acero inoxidable ferrítico AISI 430 comerciales, de 4 mm de espesor, y tamaños de 200 mm x100 mm. Se utilizaron dos metales de aporte diferentes: AWS E2209-16 dúplex y E309L austenítico, ambos de 3.2 mm diámetro. La unión se realizó con un solo pase y manteniendo alta la entrada de calor. La composición química de los electrodos proporcionada por los proveedores y la composición química de los metales base determinada mediante espectrometría de emisión óptica (OES) se presentan en la tabla 1. La soldadura se aplicó de forma manual, y los parámetros controlados fueron la corriente, la tensión del arco y la velocidad de soldadura, para la obtención de alta entrada de calor en un intervalo entre 1,7 y 1,8 kJ/mm para el aporte austenítico y entre 1,4 y 1,8 kJ/mm para el aporte dúplex.

Las uniones soldadas se caracterizaron microestructuralmente en la sección transversal por medio de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Además, se obtuvieron perfiles de la cantidad de ferrita δ haciendo mediciones cada 1,25 mm con un ferriscopio marca Fischer MP30ES. Se hicieron medidas de microdureza Vickers con una carga de 500 g y 15 s de sostenimiento desde el metal base ferrítico hasta el metal base austenítico cada 0,65 mm.

Se obtuvieron probetas para los ensayos de resistencia a la tensión en sentido transversal al cordón de soldadura de acuerdo con la norma ASTM E8, se emplearon probetas de 2 mm de espesor. Se evaluó la influencia del tipo de electrodo en la evolución microestructural de la zona afectada por el calor y de la zona de fusión.

Tabla 1. Composición química de los metales base y metales de aporte.

Acero inoxidable	C (%w)	Cr (%w)	Ni (%w)	Si (%w)	Mn (%w)	Cu (%w)	Ti (%w)	Mo (%w)	P (%w)	N (%w)
AISI 430	0,03	16,66	0,15	0,49	0,35	0,10	0,01	-	0,03	-
AISI 316L	0,01	16,84	10,00	0,56	1,35	0,10	0,01	2,02	0,04	-
E309L	0,03	23,70	13,70	0,80	0,85	0,06	-	0,04	0,03	-
E2209-16	0,03	22,80	9,30	0,73	0,68	0,11	-	3,10	0,02	0,20

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización microestructural

El análisis microestructural de las uniones soldadas permitió determinar en la zona de fusión (ZF) la cantidad y morfología de la ferrita delta y en la zona afectada térmicamente (ZAT) el tamaño de grano, las fases presentes y la microestructura del metal base (MB). Sólo se encontraron diferencias significativas en la ZF, como se muestra en las figuras 1 y 2, las cuales se detallan a seguir.

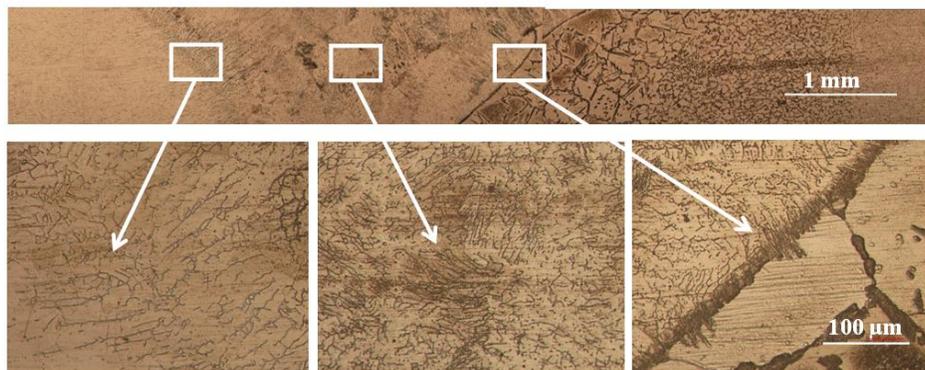


Figura 1. Microestructura de la soldadura SMAW AISI 316L-AWS E309L-AISI 430.

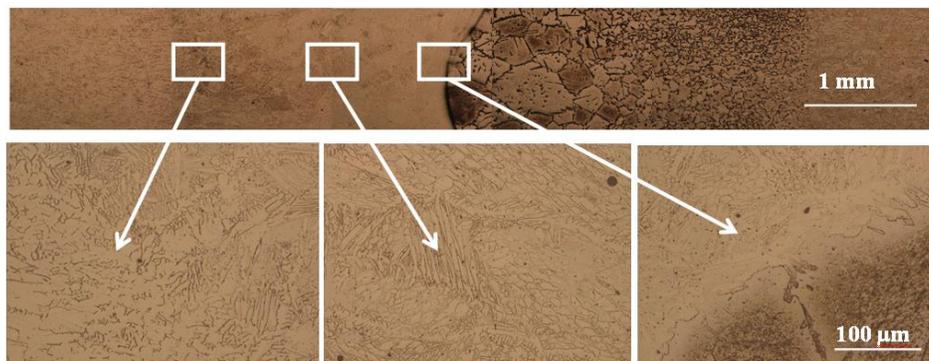


Figura 2. Microestructura de la soldadura SMAW AISI 316L-AWS E2209-16-AISI 430.

En la ZF de la soldadura realizada con el electrodo austenítico (ZFA) se presentó una solidificación en modo FA (ferrita-austenita), donde se observó una matriz austenítica con dendritas esqueléticas y en listones (oscuras) de ferrita δ , lo cual ha sido reportado por otros autores [4]. La solidificación FA empieza con la precipitación de ferrita primaria seguida de la formación de austenita en la celda ferrítica y el límite de la dendrita, al avanzar el enfriamiento, la ferrita se hace más inestable y la austenita consume a la ferrita por medio de una reacción de difusión controlada [5]. En el caso de la zona de fusión del metal de aporte dúplex (ZFD), se presentó un modo de solidificación F (ferrita), caracterizado por la precipitación de austenita Widmanstätten en los límites de grano ferríticos. En éste modo la ferrita es la única fase que se forma directamente del líquido y la transformación ferrita-austenita se da en estado sólido.

Con respecto a la zona afectada térmicamente del lado del metal base austenítico (ZAT-A), se evidenció la precipitación de carburos que podrían ser del tipo $M_{23}C_6$ en los límites de grano [6], además no se presentó crecimiento de grano del lado del MBA para ninguno de los casos estudiados. Se encontró en el límite de fusión con el MBA una zona parcialmente fundida que consta de algunos granos equiaxiales de austenita con dendritas de ferrita δ en los límites de grano austenítico. En ambos casos la microestructura del MBA consistió en granos equiaxiales de austenita con maclas.

En el límite de fusión (LF) y en la zona afectada térmicamente del metal base ferrítico (ZAT-F), la cual fue de 3mm, se identificaron las siguientes características, comunes para ambas condiciones de soldadura:

En el límite de fusión con el metal base ferrítico (MBF) se evidenció una solidificación columnar del metal de aporte que crece a partir de los granos de ferrita.

La ZAT-F presentó las microestructuras típicas de uniones soldadas en materiales deformados plásticamente, es decir, adyacente al límite de fusión se encuentra una zona de granos gruesos seguida de una zona de granos recristalizados. En esta última, la temperatura alcanzada promueve el proceso de recristalización en el cual se forman nuevos granos por el movimiento y aniquilación de las dislocaciones presentes en los granos previamente deformados del metal base. La zona de granos gruesos se forma debido a que por la mayor cercanía a la zona de fusión, se alcanza una temperatura lo suficientemente alta para promover la migración de los límites de grano y así el crecimiento de los granos recristalizados [5,6].

En toda la ZAT-F se evidenció la presencia de martensita en los límites de grano ferrítico. La martensita presente en los límites de grano proviene de la austenita formada a alta temperatura. La alta solubilidad del carbono en la austenita que da origen a la martensita presente principalmente en los límites de grano, se traduce en ferrita sin sobresaturaciones de carbono y finalmente en una ZAT libre de carburos [5].

Se encontraron precipitados en el metal base ferrítico, los cuales no pudieron ser plenamente identificados. Estos precipitados son similares a los reportados por Duarte [7] quien los identificó como $(Fe,Cr)_2Mo$.

3.2 Resistencia a la tensión, dureza y cantidad de ferrita delta δ

En la tabla 2 se muestran los resultados de los ensayos de tensión, se evidencia que no existe una diferencia significativa en las propiedades tensiles de las uniones soldadas para las condiciones evaluadas. Para ambos electrodos la falla ocurrió en el MBF lejos de la ZAT mostrando un comportamiento dúctil. Estos resultados indican que el crecimiento de grano ferrítico y la formación de martensita generados en la ZAT-F discutidos en la sección anterior no fueron factores determinantes en la falla de las probetas sometidas al ensayo.

Tabla 2. Resultados de los ensayos de resistencia a la tensión.

Electrodo	Resistencia última, MPa	Límite de cedencia, MPa	%Elongación
Austenítico, E309L	499	387	34
Dúplex, E2209-16	488	369	32

Los perfiles de microdureza obtenidos se muestran en la figura 3a. No se encontró ninguna diferencia significativa, las pequeñas variaciones encontradas en la ZAT se atribuyeron a la influencia de las fases presentes en los límites de grano (martensita y carburos). La dureza promedio del aporte austenítico es de 250HV y la del aporte dúplex es de 252HV.

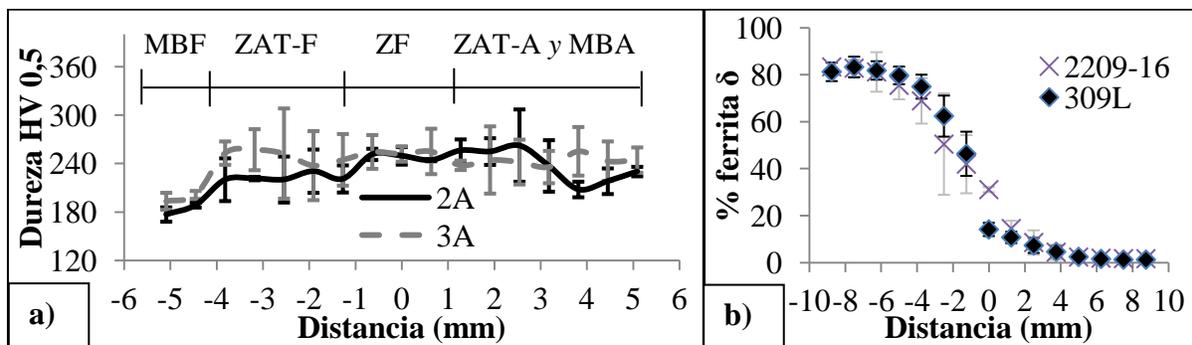


Figura 3. a) Perfiles de microdureza, b) perfiles de porcentaje de ferrita δ .

La cantidad de ferrita delta medida con el ferritoscopio se muestra en la figura 3b. Se observa que fue de 14% en la ZFA y 31% en la ZFD. Los datos concuerdan con los calculados con el diagrama de Schaeffler utilizando 30% de dilución (15% de ferrita δ para la ZFA y 45% de ferrita δ para ZFD) para el aporte austenítico, sin embargo, están por debajo del valor estimado para el aporte dúplex. Estos resultados podrían explicarse debido a que el diagrama de Schaeffler no considera el nitrógeno dentro de los cálculos de níquel equivalente, y el nitrógeno es un elemento promotor de la austenita comúnmente empleado en los electrodos dúplex [5].

3 CONCLUSIONES

Con base en los resultados experimentales para la unión de acero inoxidable austenítico con acero inoxidable ferrítico utilizando un metal de aporte ferrítico y un metal de aporte dúplex, puede concluirse que:

En la microestructura, para las condiciones evaluadas la principal diferencia se encontró en la zona de fusión, en la cual se tiene una morfología de ferrita delta vermicular y en listones para el depósito austenítico y ferrita δ con austenita Widmanstätten para el depósito dúplex. En la ZAT del lado austenítico, se evidenció la presencia de algunos precipitados. Mientras que en la ZAT del lado ferrítico, la microestructura consiste de una zona de grano ferrítico grueso y una zona de grano ferrítico recristalizado, con martensita en límite de grano y libre de precipitados.

En relación con las propiedades mecánicas evaluadas, los dos materiales de aporte se comportan satisfactoriamente, las propiedades tensiles y los perfiles de microdureza en ambos casos fueron similares. Los cambios en el tamaño de grano ferrítico, la formación de martensita y la precipitación de fases no afectaron la resistencia última a la tensión de las uniones soldadas.

4 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al CODI de la Universidad de Antioquia por el apoyo financiero a través del proyecto MDC 01-7-10 y a Colciencias por la beca Joven Investigador.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rajaković-Ognjanović, V., “Corrosion of an austenite and ferrite stainless steel weld”, *Journal of the Serbian Chemical Society*, Vol. 76, 1027–1035, 2011.
2. Labanowski, J., “Stress corrosion cracking susceptibility of dissimilar stainless steels welded joints”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 20, 255-258, 2006.
3. Lakshminarayanan, A.K., “Effect of Welding Processes on Tensile and Impact Properties, Hardness and Microstructure of AISI 409M Ferritic Stainless Joints Fabricated by Duplex Stainless Steel Filler Metal”, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 16, 66-72, 2009.
4. Madhusudhan, G., “Influence of welding processes on microstructure and mechanical properties of dissimilar austenitic-ferritic stainless steel welds”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 20, 147-173, 2005.
5. Lippold, J., “Welding metallurgy and weldability of stainless steel”, USA, Jhon Wiley and Sons, 2005.
6. Easterling, K., “Introduction to the physical metallurgy of welding”, UK, Butterworths Monographs in Materials, 1983.
7. Duarte, P., “Mechanical and Microstructural Characterization of Weldments of Ferritic Stainless Steel AISI 444 Using Austenitic Stainless Steels Filler Metals”, *Journal of ASTM International*, Vol. 9, 1-9, 2012.