



COMPARACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE UNA TUBERÍA DE ACERO INOXIDABLE AISI/SAE 304 SOLDADO POR LOS PROCESOS SMAW Y GMAW¹

A. Galvis²
W. Hormaza³

Resumen

Este trabajo busca determinar las diferencias existentes en los procesos de unión SMAW (soldadura con electrodo revestido) y GMAW (soldadura con gas) a nivel micro estructural así como de propiedades mecánicas en un acero AISI/SAE 304. La comparación se basó en una caracterización de las soldaduras y su relación con las diferentes propiedades mecánicas obtenidas en las pruebas de los 2 procesos de soldadura. El incremento del porcentaje de ferrita dentro de la matriz austenítica produce un aumento de la resistencia mecánica y una disminución de la ductilidad en los aceros inoxidable austeníticos AISI/SAE 304. Adicionalmente se desarrolla un cambio micro estructural, dictaminado por el incremento del porcentaje de la morfología de ferrita en laminas (Lathy) adicional a la morfología de ferrita esquelética dentro de la matriz austenítica.

Palabras clave: Caracterización microestructural; Procesos de soldadura por arco GMAW y SMAW; propiedades mecánicas; Tubería de acero inoxidable 304

MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL COMPARATION OF AN AISI/SAE 304 STAINLESS STEEL PIPE WELDED BY THE PROCESSES SMAW AND GMAW

Abstract

This work search for the determination of the microstructural and mechanical differences between the welding processes SMAW (Shield Metal Arc Welding) and GMAW (Gas Metal Arc Welding) on an AISI / SAE 304 steel. The comparison was based on a characterization of the welding joints and their relationship with the mechanical properties of the two welding processes. The thriving of the Ferrite content in the austenitic matrix produce an increase in the mechanical strength and a diminution of the ductility in AISI /SAE 304 Stainless Steels. Additionally, a transformation of the microstructure was observed mainly in the increment of the ferrite Lathy-morphology percentage in addition to the ferrite vermicular-morphology found in the austenitic matrix.

Key words: Arc Welding Processes GMAW and SMAW; Mechanical properties; Microstructural characterization; Stainless steel 304 pipe.

¹ Contribución técnica al 65° Congreso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Carrera 1ª Este No. 18A-70 Bogotá – Colombia / Universidad de los Andes. E-mail: galvi@uniandes.edu.co / andresgalvisescobar@gmail.com

³ Carrera 1ª Este No. 18A-70 Bogotá – Colombia / Universidad de los Andes

1 INTRODUCCION

Durante varios años los aceros inoxidable austeníticos se han utilizado en aplicaciones industriales que van desde tuberías y tanques a presión hasta aplicaciones estructurales, debido a su buena resistencia mecánica como excelente resistencia a la corrosión. Estas propiedades se atribuyen en gran parte a su fase austenítica, la cual aparece al agregarse elevadas cantidades de níquel y otros aleantes como carbono, manganeso, y nitrógeno.⁽¹⁻⁴⁾ Así mismo, diversos métodos de sujeción como la soldadura han sido ampliamente utilizados entre estos metales, no solo por ser un proceso de alta productividad sino también por su bajo costo y buena calidad. Adicionalmente para las diversas aplicaciones de un acero inoxidable austenítico 304 este tipo de proceso es de gran utilidad para la fácil unión de laminas o tubos, además de ser un importante tema de investigación en cuanto al mejoramiento de sus propiedades.^(2,5-8) Por lo anterior, este trabajo se direcciona a observar la influencia del contenido de ferrita en la microestructura y sobre las propiedades mecánicas de un tubo de acero inoxidable austenítico AISI/SAE 304 soldado con los procesos de soldadura Shield Metal Arc Welding (SMAW) y Gas Metal Arc Welding (GMAW).

2 MATERIALES Y METODOS

Los procesos de soldadura SMAW y GMAW fueron utilizados para la unión de dos tubos de acero inoxidable AISI/SAE 304 (Figura 1), utilizando diferentes materiales de aporte con sus respectivos parámetros de proceso (Tabla 1). Además, los cordones se aplicaron de manera plana y descendente en cuatro subdivisiones (Figura 1(a) y tabla 1).

Tabla 1. Parámetros y entradas de calor para los procesos SMAW y GMAW

Parámetros y entradas de calor para los procesos de soldadura									
Proceso SMAW , Electrodo 308L-16					Proceso GMAW , Alambre ER308Si				
Subdivisiones para la aplicación de los cordones	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad [mm/sg]	(H_i) Entrada de calor [J/mm]	Voltaje [V]	Amperaje [A]	Velocidad [mm/sg]	(H_i) Entrada de calor [J/mm]	
1	25.5	70	2.53	704.94	17.5	112	2.85	685.56	
2	23	70	2.27	708.19	17.5	114.5	2.92	684.21	
3	23	70	2.28	705.51	17.5	111.5	2.85	683.71	
4	22.5	70	2.23	704.25	17.5	115.5	2.99	674.73	

En la Figura 1 (a) y (b) se observan las dimensiones tanto del tubo de acero inoxidable (tabla 2) como del bisel en V implementado para la aplicación de los cordones de soldadura, con una distancia de raíz de 1,6 mm (figura 1(b)).

Tabla 2. Dimensiones del tubo soldado en milímetros para los procesos SMAW y GMAW

Díámetro exterior del tubo (mm)	Espesor del tubo (mm)	Longitud total del tubo soldado (mm)
88.9	5.5	300

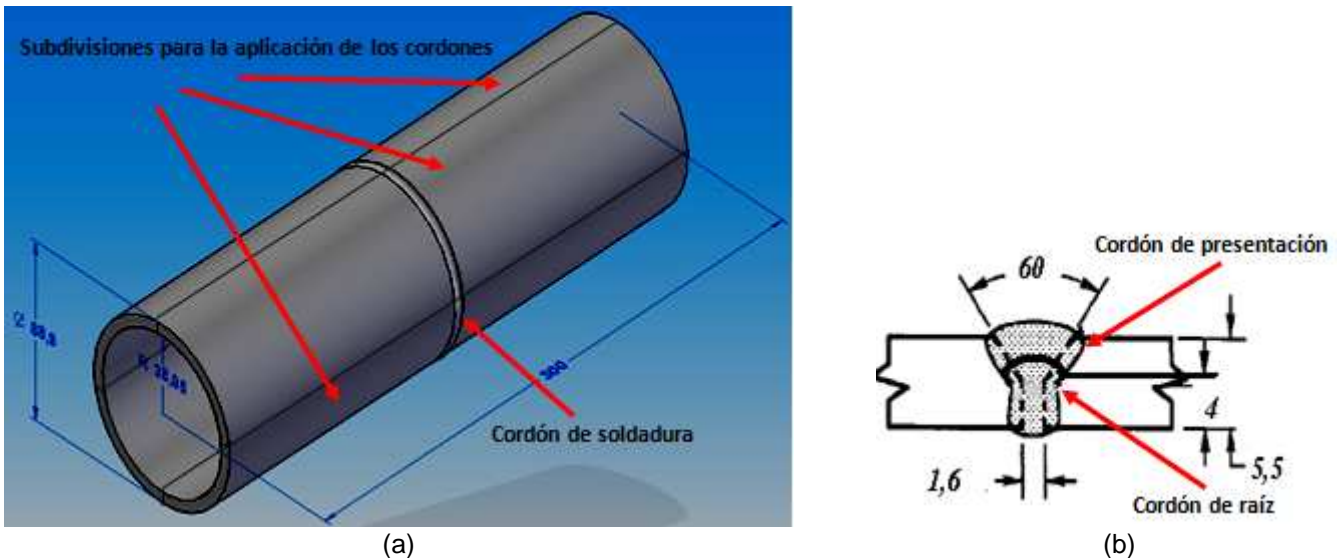


Figura 1. Esquema de las dimensiones del tubo para aplicación de soldadura en milímetros y grados, (a) dimensiones del tubo soldado completo y las subdivisiones para la aplicación de los cordones, (b) dimensiones del bisel donde se aplico el material de aporte en los dos procesos de soldadura

Tabla 3. Procedimientos experimentales

Técnica de caracterización	Descripción
Inspección visual	-A partir del material soldado se procedió a realizar un análisis de tintas penetrantes según la norma ASTM E165. Adicionalmente se realizó una inspección por ultrasonido siguiendo recomendaciones del código AWS B1.10-86.
Composición química	-Con el fin de determinar la composición química tanto del material base como de los cordones de soldadura, se realizó un análisis de composición química por espectroscopia de chispa, con un equipo ARL-QUANTODESK Thermo, bajo la norma ASTM E751. Por otra parte, se realizó la lectura del número de ferrita según recomendaciones del código AWS A4.2. con el equipo Magne-Gage J5-660.
Caracterización Microestructural	Se prepararon probetas bajo la norma ASTM E3 y se utilizó un microscopio óptico Olympus BX 51M con un analizador de imágenes. se hallaron los tamaños de grano promedio y la densidad de inclusiones bajo las normas ASTM E1382 y ASTM E1245 respectivamente.
Caracterización mecánica	
Microdureza	-Para el estudio de micro-durezas vickers (0.3Kgf) del material base y de los cordones de soldadura, se realizó un perfil de microdurezas, recomendado por el código AWS B4.0-98 y siguiendo la norma ASTM E384. Se utilizó un micro-durómetro BUEHLER 5104.
Tensión	-A fin de observar el cambio en las propiedades mecánicas, se realizaron ensayos de tensión, según norma ASTM E8. Se utilizó un equipo INSTRON 5586.
Impacto	-Se realizaron los ensayos de impacto, según norma ASTM E23, utilizándose un péndulo SATEC SI1D3 para ensayos Charpy.
Análisis de elementos finitos	-Con el propósito de comparar los datos obtenidos y observar las posibles áreas donde se encontraron deformaciones relevantes en las probetas, se realizaron simulaciones de deformaciones con el programa ANSYS 11.
Análisis Macroscópico	-Por último se realizó un análisis fractográfico sobre las superficies de fractura de las probetas con el fin de determinar el posible sitio de nucleación, propagación y desprendimiento de la falla, y al mismo tiempo determinar el posible mecanismo de fractura. Para esto se utilizó un estereoscopio Olympus SZX9. Adicionalmente se realizó un análisis con SEM para observar la falla a nivel microestructural.

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Inspección Visual

La aplicación de líquidos penetrantes sobre los cordones de soldadura para los procesos de unión SMAW y GMAW revelo la presencia de algunos defectos superficiales, tales como poros y socavados en los bordes del cordón, como se observa en la Figura 2.

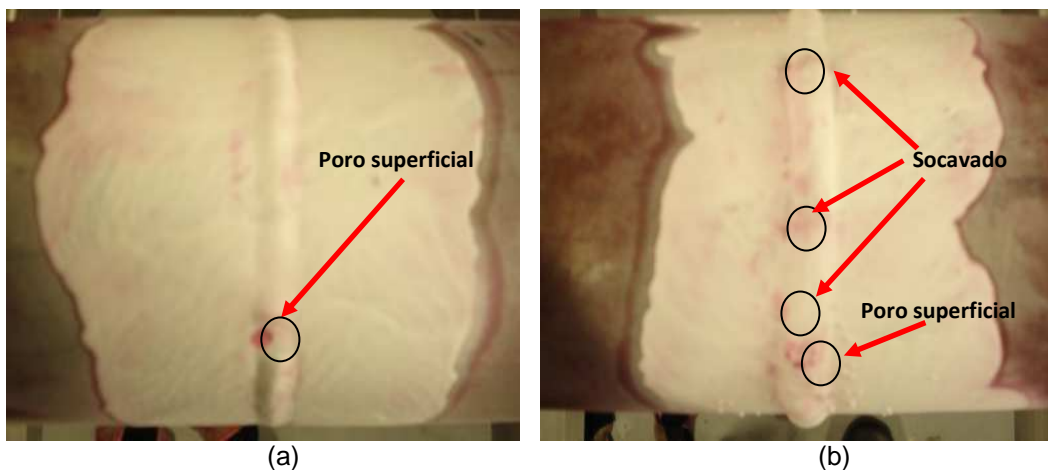


Figura 2. Defectos superficiales encontrados en los cordones de soldadura con tintas penetrantes, (a) SMAW, (b) GMAW

3.2. Composición Química

Los resultados del análisis de composición química se pueden observar en la Tabla 4, tanto para el material base como para los procesos SMAW y GMAW, en estos últimos se realizó la medición sobre los cordones.

Tabla 4. Composición química del material base y de los procesos de soldadura por espectroscopia de chispa, porcentaje en masa

	Composición química (% en masa)										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Co	V	W
Material base	0.0164	0.5401	0.9473	16.54	9.216	1.499	0.137	0.003	0.081	0.043	0.855
SMAW	0.032	0.691	0.9647	18.48	9.07	1.19	0.123	0.004	0.068	0.056	0.545
GMAW	0.022	0.364	1.8744	19.65	9.3	1.256	0.129	0.003	0.172	0.087	0.656

Los resultados mostrados en la tabla 4, indican la presencia de una gran cantidad de aleantes tanto en el proceso SMAW como en el GMAW. Entre los aleantes observados en la Tabla 4, algunos son formadores de la fase ferrítica: Cr, W, Mo, Si, V y Ti; de igual manera se encontraron aleantes que promueven la fase austenítica pero en menores porcentajes (C, Co, Ni, Cu y Mn).⁽¹⁻³⁾ Otro parámetro utilizado para cuantificar el aumento de la fase ferrítica, fue el número de ferrita encontrado en los depósitos de soldadura, donde los valores obtenidos fueron de 3.5 y 8.4 para los procesos SMAW y GMAW respectivamente. Estos valores muestran un incremento de la fase ferrítica para estos dos procesos, posiblemente debido al aumento y/o disminución de los aleantes descritos anteriormente en la composición química.

3.3 Análisis Microestructural

El análisis metalográfico del cordón fue realizado sobre un corte transversal. Primero se procedió a determinar la densidad de inclusiones y seguidamente a identificar el tipo de inclusiones encontradas (Tabla 5 y Figura 3 (b y c)).

Tabla 5. Densidad de inclusiones para los procesos y el material base

	DENSIDAD POR AREA [$1/\mu\text{m}^2$]	
	Promedio	Desviación estándar
MATERIAL BASE	1.2×10^{-4}	6.6×10^{-5}
SMAW	1.6×10^{-4}	4.8×10^{-5}
GMAW	1.3×10^{-4}	8.3×10^{-6}

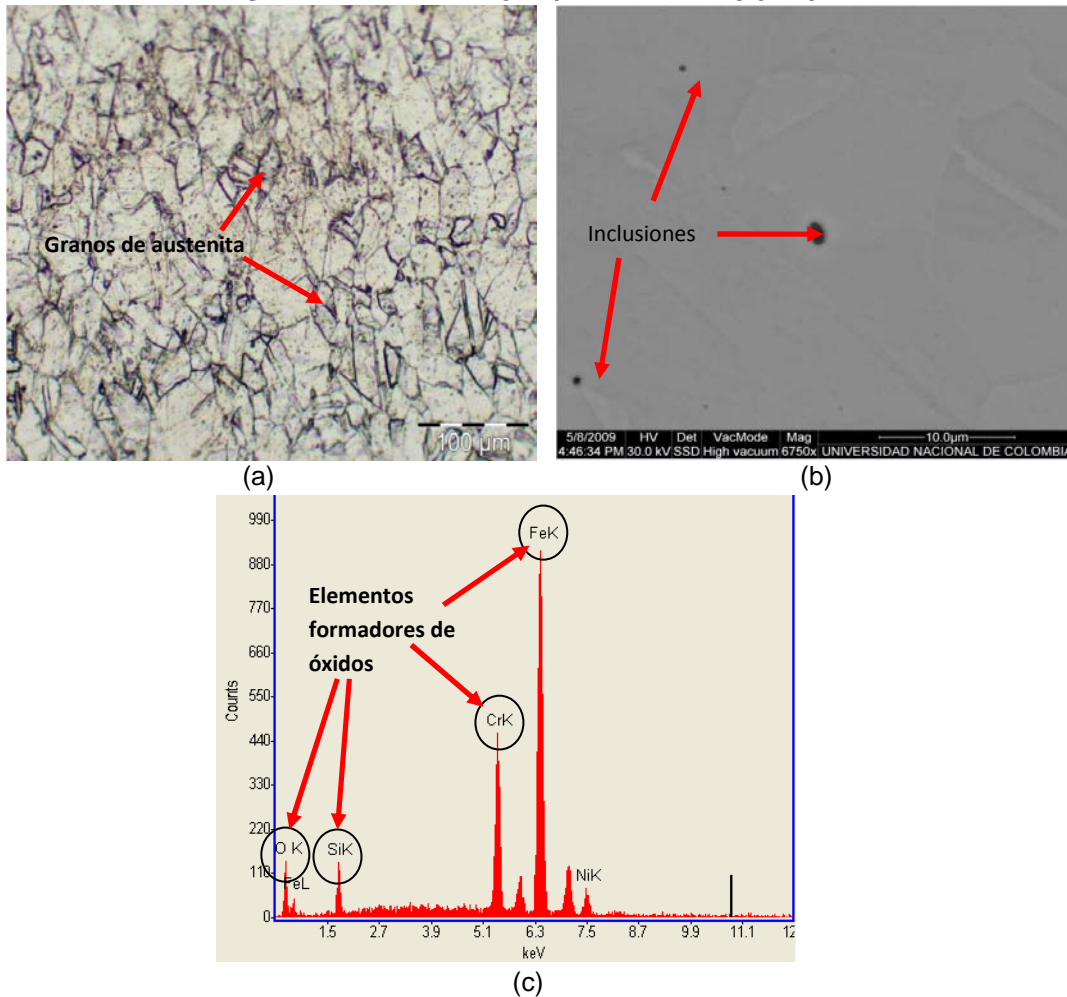


Figura 3. Análisis microestructural, (a) microestructura del material base, (b) inclusiones encontradas a 6750X, (c) composición elemental de las inclusiones encontradas, tomadas con EDX

La Tabla 5 muestra que la densidad de inclusiones promedio por unidad de área es baja, debido principalmente a un tamaño de inclusiones menor a 8 μm (Figura 3 b), indicando de esta forma que el tipo de inclusiones encontradas no afectaran las pruebas mecánicas, debido a su tamaño y forma circular. Adicionalmente se encontró en la literatura, que este tipo de inclusiones pueden ser óxidos globulares, debido al tipo de elementos que lo conforman y a su morfología.^(9,11,12) Adicionalmente, la microestructura del material base se puede observar en la Figura 3 (a), donde se aprecia una microestructura austenítica, característica de un acero inoxidable AISI/SAE 304.



Por otra parte el análisis microestructural para los procesos SMAW y GMAW se realizo en la zona de fusión (centro del cordón). En la Figura 4 (a) se observa una micro estructura de austenita y ferrita del tipo esqueletal (SMAW), ademas en la Figura 4 (b) se puede apreciar una micro estructura de ferrita laminar [Lathy] (GMAW); estas microestructuras son propias de una composición y/o enfriamiento característico del proceso de soldadura.^(1,2,10)

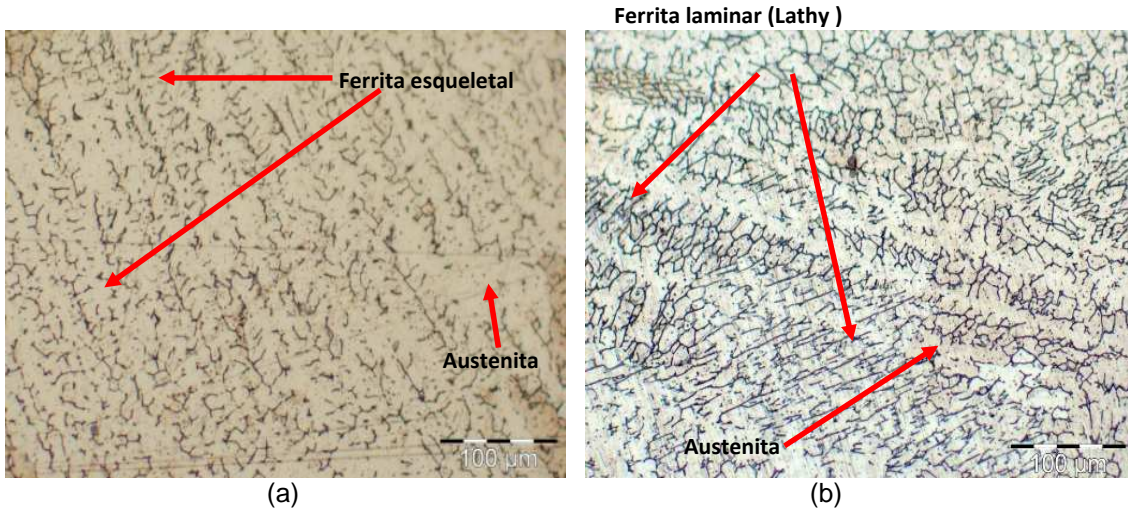


Figura 4. Micrografías de los cordones en la zona de fusión (ZF), (a) SMAW a 200X, (b) GMAW a 200X.

3.4 Ensayo de Micro-dureza

El perfil de microdureza realizado para los procesos SMAW y GMAW se puede observar en la Figura 5 (a), identificándose las diferentes zonas de interés, como la zona de fusión (ZF), zona afectada por el calor (ZAC), y el material base (MB). Los valores de las microdurezas obtenidos para cada región se muestran en la Figura 5 (b). Por otra parte los valores medios y las desviaciones estándar de los valores de las microdurezas en las distintas zonas se indican en la Tabla 6.

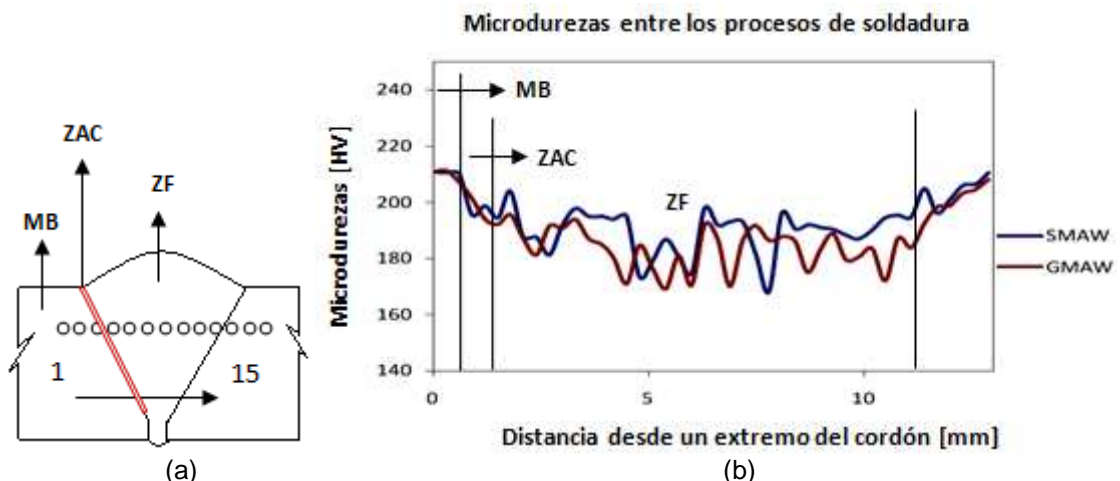


Figura 5. Microdureza Vickers, (a) esquema del perfil de microdurezas implementado, (b) grafica de microdurezas encontradas a partir del perfil implementado



Tabla 6. Promedio y desviación estándar de microdurezas en la juntas soldadas

PERFIL DE MICRODUREZAS EN EL CORDON (HV _{300g})						
	MB		ZAC		ZF	
	Media	Desviación	Media	Desviación	Media	Desviación
SMAW	210.46	7.9	193.72	5.03	186.41	9.4
GMAW	209.76	2.55	190.37	8.3	181.49	6.95

En la Tabla 6 se observa una disminución de la microdureza en la ZAC, debiéndose a un cambio en el tamaño de grano del material base, generado por la aplicación de los cordones de soldadura y su posterior enfriamiento. El cambio microestructural del tamaño de grano se vio representado en la disminución entre el número ASTM del material base (G 9.1) y los números ASTM de los procesos SMAW (G 7.5) y GMAW (G 7.1). Además, los valores de la microdureza en la zona de fusión llegan a ser muy similares en los dos procesos, siendo ligeramente mayor en el proceso SMAW.

3.5 Ensayo de Tensión

Los resultados del ensayo de tensión se presentan en la Figura 6 y la Tabla 7. Se puede observar que los módulos de elasticidad (E) de los dos procesos de soldadura son muy cercanos, sin embargo a medida que el número de ferrita aumentaba se evidenció un leve incremento del modulo de elasticidad.

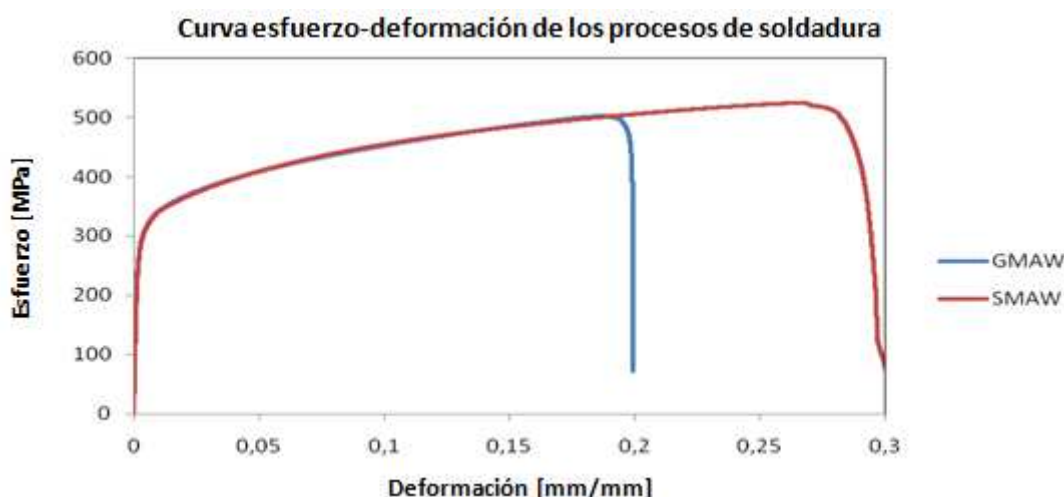


Figura 6. Curva esfuerzo – deformación para los procesos SMAW y GMAW.

Tabla 7. Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tensión

Resultados del Ensayo de Tensión					
Procesos	Sy _{0.2%}	E[GPa]	Sut[MPa]	% Elongación	FN
SMAW	327	161.7	517.7	31.34	3.5
GMAW	335	166.6	502.1	18.48	8.4

De manera similar en la Tabla 7, se encontró que el esfuerzo de fluencia (Sy_{0.2%}) aumenta a medida que el porcentaje de deformación (% Elongación) disminuye, indicando una reducción de la ductilidad y un incremento de la resistencia mecánica, lo que al mismo tiempo se puede explicar como un posible endurecimiento por precipitación de la fase ferrítica en la matriz austenítica.^(1,2,12) Adicionalmente el esfuerzo último es ligeramente mayor en el proceso SMAW, corroborando los resultados discutidos en el ensayo de microdureza.

3.6 Ensayos de Impacto

Las energías de impacto obtenidas para los dos procesos a diferentes temperaturas se pueden apreciar en la Tabla 8, adicionalmente su comportamiento se puede observar en la Figura 7.

Tabla 8. Energías obtenidas durante el ensayo de impacto

Resultados de los ensayos de impacto					
	Nitrógeno líquido @-170°C	Hielo seco@-80°C	Ambiente @19°C	Mufla @100°C	Mufla @200°C
	Energía [J]@ temperatura real en la probeta[°C]				
SMAW	33.6 @-115.8±2	37 @-39.6±2	40.5 @18.9±2	58.72@65.9±2	71.55@109.5±2
GMAW	31.05 @-108.2±2	33.75 @-44±2	38.15 @18.9±2	47.25@70.5±2	49.95 @90±2

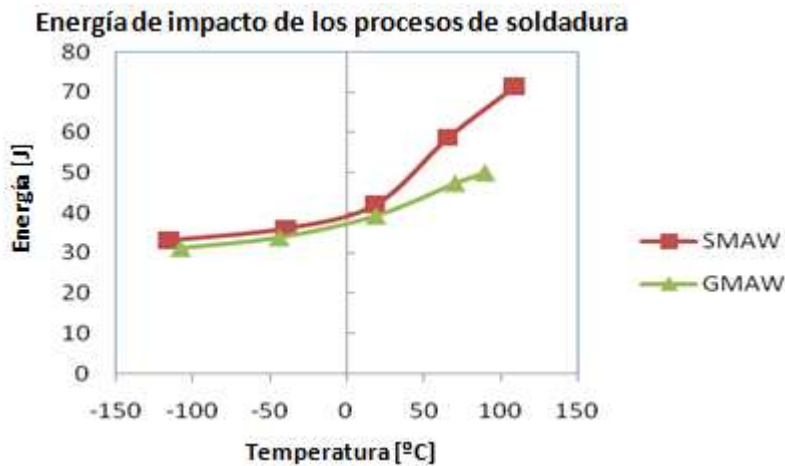


Figura 7. Energía de impacto para los procesos de soldadura SMAW y GMAW

La tendencia de las curvas de energía de impacto se muestra en la Figura 7, donde se observa que el proceso SMAW tiene una mayor tenacidad, comparado con el proceso GMAW. La diferencia en las energías de impacto entre los dos procesos de soldadura, se produjo debido a un endurecimiento por precipitación de la ferrita dentro de la matriz de austenita, la cual disminuyó algunas propiedades mecánicas, como la ductilidad.^(1,12) Por otra parte se observa una temperatura de transición del proceso SMAW de aproximadamente 50°C, mientras que el proceso GMAW no se observa una aparente temperatura de transición, lo cual suele ser normal en los aceros inoxidables austeníticos.⁽¹⁻³⁾

3.7 Análisis Macroscópico

El análisis de la superficie de fractura de las soldaduras en las probetas de tensión se puede observar en la Figura 8 (a) para el proceso SMAW y en la Figura 8(b) para el proceso GMAW. Adicionalmente se observa una ampliación de la superficie con SEM para el proceso SMAW en la Figura 9 y para el GMAW en la Figura 10.

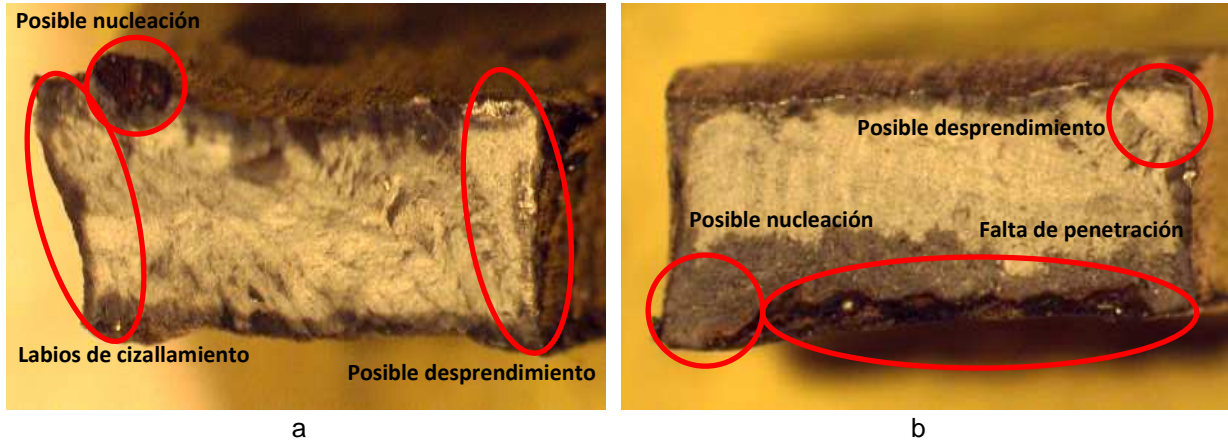


Figura 8. Superficies de fractura en las probetas de tensión, (a) SMAW 8X, (b) Superficie de fractura en la probeta de tensión GMAW 8X.

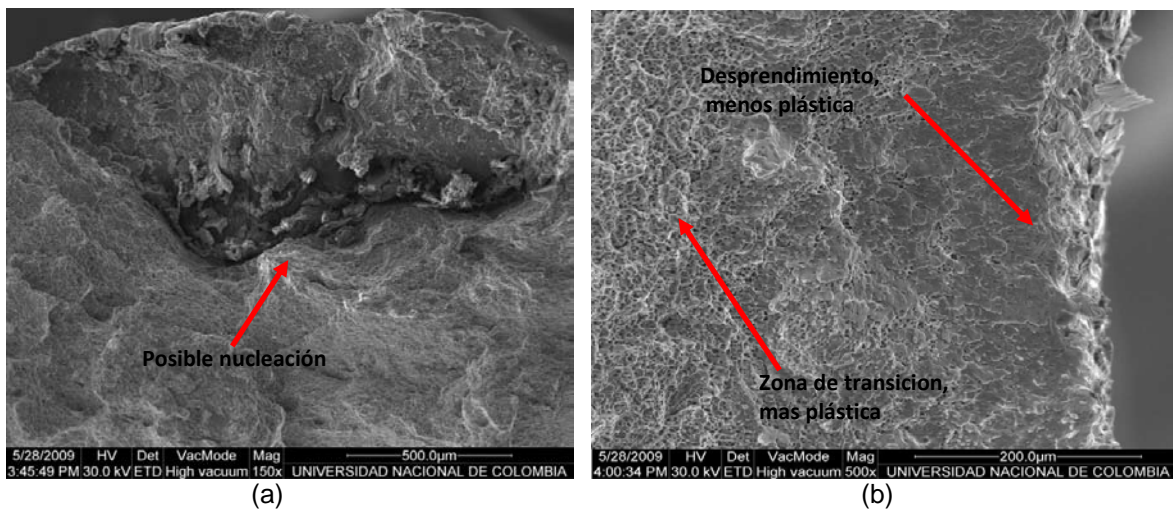


Figura 9. Superficie de fractura en la probeta de tensión SMAW tomada con SEM, (a) posible zona de nucleación a 150X, (b) posible zona de desprendimiento a 500X.

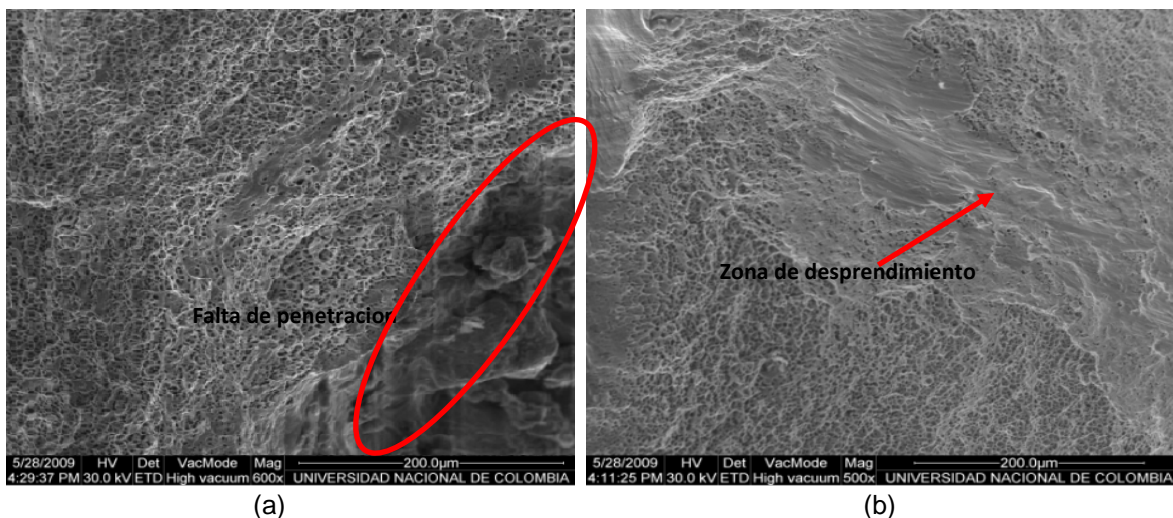


Figura 10. Superficie de fractura en la probeta de tensión GMAW tomada con SEM, (a) posible zona de nucleación a 600X, (b) posible zona de desprendimiento a 500X.

En la superficie de fractura del proceso SMAW, se observa la presencia de una inclusión en la superficie de la falla (esquina superior izquierda de la Figura 8a), la cual al ser analizada con SEM mostro ser un concentrador de tensiones, debido a la

falta de homogeneidad del cordón de soldadura en esta área (Figura 9 a). Por otra parte en la zona de desprendimiento se evidencia una región con menor presencia de alveolos y con una textura lisa en comparación al resto de la falla (Figura 9 b). Adicionalmente en la superficie de fractura del proceso GMAW, se muestra una falta de penetración del material de aporte en la superficie de la falla (parte inferior figura 8(b)), la cual al ser observada con SEM mostro ser un concentrador de tensiones, debido a la falta de penetración de material de aporte en esta zona (Figura 10 a). Así mismo en la zona de desprendimiento se evidencio una región con una textura mas lisa y una menor presencia de alveolos (Figura 10 b). Igualmente el análisis fractográfico en las probetas de los ensayos de impacto se puede observar en las Figuras 11(a) y (b) para los procesos SMAW y GMAW respectivamente.



Figura 11. Superficies de fractura en las probetas de impacto, (a) SMAW 8X, (b) GMAW 8X.

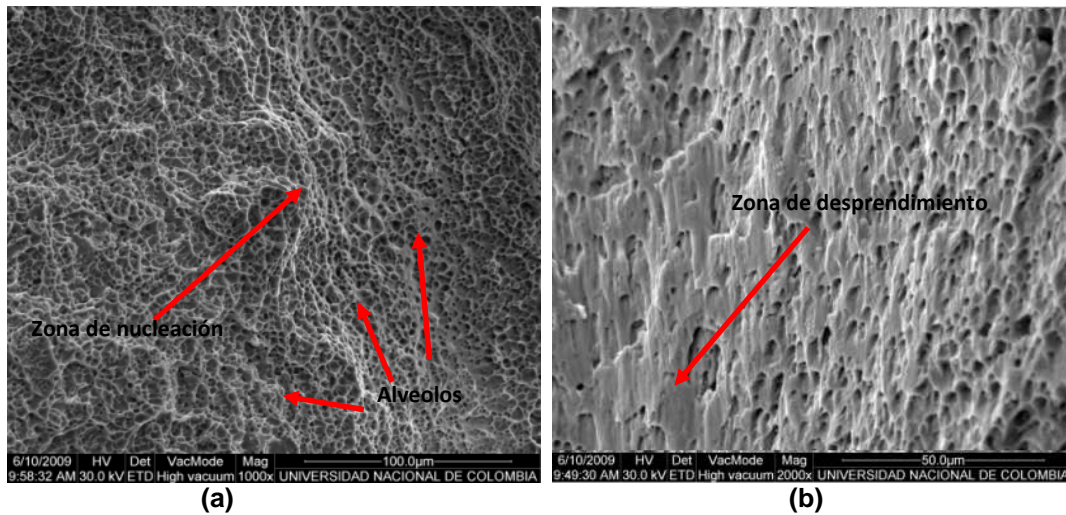


Figura 12. Superficie de fractura en la probeta de impacto SMAW tomada con SEM, (a) posible zona de nucleación a 1.000X, (b) posible zona de desprendimiento a 2.000X.

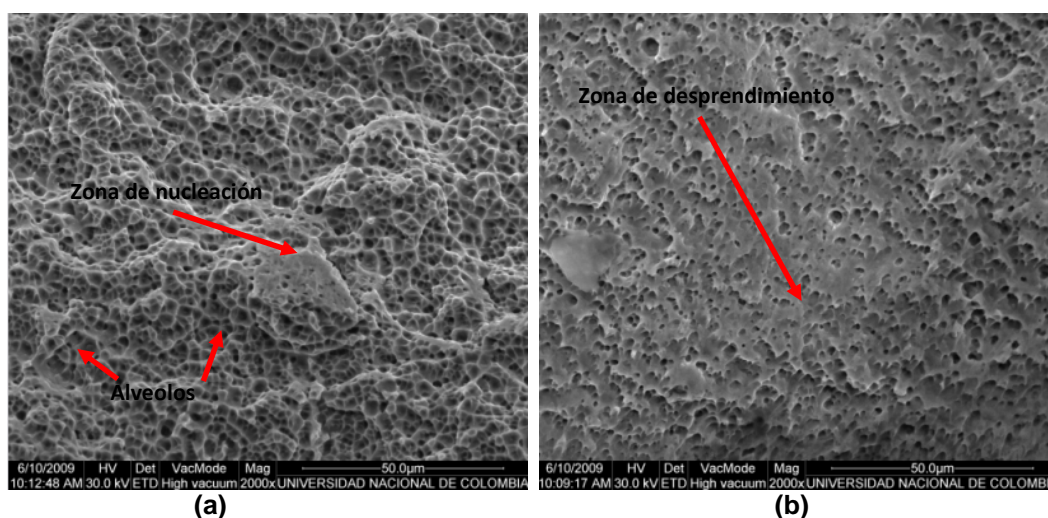


Figura 13. Superficie de fractura en la probeta de impacto GMAW tomada con SEM, (a) posible zona de nucleación a 2.000X, (b) posible zona de desprendimiento a 2.000X.

La superficie de fractura de las probetas de impacto para los procesos SMAW y GMAW (Figuras 11(a) y (b)), indican como ocurre la propagación de la grieta, desde el concentrador de tensiones (muesca en V) de la probeta hasta el lugar donde se aplico la carga dinámica de impacto (área contraria a la muesca en V), produciendo el desprendimiento final.

En el caso del proceso SMAW (figura 11(a)) se observo una mayor deformación que en el proceso GMAW (figura 11(b)), la cual mostro una textura más fibrosa a lo largo de la zona de falla (figuras 11(a) y (b)). Por otra parte mediante un análisis con SEM se observaron alveolos en la zona de nucleación de los dos proceso (figuras 12 (a) y 13 (a) de los procesos SMAW y GMAW respectivamente), evidenciando una deformación plástica. Además en la zona de desprendimiento se observo una textura mas lisa, con zonas más planas y con menor presencia de alveolos (figura 12 (b) y 13 (b) de los procesos SMAW y GMAW respectivamente).

4 CONCLUSIONES

Mediante el análisis microestructural realizado a las juntas soldadas en tubos de acero inoxidable AISI/SAE 304 por los procesos SMAW y GMAW sometidos a pruebas mecánicas, se encontraron inclusiones de tipo óxidos globulares, cuyo tamaño ($<8 \mu\text{m}$) no represento deficiencias en la integridad del material. Por otra parte se evidencio un cambio en el tamaño de grano entre los distintos procesos y el material base, que influyo de manera negativa en las propiedades mecánicas de las juntas soldadas. Finalmente se observaron dos tipos de morfologías que se precipitaron en los cordones de soldadura, ferrita esqueletal y ferrita Lathy, de las cuales la segunda incremento en porcentaje a medida que el número de ferrita aumentaba. En las pruebas mecánicas se observo un incremento del esfuerzo de fluencia y el modulo de elasticidad cuando el número de ferrita aumentaba, sin embargo la ductilidad disminuyo, mostrando un comportamiento contrario. Similarmente, se presento una disminución de la tenacidad entre los procesos de soldadura, debido a un endurecimiento por precipitación de la ferrita en la matriz austenitica. El análisis fractográfico muestra que la zona donde se produjo la falla de las probetas en los dos procesos de soldadura fue por el cordón, como se observo en las microdurezas. Por otra parte, los nucleadores de las grietas fueron discontinuidades en el cordón, como inclusiones o falta de penetración, las cuales

sirvieron como concentrador de tensiones en estas zonas que llevaron a la falla catastrófica.

REFERENCIAS

- 1 Lippold John C., K. D. (2005). *Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels*. New Jersey: Wiley Inter-Science.
- 2 ASM Handbook, *Stainless steel Handbook*. ASM specialty handbook, ed. T.m.i. society. 1994: ASM international
- 3 Sahin, M. (2006). Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless. *Materials and Design* , 2244–2250.
- 4 Linnert, G., *Welding metallurgy*. Third ed. Welding technology series. Vol. 1. 1965: American Welding Society.
- 5 Blondeau, R., *Metallurgy and mechanics of welding*. 1 ed. 2008, Hoboken: Wiley & Sons, Inc.
- 6 L.W.Tsai, Y. ,.-Y. (2004). Fatigue crack growth of AISI 304 stainless steel welds. *Materials Science and Engineering* , 204-210.
- 7 Spry, J. J. (2007). Sigma Phase formation of type 310 stainless steel in a Lime Kiln Burner Nozzle. *Materials Selection and Design* , 54-57.
- 8 Y. SONGN, A. M. (1996). The effect of welding process on the Chi phase precipitation in as-welded 317L Weld Metals. *ISIJ International* , 1392 1396.
- 9 Rajasekhar. K, *Microstructural evolution during solidification of austenitic tainless steel weld metals: A color metallographic and electron microprobe analysis study*. Materials Characterization, 1997. 38(2): p. 53-65.
- 10 Inoue, H., et al., *Formation mechanism of vermicular and lacy ferrite in austenitic stainless steel weld metals*. Science and Technology of Welding & Joining, 2000. 5(6): p. 385-396.
- 11 ASM Handbook, *Properties and selection irons, steels and high performace alloys*. 10 ed. Vol. 1. 1993: ASM International.
- 12 A.K. Lakshminarayanan, V.Balasubramanian, and K. Shanmugam, *Effect of welding processes on tensile ,impact,hardness and microstructure of joints made of AISI 409 FSS base metal and 308L ASS filler metals*. Iron making and steel making , 2009. : p. 75-80.