

METALURGIA DE UNIONES SOLDADAS DE ACEROS DISÍMILES (ASTM A240–A537) Y COMPORTAMIENTO MECÁNICO ANTE CARGAS MONOTÓNICA Y CÍCLICA

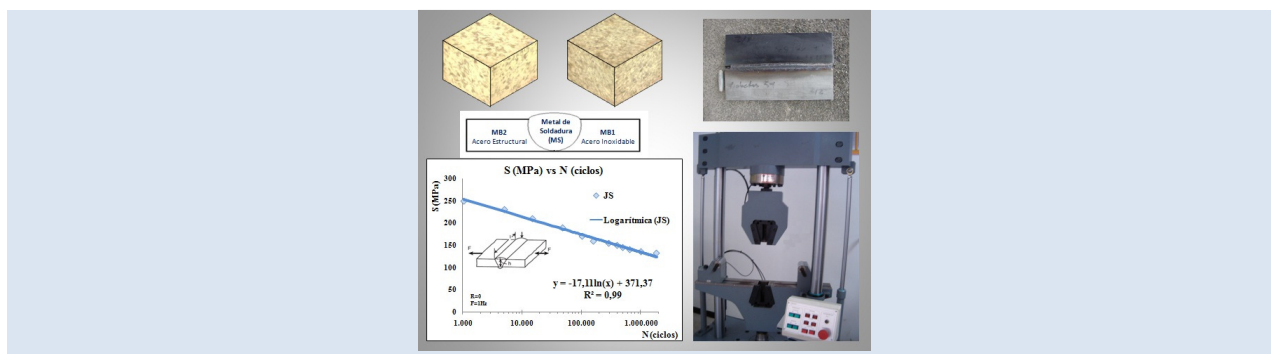
Andrés García^{1*}, Rafael Salas¹, Leiry Centeno² y Alberto Velázquez del Rosario^{3*}

1: Departamento de Mecánica, IUT “Dr. Federico Rivero Palacio”, Región Capital, Caracas, Venezuela.

2: Departamento de Tecnología de Materiales, IUT “Dr. Federico Rivero Palacio”, Región Capital, Caracas, Venezuela.

3: Facultad de Metalurgia y Electromecánica, ISMM “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Moa, Holguín, Cuba.

* e-mail: garciafu@gmail.com, avelazquez@ismm.edu.cu



RESUMEN

En el presente estudio se caracterizaron las propiedades mecánicas en uniones soldadas de aceros disímiles: un acero estructural (ASTM A537/A537M:95) soldado a tope con un acero inoxidable austenítico 304L (ASTM A240/A240M:01) mediante proceso por arco eléctrico con protección inerte de gas argón (GMAW) y un acero inoxidable austenítico ER-308L como material aporte (ANSI/AWS A5.9/A5.9M:2006). Las muestras se ensayaron en condición sin soldadura, con el objeto de caracterizar los materiales involucrados en la investigación y en condición soldada, sin someterse a tratamiento térmico pre y post soldadura. Las muestras del material base y las soldadas fueron caracterizadas mediante microscopía óptica (MO), posterior a una inspección mediante ensayos no destructivos (END) con líquidos penetrantes y ultrasonido. Además, se efectuaron los siguientes ensayos mecánicos, tanto en los metales base como en la soldadura: perfil de microindentación Vickers, tracción, impacto Charpy, doblez guiado (cara y raíz) y fatiga axial. Los resultados indicaron un comportamiento mecánico adecuado de los aceros, soldados con el procedimiento GMAW, ante cargas monotónica y cíclica, a pesar de presentar altos valores de dureza en la zona afectada por el calor (ZAC), específicamente próximo a la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el 304L, así como inclusiones entre el acero estructural y el inoxidable.

Palabras Claves: Acero inoxidable, Crecimiento de grieta, Fatiga axial, Soldadura disímil

METALLURGY OF DISSIMILAR STEELS WELDED UNIONS (ASTM A240–A537) AND MECHANICAL BEHAVIOR UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADS

ABSTRACT

The research shows the characterization of mechanical properties in dissimilar steel welded unions: a structural steel (ASTM A537/A537M:95) butt welded with austenitic stainless steel 304L (ASTM A240/A240M:01) through semiautomatic electrical arc welding process protected by inert gas (GMAW); Argon was used as a protecting gas and austenitic stainless steel ER308L as a supplier material (ANSI/AWS A5.9/A5.9M:2006). Samples were tested in unwelded conditions to characterize the materials involved in the investigation, and they were also tested in welded conditions, not being submitted to pre and post welding thermal treatment. Welded-based material samples were characterized through optical microscopy (OM), an inspection of nondestructive testing (NDT) with penetrating liquids and ultrasound were also conducted. The following mechanical tests were completed, not only on the base metals but on the welding as well: Vickers micro hardness profile, traction, Charpy impact, bending test (face and root), and axial fatigue. Results showed a proper mechanical steel behavior, welded by GMAW procedure, under monotonic and cyclic loads, in spite of they showed high values of micro hardness in the heat affected zone (HAZ), mainly in the proximity of the fusion line between the welding cord and the stainless steel 304L, as well as inclusions between the structural steel and the stainless one.

Keywords: Axial fatigue, Crack growth, Dissimilar welding, Stainless steel

1. INTRODUCCIÓN

Unir dos o más metales mediante soldadura es un proceso que se ha mantenido vigente durante años y, desde sus inicios, ha evolucionado hasta convertirse en una herramienta de utilidad en la industria metalmeccánica, empleada en la construcción de partes y reparaciones de piezas. Es un método de trabajo cuyo objeto es unir metales, a través de técnicas razonablemente económicas, otorgando a la unión propiedades adecuadas y compatibles con el metal base (MB). Se puede efectuar con el uso de calor, presión o mediante la combinación de ambos. Por la forma de realizar la unión, se subdivide en: por fusión, por resistencia eléctrica, enlace en fase sólida o enlace en fase sólida - líquida [1].

En el presente trabajo de investigación, se usó la técnica de soldadura por arco eléctrico, específicamente soldadura semiautomática con protección de gas inerte (GMAW: Gas Metal Arc Welding) empleando argón como gas de protección, por lo que se otorgó especial atención a la soldadura por fusión, donde las partes a unir se funden juntas con la aplicación de calor y puede o no usar presión y material de aporte (MA) [2].

Es práctica usual la soldadura en sitio, o soldadura de campo; tanto en nuevas instalaciones, como en reparaciones, conexiones anexas y estructurales [3], y de manera específica, en el campo industrial de producción, refinación y transporte de petróleo, procesos de gran presencia en la industria, bien sea a través de la más importante productora y refinadora de hidrocarburos en Venezuela, Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) o compañías que prestan servicio a la industria petrolera. Estas operaciones son realizadas usualmente mediante técnicas de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW: Shield Metal Arc Welding) empleando MA de composición similar al MB [4].

En la soldadura de aceros inoxidable austeníticos es común mantener la temperatura lo más baja posible, esto se logra usando bajas intensidades de corriente, adecuada penetración y fusión, arco corto, secuencia de paso lento, cordones cortos, o esperando que la pieza enfríe entre cordón y cordón. En el caso de soldaduras de aceros inoxidable [5], unidos con aceros estructurales, denominadas soldadura disímiles, tanto en el cordón de soldadura como en la Zona Afectada por el Calor (ZAC), y en función de la composición química de la unión, se puede

desarrollar una estructura martensítica de característica frágil, así como la posibilidad de fisuración, condiciones que afectarían las propiedades mecánicas de la unión. En consecuencia, se ve afectada la resistencia a la fatiga de la Junta Soldada (JS). De esta forma, y para evitar fallas prematuras, es usual someter la JS a un tratamiento térmico (TT) pre y post soldadura que evite la formación de martensita. Para realizar dichos procesos se requiere de paradas de planta, deseándose que los tiempos sean el mínimo posible, ya que generan impacto económico importante, produce pérdidas de producción y afecta notablemente el desempeño de los trabajadores. Por otra parte, algunos recipientes, intercambiadores y tramos de tubería son de difícil acceso, donde resulta complicado realizar el TT [3]. Con el fin de evitar dichos TT, disminuir el tiempo de parada de planta, contribuir a la sustentabilidad económica del proceso y aumentar la vida útil de los materiales involucrados, favoreciendo el ambiente; la presente investigación centró sus esfuerzos en estudiar el comportamiento mecánico de uniones soldadas sin TT pre y post soldadura. Representando un importante aporte al campo del conocimiento científico, y contribuyendo al establecimiento de los mecanismos de inicio y propagación de grietas de fatiga originadas por fluctuaciones de cargas mecánicas y térmicas [6].

Se pretende disminuir la formación de estructura martensítica durante la solidificación del metal de soldadura (MS) y con esto evitar posibilidad de cualquier tipo de fisuración en el cordón, sus líneas de fusión y la ZAC [7].

En este sentido, el objetivo general del presente trabajo es estudiar el comportamiento mecánico del acero inoxidable A240 (304L) [8], soldado con el acero estructural A537 (clase I) [9], utilizando un acero inoxidable A240 (ER-308L) como MA (ANSI/AWS A5.9/A5.9M: 2006) [10], ante cargas monotónica y cíclica, sin someter la junta a TT pre y post soldadura. Específicamente, la investigación se centró en caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales y la junta soldada; analizar la influencia de los factores que afectan la calidad de la soldadura en el comportamiento mecánico de la junta sometida a carga cíclica; y evaluar la influencia del tipo de carga aplicada en el comportamiento mecánico de la unión. Para lograr los referidos objetivos, el trabajo se centró en los

factores que afectan la calidad de la soldadura, tales como; defectos en la soldadura (grietas superficiales e internas, incrustaciones de escoria y socavaciones), microestructura, extensión de la ZAC y propiedades mecánicas (perfil de dureza, tensión, impacto, doblez guiado y fatiga axial) [11].

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se empleó el concepto de soldadura disímil entre los MB y el MA, utilizando un acero inoxidable austenítico ER-308L [10] como MA (ANSI/AWS A5.9/A5.9M:2006), cuya composición química difiere de los MB, también diferentes entre sí; utilizando un acero inoxidable austenítico (MB1) 304L (ASTM A240/A240M:01) [8] y un acero estructural (MB2) (ASTM A537/A537M:95) [9].

Los materiales utilizados para el presente estudio consistieron en una lámina de acero inoxidable 304L y una lámina de acero estructural, ambas de dimensiones (1.200x2.400x 4,76) mm. La soldadura se hizo a tope, en piezas de 280 mm de longitud, con bisels de 60°, en posición plana según el código ASME Sección IX QW-463.1 [12], utilizando el procedimiento GMAW en atmósfera de argón y MA de 1,6 mm de diámetro (ANSI/AWS A5.9/A5.9M:2006), aplicando una (01) pasada, y siguiendo el esquema ilustrado en la Figura 1.

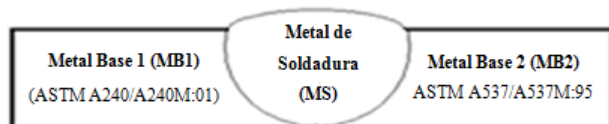


Figura 1. Configuración de la unión soldada y ubicación de los materiales involucrados

Los parámetros de soldadura, fueron: corriente, $I = 250$ A (DCRP); voltaje, $E = 27$ V; energía, $Q_0 = E \cdot I = 6,75$ Kw; Calor aportado (HI) = 0,80 KJ/mm; Velocidad de alambre 4 m/min y velocidad de arco 0,508 m/min, según las especificaciones AWS [13]. Después de la soldadura, cada muestra fue sometida a END [3], mediante técnicas de líquidos penetrantes y ultrasonido para descartar la presencia de grietas u otros defectos superficiales o volumétricos que pudieran alterar los resultados de los ensayos mecánicos.

2.1 Caracterización química

Se verificó la composición química de los MB y MA utilizando el método de espectrofotometría por absorción atómica (EAA).

2.2 Caracterización microestructural

Se cortaron muestras en sentidos axial y transversal de las láminas de MB1 y MB2 con dimensiones (10x10x 4,76) mm, como se muestra en la Figura 2, con el objeto de descartar diferencias microestructurales en relación al sentido de conformado de la lámina. De cada probeta soldada, se cortaron muestras representativas de la junta soldada (JS) conteniendo a los MB1, MB2, MS y la ZAC según se indica en la Figura 3.

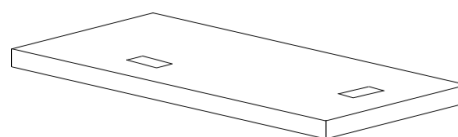


Figura 2. Toma de muestras en los sentidos axial y transversal a las láminas

Las muestras se prepararon metalográficamente siguiendo el método de pulido mecánico convencional de acuerdo con el estándar ASTM E3-2001 [14]. El pulido final se realizó con pasta de diamante de 1 μ m. Las muestras fueron atacadas con el reactivo Vilella (45 ml Glicerol, 15 ml Ácido Nítrico, 30 ml Ácido Clorhídrico) para el MB1 y con Nital al 3% (100 ml Alcohol Etilico al 96% + 10 ml de Ácido Nítrico) para el MB2, mientras que la unión soldada fue atacada con Nital al 3% para evidenciar la interfase entre el acero estructural y el acero inoxidable y posteriormente con el reactivo Vilella para conformar el perfil microestructural de la unión soldada. Todas las muestras se analizaron mediante MO utilizando un microscopio óptico metalográfico con platina invertida, con sistema digitalizador de imagen acoplado, marca NIKON, modelo EPIPHOT 200.

2.3 Caracterización mecánica

Se realizaron ensayos de microindentación Vickers (HV), tracción, Charpy, doblez guiado y fatiga. En relación a los ensayos de microindentación, se hizo un barrido de dureza para evaluar los MB1 y MB2, la ZAC y el cordón de soldadura. Para ello se utilizó un durómetro Vickers, marca MITUTOYO, modelo MVK-H1, previamente calibrado, aplicando una carga de 100 gf durante 15 s y en correspondencia con la norma ASTM E-92 [15]. Para los ensayos de tracción [16] y doblez [17] se seleccionaron las muestras como se indica y detalla en la Figura 3 y en la Tabla 1 respectivamente. Se eliminó el MS en exceso para garantizar un espesor uniforme en la

junta de 4,76 mm (3/16").

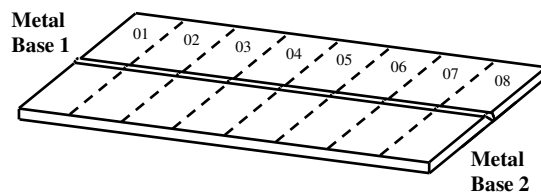


Figura 3. Distribución de las probetas en la JS

Tabla 1. Especificaciones de la JS y dimensiones de las probetas

Probeta	Ensayo	Dimensiones
01	Descartado	1 1/2" x 3/16"
02	Tracción	1" x 3/16"
03	Doble de cara	1 1/2" x 3/16"
04	Doble de raíz	1 1/2" x 3/16"
05	Doble de cara	1 1/2" x 3/16"
06	Doble de raíz	1 1/2" x 3/16"
07	Tracción	1" x 3/16"
08	Descartado	1 1/2" x 3/16"

Se descartaron los extremos de la junta (01 y 08) y se ensayaron dos probetas por cada MB y dos de la JS, de acuerdo al código ASME Sección IX [4, 12]. Las probetas para tensión, Charpy y doblez guiado fueron mecanizadas de forma convencional con el empleo de una máquina fresadora universal marca ELGOBIAR, modelo F2UE empleando líquido refrigerante para evitar que el calor generado durante las operaciones de maquinado afectara la microestructura de la muestras.

Los ensayos de tracción se realizaron en una Máquina Universal de Tracción, marca SERVOSIS, modelo PBI-20 de 20 Ton, con velocidad de avance del cabezal de 0,004 kN/s. Para los ensayos de doblez guiado, se prepararon cuatro probetas por cada sección soldada, dos de cara y dos de raíz; de acuerdo al código ASME Sección IX [4, 12]. Para observar el comportamiento dúctil del material sin que llegue a generar en la zona de mayor deformación de la probeta fallas mayores a 3,2 mm (1/8"), las probetas fueron dobladas 180° hasta alcanzar forma en "U", colocando la soldadura en la zona sometida a mayor deformación. Para tal fin, se utilizó una prensa hidráulica de 40 ton, dimensiones

acordes con AWS [3] en función de la resistencia a la fluencia de la unión por lo que previamente se realizaron las pruebas de tracción en las uniones. Para los ensayos de impacto Charpy, se prepararon cinco probetas por cada MB y cinco para la JS, según las especificaciones de la norma ASTM E-23 [18]. Los ensayos fueron realizados con un péndulo CHARPY/IZOD, marca HOYTOM, modelo J300, a temperatura ambiente (23°C). Para los ensayos de fatiga axial se prepararon diez probetas por cada MB y diez para la JS, en correspondencia con la norma ASTM E-606 [19, 20]. Dichos ensayos fueron realizados empleando la misma máquina universal de tracción, generando un ciclo de aplicación de carga axial con frecuencia de un pulso por segundo ($T=1s$) y diez diferentes cargas, empleando un coeficiente entre las tensiones mínima y máxima en un ciclo de carga ($R=S_{min}/S_{max}$) igual a cero, tomando como valor inicial la calculada empleando como factor de fatiga f de 0,4 [7] y la resistencia a la tracción ($0,4 S_u$) determinada mediante el ensayo de tracción.

2.4 Ensayos de doblez guiado

Tomando como referencia la resistencia a la fluencia de la JS y las especificaciones del código ASME Sección IX QW-463.1 [12] se utilizó la base para doblar tipo A (hasta 360 MPa), según la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones AWS para el doblez guiado [16]

AWS TEST, Resistencia a la Fluencia, MPa (Ksi)			
Dimensión	HASTA	360 – 620	620 y más
	360 (55)	(55 – 90)	(90 y más)
Ra (macho)	19 mm	25 mm	32 mm
Rb (base)	30 mm	37 mm	43 mm

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización química

Se evaluó la JS en dos etapas; primero el MB1 con el MA (304L-308L), y luego, el MB2 con el MA (308L-A537), siguiendo el procedimiento que se describe en [21] y los parámetros de soldadura descritos en las Tablas 3 y 4. Los resultados de los análisis químicos se muestran en la Tabla 5. En la tabla 6 se muestra la composición del cordón y en la Tabla 7 se presentan los resultados correspondientes al Cr y Ni equivalente de acuerdo a los diagramas de Schaeffler, DeLong, WRC y Creq/Nieq [2, 3], para caracterizar el cordón de soldadura con la

composición obtenida en laboratorio.

$$[\% X_{weld}] = \frac{B}{B+D} \cdot [\% X_{BM}] + \frac{D}{B+D} \cdot [\% X_{FW}] \quad (1)$$

$$B = \frac{2a^2 \pi}{v^2} \left(\frac{\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1} \right) (1 + 2\sigma_{3m}) \quad (2) \quad D = \frac{k'}{\rho} \left(\frac{1}{v} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \frac{(T - T_o)}{(T_c - T_o)} \quad (4) \quad \theta_p = \frac{1}{n_3} \exp \left(\frac{-\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1} \right) \quad (5)$$

$$n_3 = \frac{E.I.\eta.v}{4.\pi.a^2.(Hc - Ho)} \quad (6)$$

Donde;

$[\% X_{weld}]$	Elemento en la zona de fusión
$[\% X_{BM}]$	Elemento en el metal base
$[\% X_{FW}]$	Elemento en el electrodo
$[B]$	Área de material fundido (penetración)
$[D]$	Área de material depositado (cordón)
n_3	Factor adimensional de calor aportado
θ_p	Factor adimensional de temperatura pico
σ_3	Factor adimensional de posición
a	Difusividad térmica (mm ² /s)
v	Velocidad de la soldadura (mm/min)
σ_{3m}	Factor adimensional de posición local
k'/ρ	Tasa promedio de volumen depositado (0,7)
η	Eficiencia
$Hc - Ho$	Cambio de entalpía en el punto (J/mm ³)

Tabla 3. Parámetros adimensionales n_3 , θ_p , θ_p / n_3 , σ_3

Junta	n_3	θ_p	θ_p / n_3	σ_3
304L-308L	32,65	1,0	0,031	12,91
308L-A537	14,41	1,0	0,069	6,10

Tabla 4. Dimensiones del cordón de soldadura

Junta	$B(\text{mm}^2)$	$D(\text{mm}^2)$	$B/(B+D)$	$D/(B+D)$
304L-308L	32,39	20,67	0,6104	0,3896
308L-A537	30,77	20,67	0,5982	0,4018

Sin embargo, el Cr y Ni equivalente, con la composición real de los materiales, no presentó

variación significativa respecto a los diagramas de Schaeffler, DeLong, WRC y Creq/Nieq mostrados en las Figuras 4-7.

Tabla 5. Composición química (% en peso) de los MB y MA obtenidas en el laboratorio

Elemento	MB2: A537 (I)	MB1:304L	MA: ER308L
C	0,028	0,230	0,040
Cr	18,24	0,180	19,500
Ni	8,880	0,200	10,000
Mo	0,000	0,100	0,000
Mn	1,890	0,890	2,500
Si	0,660	0,280	0,900
N	0,100	0,120	0,140
P	0,035	0,030	0,040
S	0,028	0,035	0,030
Cu	0,006	0,310	0,000

Tabla 6. Composición química (% en peso) del cordón

Junta	304L-308L	308L-A537(I)	Promedios
C	0,033	0,154	0,093
Cr	18,731	7,943	13,337
Ni	9,316	4,138	6,727
Mo	0,000	0,060	0,030
Mn	2,128	1,537	1,832
Si	0,753	0,529	0,641
N	0,116	0,128	0,122
P	0,037	0,034	0,035
S	0,029	0,033	0,031
Cu	0,004	0,185	0,095

Del diagrama de Schaeffler se puede notar que la junta 304L-308L se encuentra dentro de la zona de austenita más ferrita (A+F), libre de riesgo de fisuración y 7% de ferrita; la junta 308L-A537(I) se encuentra dentro de la zona de martensita pura (de característica frágil), por lo que podría presentarse fisuración en frío; mientras que en el punto medio de la recta que pasa por los casos 1 y 2, se encuentra dentro de la zona de austenita más martensita (A+M), por lo que podría presentarse fisuración tanto en frío como en caliente (Figura 4).

Del diagrama de DeLong se puede notar que sólo la junta 304L-308L puede ser evaluada mediante su uso, ya que el Cr y Ni equivalente de los otros casos se encuentra fuera del intervalo de apreciación. En

este sentido; la junta 304L-308L se observa dentro de la zona de austenita más ferrita (A+F), libre de riesgo de fisuración y 1,98% de ferrita (Figura 5).

Igualmente, del diagrama WRC se puede notar que sólo la junta 304L-308L puede ser evaluada mediante su uso, ya que el Cr y Ni equivalente de los otros casos se encuentra fuera del intervalo de apreciación. En este sentido; la junta 304L-308L se observa dentro de la zona de austenita más ferrita (A+F), libre de riesgo de fisuración y 2,1% de ferrita (Figura 6).

Tabla 7. Determinación del Cr y Ni equivalente para cada diagrama. Schaeffler, DeLong, WRC y Creq/Nieq

Diagrama			
SCHAEFFLER			
Cr eq	19,861	8,797	14,329
Ni eq	11,360	9,516	10,438
DELONG			
Cr eq	19,861	8,797	14,329
Ni eq	14,828	13,357	14,092
WRC			
Cr eq	18,731	8,003	13,367
Ni eq	12,772	12,123	12,448
Creq/Nieq			
Cr _{eq} /Ni _{eq}	1,748	0,924	1,373
%P+%S	0,066	0,067	0,066

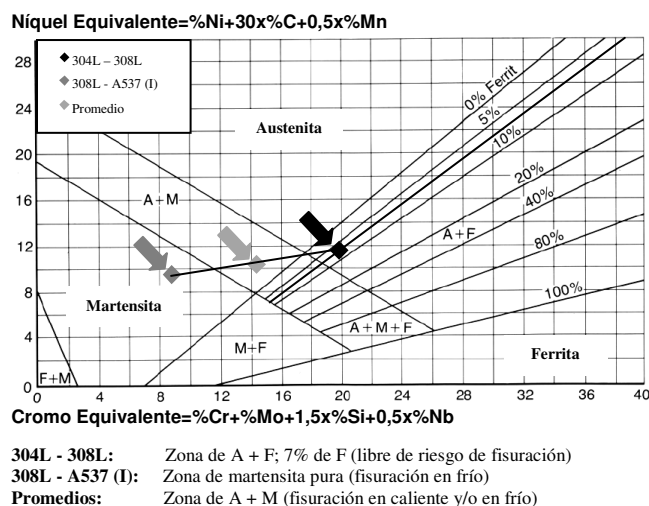


Figura 4. Diagrama de Schaeffler [3]

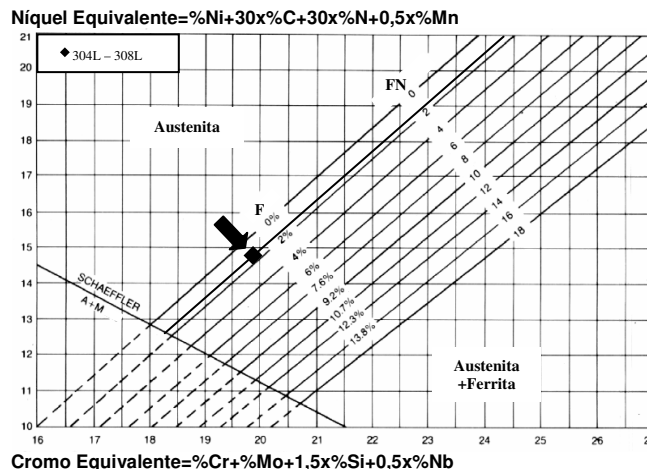


Figura 5. Diagrama de DeLong [22]

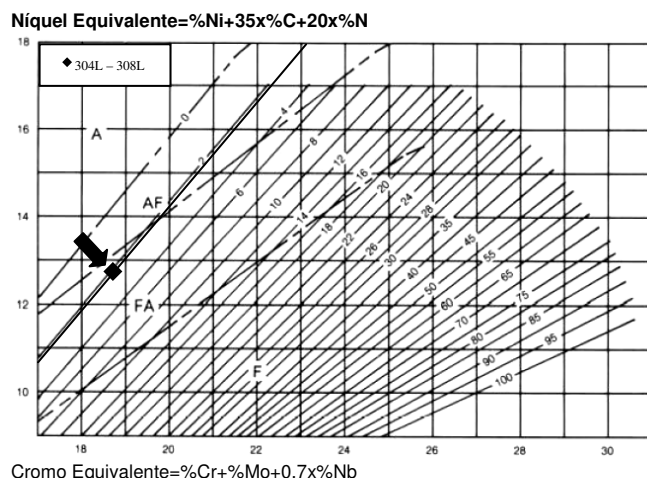
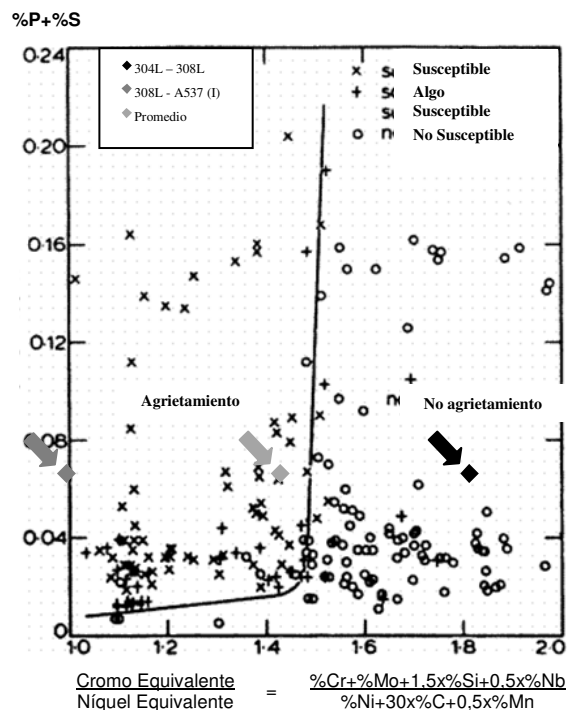


Figura 6. Diagrama WRC [23]

De la misma manera, a partir del diagrama Cr_{eq}/Ni_{eq} se puede notar que la junta 304L-308L y el promedio pueden ser evaluados mediante su uso, ya que el Cr y Ni equivalente para la junta 308L-A537 (I) se encuentra fuera del intervalo de apreciación. En este sentido; la junta 304L-308L se observa dentro de la zona de no agrietamiento en caliente, mientras que el promedio se visualiza dentro de la zona con riesgo de agrietamiento en caliente (Figura 7).



304L - 308L: Zona libre de riesgo de fisuración en caliente
 308L - A537 (I): Zona de riesgo de fisuración en caliente
 Promedios: Zona de menor riesgo de fisuración en caliente

Figura 7. Relación Creq/Nieq [24, 25]

3.2 Caracterización microestructural

En las Figuras 8 y 9 se muestran las MO del MB2, constituida principalmente por ferrita y perlita en proporción 20% y 80% respectivamente. El tamaño de grano ferrítico promedio, determinado por el método del intercepto según la norma ASTM E-112 [26], es de $15 \pm 2 \mu\text{m}$. Las características microestructurales observadas en el corte transversal son similares a las del corte longitudinal. Se observó alto nivel de inclusiones.

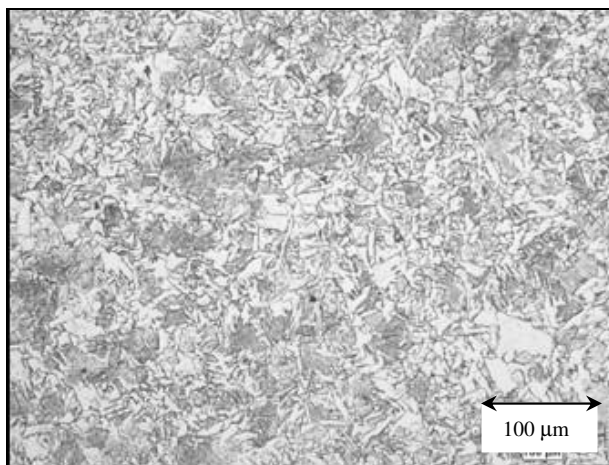


Figura 8. MO del MB2, 200x, longitudinal al laminado

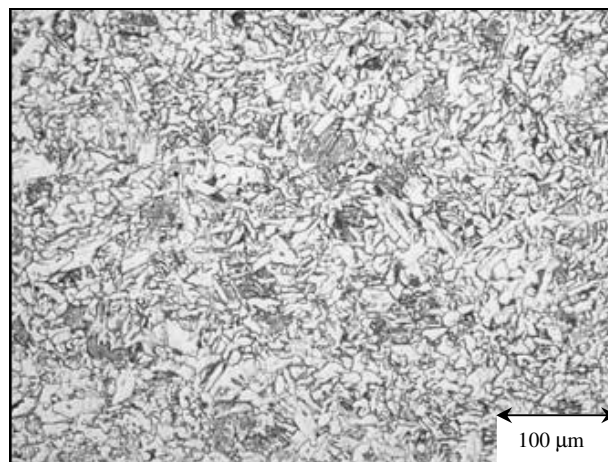


Figura 9. MO del MB2, 200x, transversal al laminado

En las Figuras 10 y 11 se muestran las MO del MB1. Las mismas corresponden a un acero inoxidable austenítico, observándose maclas de deformación. El tamaño de grano austenítico promedio determinado por el método del intercepto según la norma ASTM E-112 [25], es de $26 \pm 2 \mu\text{m}$. Las características microestructurales observadas en el corte transversal son similares a las del corte longitudinal. Se observó bajo nivel de inclusiones.

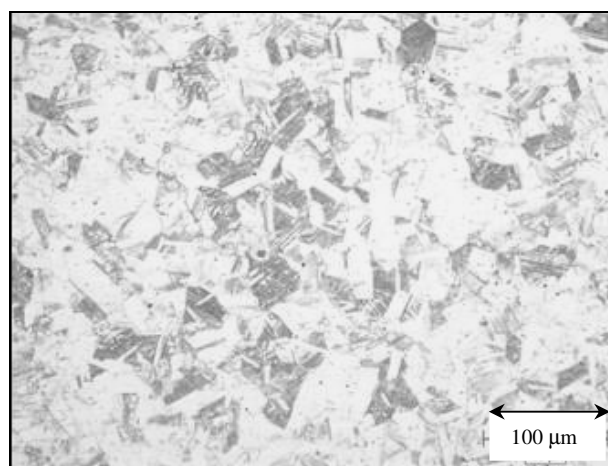


Figura 10. MO del MB1, 200x, longitudinal al laminado

La Figura 12 muestra la MO de la JS sin ataque químico, e ilustra la zona disímil entre el estructural y el inoxidable 308L. Se evidencia el bajo nivel de inclusiones para el inoxidable y el alto nivel de inclusiones para el estructural. Los contrastes permiten distinguir varias sub-regiones definidas por la microestructura en cada una de ellas, producto de las condiciones térmicas locales durante el proceso.

En la Figura 13 se muestra la superficie soldada una vez atacada químicamente (Nital 3%), se diferencian

ambos materiales, revelándose la microestructura del acero estructural, constituida por granos de perlita con ferrita acicular en los bordes de grano.

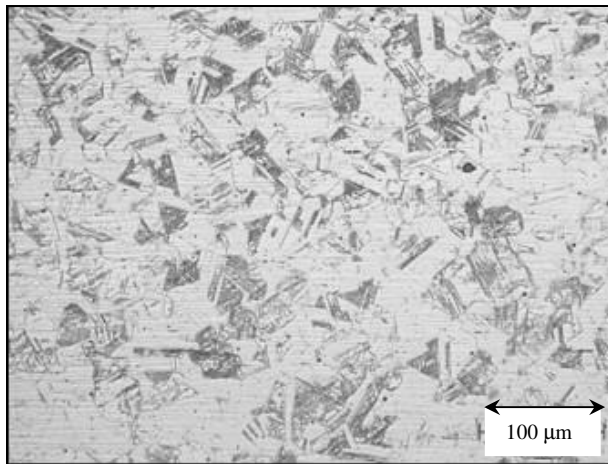


Figura 11. MO del MB1, 200x, transversal al laminado

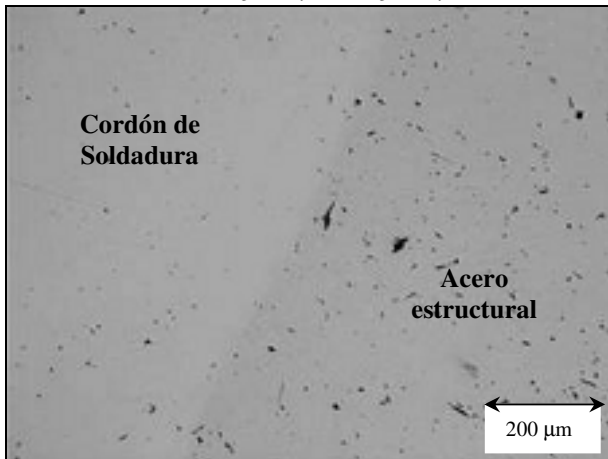
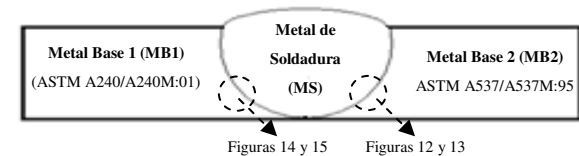


Figura 12. MO de la JS, 308L - A537 (I), sin ataque químico, 100x

Esta microestructura corresponde a la ZAC y se evidencia crecimiento en el tamaño de grano. Dicha fase es producto de la descomposición de la austenita a medida que se disminuye la temperatura y es considerablemente importante ya que la misma provee una microestructura relativamente tenaz y resistente. En la Figura 14 se muestra la interfase del acero inoxidable austenítico (304L) y el metal soldado (308L) sin ataque. En la Figura 15 se evidencia la estructura de ferrita con morfología celular dendrítica, además del MB1 con direccionalidad producto del laminado. En la Figura

16 se observa la matriz austenítica del acero inoxidable 304L.

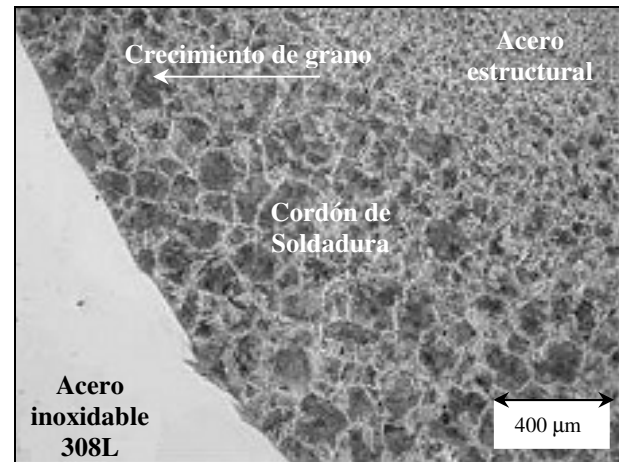


Figura 13. MO de la JS, 308L - A537 (I), con ataque químico, línea de fusión, 50x

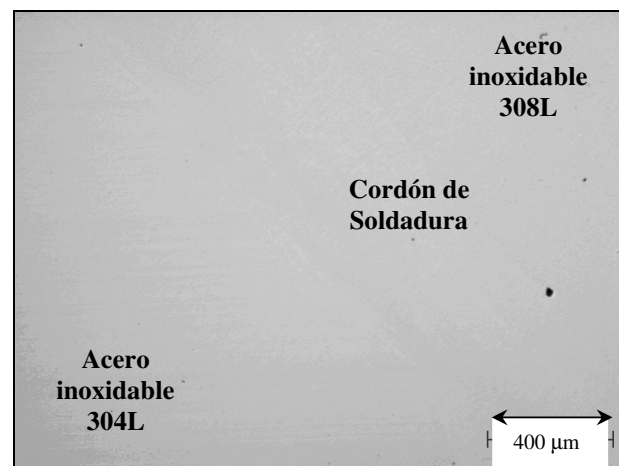


Figura 14. MO de la JS, 304L-308L, sin ataque químico, línea de fusión, 50x

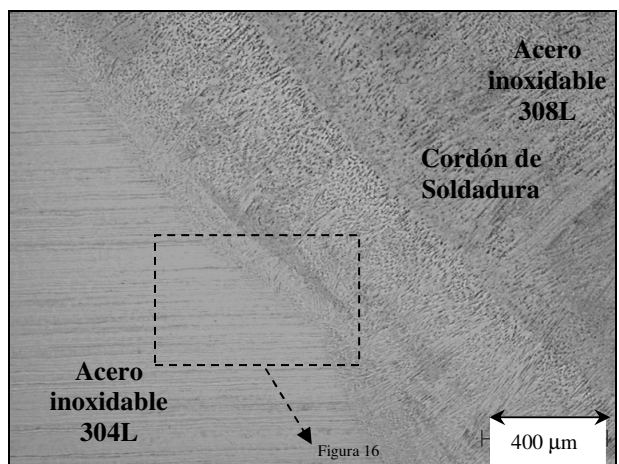


Figura 15. MO de la JS, 304L-308L, con ataque químico, línea de fusión, 50x

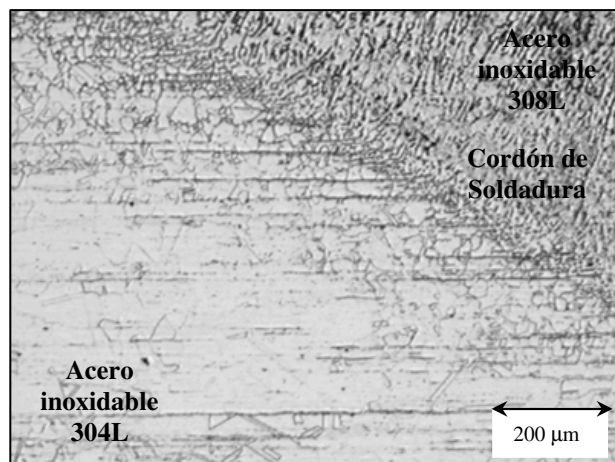


Figura 16. MO de la JS, 304L-308L, con ataque químico, línea de fusión, 100x

3.3 Caracterización mecánica

3.3.1 Microindentación Vickers (HV)

En la Figura 17 se muestra el barrido de dureza y en la Figura 18, el perfil de dureza de la muestra soldada, medido en el centro, un tercio superior y un tercio inferior, del cordón de soldadura, observándose una tendencia similar en las tres mediciones.

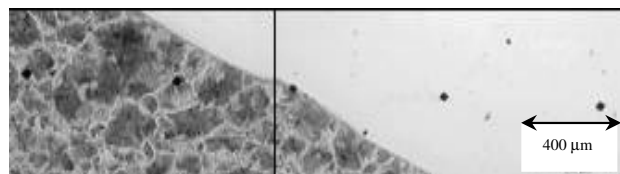


Figura 17. Barrido de dureza HV, 50x

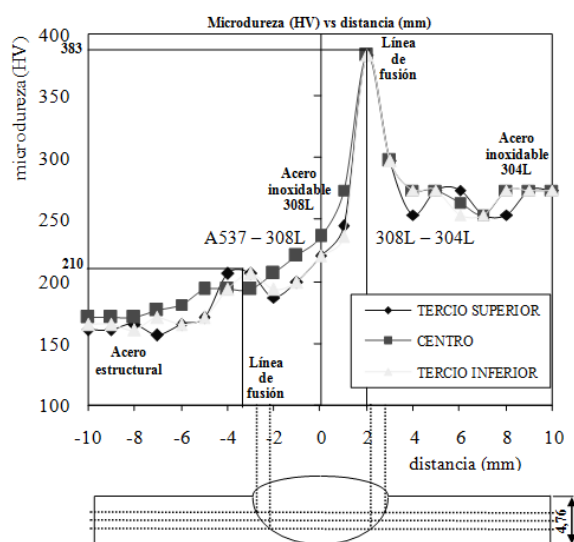


Figura 18. Distribución del perfil de dureza en la muestra soldada

Se puede apreciar que la ZAC presenta un incremento progresivo en los valores de dureza entre el acero estructural y el acero inoxidable, ubicándose en un intervalo entre 150 y 383 HV. De igual forma, se observa que próximo a la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero inoxidable 304L se presenta el valor máximo de dureza de 383 HV que se atribuye a la existencia de una estructura dendrítica en la interfase al cordón de soldadura debido a la fusión del material de aporte; mientras que, próximo a la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero estructural, se presenta un máximo relativo de 210 HV producto de la descomposición de la austenita a medida que se disminuye la temperatura.

3.3.2 Propiedades mecánicas a tensión

Las propiedades de los MB1, MB2, MA y la JS se reportan en la Tabla 8. La Figura 19 muestra la curva ingenieril esfuerzo vs. deformación, observando mayor resistencia y ductilidad en el inoxidable, resistencia similar entre el estructural y la JS, y menor ductilidad en la JS. La resistencia a la tracción (S_u) y el esfuerzo de fluencia (S_y) de las probetas evaluadas son superiores a los requeridos por la norma ASTM [8, 10]. Se puede notar que los resultados de la probeta soldada son similares a los valores del MB2 ASTM A537 (I). Las probetas soldadas experimentaron menor elongación, lo que corresponde con menos ductilidad, sin embargo se mantiene por encima del 20%, lo que aun puede ser clasificado como una unión dúctil [27].

Tabla 8. Propiedades mecánicas a tensión de las muestras bajo estudio (resultados obtenidos en el laboratorio)

Material	S_y (MPa)	S_u (MPa)	Elong (%)
MB1 A240 (304L)	388±3	648±2	48±1
MB2 A537 (I)	265±6	458±2	34±1
MA A240 (ER-308L)*	481±3	585±2	40±2
Junta soldada (JS)	283±3	456±2	25±2

(*) Muestras extraídas del propio alambre de soldadura (material de aporte; ANSI/AWS A5.9/A5.9M:2006)

Es importante mencionar que las probetas soldadas, ensayadas a tracción, fallaron fuera de la ZAC y el cordón de soldadura, específicamente en el MB2 A537 (I) (Figura 20). Los resultados se corresponden con la microestructura presentada. Las regiones con fases más duras que la ferrita modifican la respuesta del material cuando éste es

sometido a carga. Estas estructuras hacen el material más resistente a ser deformado conduciendo a un mayor esfuerzo para producir su deformación plástica. Al mismo tiempo tiende a aceptar un menor grado de alargamiento.

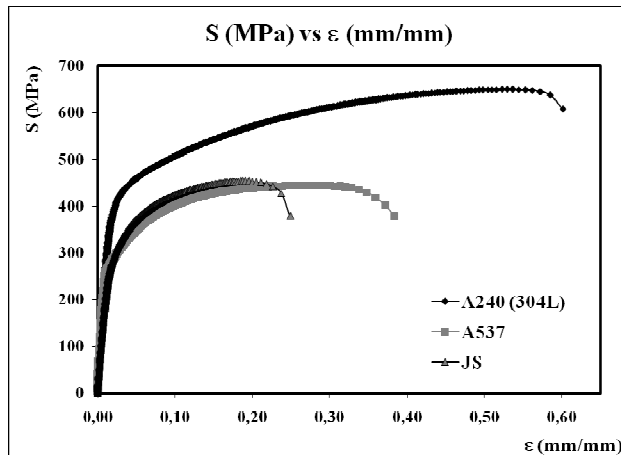


Figura 19. Curva ingenieril Esfuerzo – Deformación a) MB1 A240, b) MB2 A537 c) Junta soldada (JS)

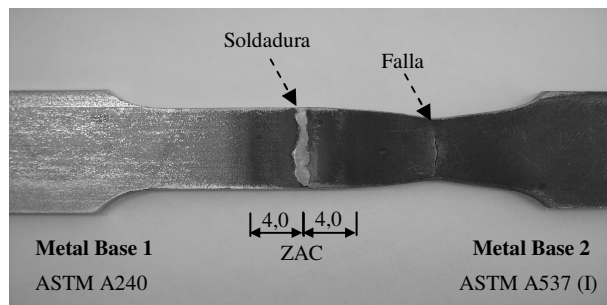


Figura 20. Probetas soldadas, ensayadas a tensión, las medidas de la ZAC están dadas en mm

3.3.3 Propiedades mecánicas a impacto

Las propiedades mecánicas a impacto (Charpy) de los MB1, MB2, y la JS se reportan en la Tabla 9.

Tabla 9. Propiedades mecánicas a impacto de las muestras bajo estudio (especificaciones requeridas por la norma ASTM y resultados obtenidos en el laboratorio)

Material	Energía de impacto (J)	
	ASTM	Laboratorio
Metal base 1 A240 (304L)	86,8	80±2
Metal base 2 A537 (I)	68	60±2
Junta soldada (JS)	----	55±2

3.3.4 Ensayos de doblé guiado

La Figura 21 muestra las probetas sometidas al ensayo de doblé de cara y raíz para las JS. En todo caso, el doblé se pudo realizar 180° hasta alcanzar la forma en “U” colocando la soldadura en la zona sometida a mayor deformación sin presentar grieta.



a) Cara

b) Raíz

Figura 21. Macrofotografías de las muestras sometidas a doblé guiado. a) Cara, b) Raíz

3.3.5 Propiedades mecánicas a fatiga axial

Para determinar la resistencia a la fatiga al millón de ciclos, tanto para los MB, como para la JS, se tomó como referencia la relación de fatiga (0,4) respecto a la resistencia a la tracción (S_u) determinada previamente mediante el ensayo de tensión. Se construyó la curva de Wöhler para cada MB y JS, resultando la curva S vs N correspondiente a la junta soldada próxima superior a la del MB2 (Figura 22). Los valores determinados se reportan en la Tabla 10.

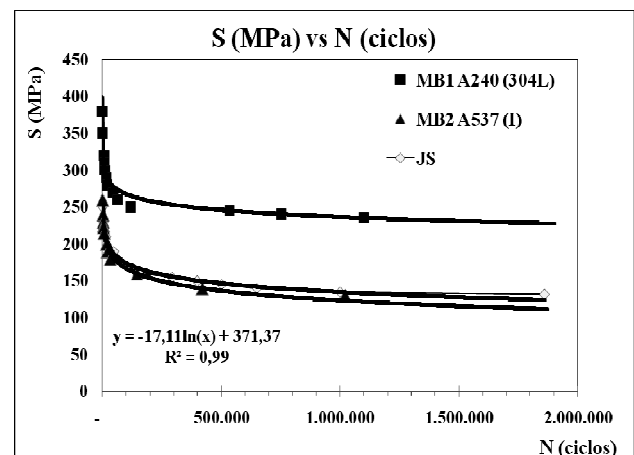


Figura 22. Curva de Wöhler. a) MB1, b) MB2 c) JS

Se puede apreciar de la curva que la resistencia a la fatiga, para el millón de ciclos, de la JS es superior en 8% a la determinada para el MB2, lo que refuerza la no existencia de fisuración interior que influiría de manera determinante en el inicio de la grieta y en consecuencia en la resistencia a la fatiga de la JS.

Es importante mencionar que en todas las probetas soldadas, ensayadas a fatiga, se inició la grieta en la línea de fusión, donde posteriormente se produjo la falla (Figura 23).

Tabla 10. Propiedades mecánicas a fatiga de las muestras bajo estudio

Material	$S_{fatiga} = 0,4$ S_u (MPa)	$S_{fatiga} 10^6$ (MPa)	f
MB 1 A240 (304L)	259±2	218±2	0,36
MB 2 A537 (I)	183±2	122±2	0,27
Junta Soldada (JS)	182±2	135±2	0,30

Es importante mencionar que en todas las probetas soldadas, ensayadas a fatiga, se inició la grieta en la línea de fusión, donde posteriormente se produjo la falla (Figura 23).

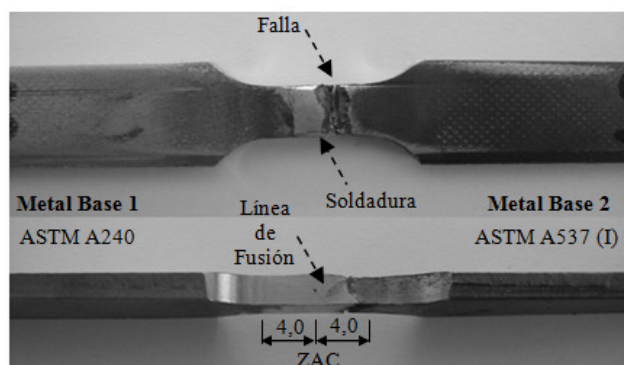


Figura 23. Probetas soldadas, ensayadas a fatiga axial, las medidas de la ZAC están dadas en mm

4. CONCLUSIONES

La unión de los aceros ASTM A240-A537, soldados con ASTM A240 (ER-308L) y proceso GMAW empleando argón como gas de protección, presenta propiedades mecánicas, tanto a carga monotónica como cíclica, que se pueden considerar adecuadas para soportar los requerimientos mecánicos en condiciones de servicio, a pesar de los altos valores de dureza en la ZAC, específicamente en la línea de fusión entre el cordón de soldadura y el acero inoxidable.

Mediante la evaluación utilizando los diagramas de

Schaeffler, DeLong, WRC y Creq/Nieq, se estimó libre fisuración de la unión entre los aceros inoxidables 304L y 308L, así como la posibilidad de fisuración entre el acero estructural A537 (I) soldado a tope con el acero inoxidable ER-308L.

Se obtuvo un modelo estadísticamente fundamentado que permite pronosticar la vida a fatiga en el campo de Wöhler para las juntas soldadas de aceros ASTM A240 (304L)-ASTM A537, soldados con material de aporte ASTM A240 (ER-308L) y proceso de soldadura GMAW, aplicable a recipientes y tuberías a presión, con historias de esfuerzos entre 130-260 MPa. Se encontró una resistencia a la fatiga de 135 MPa, para el millón de ciclos, y relación de fatiga de 0,30 (límite de resistencia a la fatiga / resistencia a la tensión) resultados que podrían ser generalizables a otras aleaciones, otros procesos y tipos de juntas; y vislumbra posibilidades de ampliar el horizonte de la investigación.

El trabajo representa un aporte a la sustentabilidad ecológica y al uso racional de los recursos naturales incorporados a las actividades productivas, ya que al aumentar la vida útil de los equipos se mejora la tasa de utilización de los recursos naturales renovables y no renovables y con esto aumentará el tiempo previsto para su agotamiento.

Al mismo tiempo se disminuyen los impactos negativos al medio ambiente por concepto de averías y fugas presentadas y se disminuyen pérdidas económicas que se derivan, y la mitigación de los consiguientes impactos ecológicos – ambientales negativos que se generan por los escapes de gases y la contaminación del subsuelo favoreciendo el desarrollo sustentable.

Se complementará la caracterización mecánica mediante los ensayos de fatiga a alto número de ciclos y fatiga con probeta fisurada, concentrando los esfuerzos en determinar la velocidad de propagación de las grietas, y desarrollar un modelo matemático que permita comparar con los resultados experimentales. De igual forma, se prevé profundizar en el estudio de crecimiento de grietas en uniones soldadas de materiales disímiles, pertenecientes a recipientes y tuberías a presión, ante carga cíclica para determinar la influencia que producen las cargas alternantes en el mecanismo de surgimiento y propagación de grietas en las uniones soldadas.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido posible por el esfuerzo conjunto entre investigadores del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba; y el Instituto Universitario de Tecnología “Dr. Federico Rivero Palacio”, Caracas, Venezuela, en el marco del Doctorado en Electromecánica, dentro del Convenio de Colaboración Cuba-Venezuela. Los autores quieren dejar constancia de agradecimiento a las personas, directivos e instituciones de ambos centros docentes por el financiamiento y facilidades para la realización de los ensayos, la revisión y correcciones sugeridas a los escritos.

6. REFERENCIAS

- [1]. Askeland, D. *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. 3ra edic. Universidad de Missouri-Rolla. EE.UU. 1998. Capítulo 6.
- [2]. ASM Handbook: *Metals, Properties and Performance Collection*. Ohio (EE.UU.): ASM International (American Society for Metal), 44073. 2005.
- [3]. Manual de Soldadura. *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Vigésima Edición. AWS Handbook (American Welding Society) 2007. Capítulos 3, 5, 7, 11.
- [4]. Código ASME. Sección VIII. *Diseño de Recipientes a Presión*. (American Society of Mechanical Engineers), Divisiones I y II. 2007.
- [5]. ASM Handbook: *Boiler and Pressure Vessels Code*, Vol. IX. Ohio (EE.UU.): ASM (American Society for Metal), 44073. 1998.
- [6]. Dowling NE, *Mechanical Behavior of Materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Prentice Hall. 1998. Capítulo 3.
- [7]. Forrest PG, *Fatiga de los Metales*. Editorial Urmo, 1982. Capítulo 4.
- [8]. Norma ASTM A240/A240M-01. *Standard Specification for Heat-Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2001.
- [9]. Norma ASTM A537/A537M-95. *Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Heat-Treated, Carbon-Manganese-Silicon Steel*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2000.
- [10]. Norma ANSI/AWS A5.9/A5.9M-2006: *Corrosion - Resisting Chromium and Chromium - Nickel Steel Bare and Composite Metal Cored and Stranded Welding Electrodes and Welding Rods*. Miami (EE.UU.): American Welding Society, 2006.
- [11]. Dieter GE, *Mechanical Metallurgy*. New York. McGraw-Hill. Tercera Edición. 1986. Capítulo. 6.
- [12]. Código ASME. Sección IX. *Calificación de Soldaduras y Soldaduras Fuertes*. (American Society of Mechanical Engineers). 2007.
- [13]. Manual de Soldadura. *The welding handbook, Volume 1*. AWS Handbook (American Welding Society), Octava Edición. 2007.
- [14]. Norma ASTM E3-01 *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2001.
- [15]. Norma ASTM E92-82(1997) E3 *Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1997.
- [16]. Norma ASTM E8M-01e1 *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [M]*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2001.
- [17]. Norma ASTM E190-92 (1997) *Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1997.
- [18]. Norma ASTM E23-02 *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2002.
- [19]. Norma ASTM E466-96 *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1996.
- [20]. Norma ASTM E606-92 (1998) *Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1998.
- [21]. Payares, MC, *Modelo Numérico para Predecir el Comportamiento Óptimo de la Microestructura de las Soldaduras de Acero Inoxidable Dúplex*. Trabajo de Ascenso. Caracas (Venezuela): Universidad Simón Bolívar, 2007.
- [22]. Delong WT, Spond DF, *Ferrite-fissuring relationships in austenitic stainless steel weld metals*. Weld. J. 54: 241–246. 1975.
- [23]. Masaki K, *Initiation and propagation behavior of fatigue cracks in hard-shot peened Type 316L steel in high cycle fatigue*. Department of Mechanical Engineering. University of Electro Communications, Tokyo, Japan. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures; Dic 2004.

- [24]. Martínez, R, *Obtención del valor de las variables del proceso de soldadura automática por arco sumergido (SAW) en la recuperación de árboles de molinos de caña de acero 302 (guijos) agrietados*. Tesis Ph.D. Santa Clara (Cuba): Universidad Central de las Villas, 2006.
- [25]. Sindo, K, *Welding Metallurgy*. Department of Materials Science and Engineering University of Wisconsin (EE.UU.): John Wiley & Sons, INC, Publication, 2002, segunda edición.
- [26]. Norma ASTM E112-96e1 *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1996.
- [27]. Rivas AL, Vidal E, D'Armas H, Faneyt S, Villamisa E, y Molina C, *Evaluación de uniones soldadas de acero ferrítico 5Cr-0,5Mo utilizando como electrodo un acero inoxidable austenítico 309Mo*. Facultad de Ingeniería de la UCV, Vol 18 Nro 02. pp 73-81 Abril 2003.