Vida a la fatiga de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L obtenidas mediante el proceso GMAW*

E. S. Puchi-Cabrera**, R. A. Saya-Gamboa**, J. G. La Barbera-Sosa**,
M.H. Staia**, V. Ignoto-Cardinale**, J. A. Berríos-Ortiz***, G. Mesmacque****

Resumen

Se ha llevado a cabo una investigación con la finalidad de determinar el efecto, tanto del modo de transferencia metálica (arco pulsado o cortocircuito) como del contenido de O_2 en la mezcla de gases protectores Ar/O_2 , del proceso de soldadura a tope mediante arco metálico con protección gaseosa (GMAW), sobre la vida a la fatiga en condiciones uniaxiales de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L. Dicho trabajo ha permitido concluir que la composición de la mezcla de gases protectores del proceso GMAW pudiera tener una influencia importante en la vida a la fatiga de las juntas soldadas de dicho material, a través de dos formas distintas: primero, mediante la modificación del radio de curvatura entre la raíz del cordón de soldadura y el metal base y, en segundo lugar, a través del mayor grado de oxidación de los elementos de aleación. En cuanto al modo de transferencia metálica, se determinó que las juntas soldadas mediante arco pulsado presentan una mayor vida a la fatiga en comparación con las juntas obtenidas por cortocircuito para ambas mezclas gaseosas.

Palabras clave

Juntas soldadas. Acero inoxidable 316L. Comportamiento a la fatiga. Transferencia metálica. Arco pulsado. Cortocircuito.

Fatigue life of AISI 316L stainless steel welded joints, obtained by GMAW

Abstract

An investigation has been conducted in order to determine the effect of both the metallic transfer mode (pulsed arc or short circuit) and the O_2 content in the Ar/O_2 gas mixture, of the gas-metal arc welding process (GMAW), on the fatigue life under uniaxial conditions of welded joints of 316L stainless steel. It has been concluded that the mixture of the protective gases employed in the process could have an important influence on the fatigue life of the welded joints of such steel in two different ways. Firstly, through the modification of the radius of curvature at the joint between the welding toe and the base metal and, secondly, through a more pronounced degree of oxidation of the alloying elements induced by a higher O_2 content in the mixture. As far as the metallic transfer mode is concerned, it has been determined that the welded joints obtained under a pulsed arc mode show a greater fatigue life in comparison with the joints obtained under short circuit for both gas mixtures.

Keywords

Welded joints. 316L stainless steel. Fatigue behavior. Metallic transference. Pulsed arc. Short circuit.

* Trabajo recibido el día 5 de diciembre de 2005 y aceptado en su forma final el día 8 de junio de 2006.

** Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.

*** Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de El Salvador

**** Laboratoire de Mécanique de Lille, Université de Lille 1, Mécanique des Matériaux, UMR CNRS 8107, Villeneuve D'Ascq, 59650, Francia.

1. INTRODUCCIÓN

El acero inoxidable 316L es una aleación ampliamente utilizada en procesos industriales que requieren de materiales con una elevada resistencia a la corrosión, inclusive superior a la ofrecida por el acero inoxidable 304. La presencia de molibdeno en su composición química, en el orden de 2-3 % en peso, incrementa su resistencia a picaduras causadas por los cloruros y, por tanto, está especificada para resistir la acción corrosiva de diferentes agentes químicos encontrados en una amplia variedad de aplicaciones tales como, en la industria textil, pulpa y papel, fabricación de elastómeros, así como en la manufactura de implantes quirúrgicos para el tratamiento de fracturas humanas. Por otra parte, el molibdeno también aumenta la resistencia a la fluencia del material a temperaturas elevadas, a través de endurecimiento por solución sólida, lo que hace que la aleación sea adecuada para la fabricación de componentes para reactores nucleares, equipos para la generación de energía a partir de combustibles fósiles, refinerías petroquímicas y plantas químicas, en general, mientras que su estructura austenítica representa, también, una ventaja para aplicaciones a temperaturas criogénicas, en comparación con otros aceros inoxidables^[1 y 2].

Debido a estas diversas aplicaciones, el estudio de las propiedades mecánicas, tanto estáticas como dinámicas, de los aceros inoxidables, en general, representa un tópico de sumo interés científico y tecnológico. En este sentido, Martínez *et al.*^[3] llevaron a cabo una investigación, a fin de analizar la influencia del tamaño del grano de aceros inoxidables austeníticos sobre algunas propiedades mecánicas de interés en estos materiales, empleando tanto aceros estables como metaestables. Por otra parte, Oñoro *et al.*^[4] han llevado a cabo un estudio a fin de analizar el comportamiento a fatiga y corrosión-fatiga de dos aceros inoxidables austeníticos 317LN con microestructuras diferentes. De acuerdo a esta investigación, el acero con una estructura completamente austenítica presenta una mejor resistencia a la fatiga y a la corrosión-fatiga, así como mejor ductilidad que el acero con una microestructura austenítica, con presencia de ferrita, especialmente cuando estos materiales son ensayados a cargas bajas.

Tal como ha sido ampliamente reseñado en la literatura^[5-7], la soldadura es empleada a nivel industrial como uno de los métodos más comunes de unión de piezas y componentes. Sin embargo, debido a la heterogeneidad inducida por el proceso, tanto el metal base como el cordón y la zona afectada por el calor (ZAC) poseen propiedades mecánicas diferentes, lo que hace que el comportamiento mecánico del componente soldado sea muy complicado una vez que es sometido a

carga. Las uniones soldadas son comúnmente sometidas a diversos tipos de sollicitación cíclica cuando se encuentran en aplicaciones prácticas y, por tanto, el fallo por fatiga es bastante común. En el caso de recipientes y tuberías presurizadas, por ejemplo, la resistencia mecánica de las uniones soldadas determina la resistencia de toda la estructura, por lo que la soldadura representa un importante factor en la estimación de la reducción de la vida útil de dichos componentes.

Existen numerosos estudios sobre el comportamiento a la fatiga de uniones soldadas^[5-23]. Entre estos, cabe destacar los realizados por Valsan *et al.*^[8 y 9], quienes llevaron a cabo un análisis comparativo del comportamiento a la fatiga de bajo ciclaje en condiciones de alta temperatura, de uniones soldadas de aceros tipo 316LN, metal base, 316 metal de aporte y 316LN/316. Por otra parte, Zhao *et al.*^[10] estudiaron la interacción y evolución de grietas cortas de fatiga en uniones soldadas de acero inoxidable tipo 1Cr18Ni9Ti, a través de la observación de réplicas. Asimismo, Cheng *et al.*^[11] investigaron la iniciación y propagación de grietas de fatiga de bajo ciclaje en el cordón, ZAC y metal base en una unión soldada de un recipiente presurizado fabricado con un acero tipo 16MnR. Más recientemente, Chen y Zhao^[13] llevaron a cabo una investigación sobre el comportamiento a la fatiga en un acero inoxidable del tipo 1Cr18Ni9Ti y en sus uniones soldadas sometidas a presión interna cíclica. Especialmente, en esta investigación se evaluaron los cambios de dureza que ocurren en el metal base, así como en el cordón y ZAC durante los ensayos de fatiga, a fin de estudiar la acumulación de daño de la junta soldada.

Además de las propiedades de fatiga, también ha sido de interés, en años recientes, el estudio de las propiedades mecánicas en tracción de las juntas soldadas de los aceros inoxidables, tanto austeníticos como dúplex. En este sentido, Amigó *et al.*^[14] han llevado a cabo una investigación a fin de evaluar la influencia de la velocidad de soldeo en las propiedades a tracción de uniones soldadas por láser, de chapas de acero inoxidables dúplex. Dicho estudio, también, involucró la observación de la microestructura de los cordones obtenidos y de la zona afectada por el calor mediante técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido, así como la determinación de diferentes perfiles de microdureza que permitieron evaluar las modificaciones en las propiedades mecánicas de la zona de afección térmica.

En lo que se refiere al mecanismo de fatiga mismo de las uniones soldadas, es un hecho comúnmente aceptado que, en la mayoría de estas, el fallo es causado por la propagación de grietas semielípticas, de tipo superficial, que se inician en la raíz de la soldadura, por lo que para analizar el comportamiento a la fatiga de uniones soldadas empleando técnicas de mecánica de fractura es necesario calcular el valor del

Tabla I. Composición química del acero inoxidable austenítico AISI 316L utilizado como metal base y del metal de aporte

Table I. Chemical composition of the austenitic stainless steel 316L employed as base metal and welding material

Material Base	Composición Química (% en peso)									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	O*	N*
AISI 316L	0,02	1,27	0,42	0,03	0,024	17,74	11,23	2,21	21	125
ER-316L-Si	0,02	1,65	0,92	0,02	0,022	19,16	12,28	2,51		

*Valores expresados en ppm.

factor de intensidad de esfuerzos de la grieta de fatiga. Para ello, se acostumbra a predecir la vida a la fatiga de las uniones soldadas, en términos de parámetros de crecimiento de grietas, tales como da/dN y ΔK , obtenidos experimentalmente^[15-19]. Sin embargo, tal como ha sido señalado por diversos investigadores^[20-24], este enfoque pudiera ser inadecuado ya que el mismo no involucra el nivel de esfuerzo medio que opera en la junta y, también, debido a que las grietas en las juntas soldadas no siempre se propagan de manera normal al esfuerzo aplicado debido a lo complejo de la geometría.

En este sentido, Choi y Choi^[24] llevaron a cabo un estudio, recientemente, sobre el crecimiento de grietas de fatiga en uniones soldadas, cuando este tiene lugar en planos distintos a aquellos perpendiculares a los esfuerzos aplicados, empleando un enfoque basado en densidad de energía de deformación y utilizando muestras de curvatura diferente mediante las cuales se estimó la resistencia a la fatiga en tracción. El análisis del crecimiento de las grietas de fatiga se llevó a cabo a fin de evaluar el efecto de la forma de la grieta inicial, longitud de esta y relación de carga, lo que permitió a estos investigadores obtener parámetros de crecimiento de grietas de fatiga a partir de curvas de crecimiento de grietas, asumiendo que dichos defectos mantienen una forma geométrica constante.

En este contexto, la presente investigación ha sido realizada con la finalidad de determinar el efecto de algunos de los parámetros que intervienen en el proceso de soldadura a tope de tipo GMAW en la vida a la fatiga uniaxial de juntas soldadas del acero inoxidable AISI 316L, específicamente, el modo de transferencia metálica (arco pulsado o cortocircuito) y el contenido de O_2 en la mezcla protectora, en el intervalo de 1 a 5 %, en virtud que los mismos pudieran, no solo dar lugar a la generación de un mayor número de defectos superficiales en la junta soldada sino, además, inducir cambios en el radio de curvatura entre el cordón y el metal base, todo lo cual afectaría el comportamiento a la fatiga de la junta.

2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

La presente investigación se llevó a cabo con muestras de acero inoxidable 316L cuya composición química se presenta en la tabla I.

Dicho material fue provisto en forma de chapa de dimensiones 1,2 x 2 m, a partir de la cual se mecanizaron placas 125 x 400 x 6 mm, correspondientes a las cuatro condiciones a ser estudiadas: soldadura GMAW, en modos tanto de transferencia metálica por arco pulsado como por cortocircuito, usando mezclas de gas protector de Ar/1 % O_2 y Ar/5 % O_2 . La composición química del metal de aporte (ER-316L-Si) también se presenta en la tabla anterior. La misma, al igual que la composición del metal base, se determinó mediante técnicas de espectroscopía por absorción atómica, lo que permitió establecer el contenido en peso de silicio, manganeso, níquel, cromo, molibdeno y fósforo y, mediante el método gasométrico, para determinar el contenido en peso de carbono, azufre, oxígeno y nitrógeno, en ambos materiales.

Las probetas de tracción y fatiga correspondientes a cada condición se obtuvieron a partir de las placas soldadas mediante un sólo cordón de soldadura el cual se realizó en forma transversal a la dirección de laminación del material, por lo que la sección longitudinal de las probetas corresponde a la dirección de laminación de las placas y el cordón de soldadura es transversal a las probetas mismas. La preparación de la junta soldada fue a tope con bisel en V, con un ángulo de apertura de 60° y una separación de raíz de 1,2 mm, tal como se ilustra en la figura 1.

El proceso de soldadura se realizó en forma semiautomática, a una velocidad de 16 cm/min en posición plana, empleando modos de transferencia por arco pulsado y cortocircuito con polaridad directa. La mezcla de gases de protección estuvo compuesta de Ar/1 % O_2 y Ar/5 % O_2 y se utilizaron flujos de 15 l/min. El material de aporte fue la aleación ER 316L-Si con diámetro de 1,2 mm, alimentado a una velocidad de 4 m/min.

Figura 1. Diseño de la junta a tope.

Figure 1. Design of the welded joint.

En la transferencia metálica por arco pulsado se ajustaron los parámetros del pulso, a objeto de garantizar la estabilidad del arco eléctrico al transferir una

gota por pulso, así como la penetración y la reducción del potencial de oxidación de la mezcla protectora. Las variables que se mantuvieron constantes fue-

Figura 2. Diseño de las probetas de junta soldada para los ensayos de: (a) Tracción y (b) fatiga. Cotas en mm.

Figure 2. Design of the welded joint samples for tensile and fatigue tests. Measurements are in mm.

ron las siguientes: corriente pico (I_p) de 300 A, corriente base (I_b) de 100 A, tiempo de pico (T_p) de 4,5 ms y tiempo de base (T_b) de 12,5 ms. Además, el comportamiento de la tensión y corriente se verificó mediante el empleo del software "OSCILO" que permite cuantificar la cantidad de gotas e identificar la forma como éstas se transfieren al metal base.

En la transferencia metálica convencional o cortocircuito, la fuente de energía se controló utilizando una tensión constante, la cual se obtiene a partir de un ajuste de la corriente en función de la disminución del arco. Las variables de soldadura que se mantuvieron constantes en este caso fueron las siguientes: velocidad de alimentación (V_a) de 4 m/min, tensión de referencia (U_{ref}) de 17 V, inductancia de ascenso (K_s) de 30 y inductancia de descenso (K_d) de 30.

A partir de las placas soldadas se obtuvieron probetas de 31,6 x 254 x 6 mm mediante el uso de corte por plasma. Posteriormente, se mecanizó la sección calibrada de las probetas sin afectar tanto la cara como la raíz del cordón de soldadura, tal como se ilustra en la figura 2. Para la condición de soldadura mediante transferencia metálica por cortocircuito utilizando una mezcla protectora de Ar/5 % O_2 se mecanizaron tres probetas para ensayos de tracción y dos probetas para ensayos de fatiga, mientras que para la mezcla protectora de Ar/1 % O_2 se prepararon, solo, seis probetas de fatiga. Para la condición de soldadura mediante transferencia metálica pulsada y ambas mezclas protectoras se prepararon siete probetas para ensayos de fatiga. Las probetas de tracción de las juntas soldadas se mecanizaron según la norma ANSI/AWS B 4.0-97 y el código D 1.1-98, mientras que las probetas de fatiga se fabricaron siguiendo la norma ASTM E-466-90. El mecanizado se realizó en una fresa de control numérico computarizado, con bajas profundidades de corte, con el fin de minimizar la posible introducción de esfuerzos residuales durante la operación. Finalmente, las superficies mecanizadas se lijaron longitudinalmente con papeles de SiC de granulometría variable, desde 100 hasta 1.200, a fin de eliminar las muescas producidas durante el mecanizado.

El estudio macrográfico se realizó mediante una lupa estereográfica, marca Nikon, modelo SMZ-U, la cual tiene acoplado un analizador de imágenes LECO, modelo 500. El radio de curvatura entre la raíz del cordón y el metal base se determinó con la ayuda del software AutoCad 2000i. Los ensayos de tracción y fatiga se llevaron a cabo en una máquina servohidráulica, controlada por computadora, Instron modelo 8502 de 25 ton de capacidad. Particularmente, los ensayos de tracción se realizaron empleando una velocidad de cabezal constante de 3 mm·min⁻¹. Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en condiciones de carga axial a una relación de carga (R) de 0,1 y una frecuencia de 10 Hz. El esfuerzo alternante máximo fue de 202 MPa, que corresponde,

aproximadamente, al 75 % del esfuerzo de fluencia de la junta soldada mediante cortocircuito, utilizando una mezcla de Ar/5 % O_2 .

Finalmente, se realizó un estudio fractográfico de las probetas que fallaron por fatiga empleando un microscopio electrónico de barrido, marca Philips, modelo XL30, con un voltaje de aceleración de 25 kV. Dicho estudio se hizo con el propósito de analizar la apariencia de la superficie de fractura, penetración de raíz, distorsión de la junta soldada, microestructura y dilución del cordón de soldadura, así como las zonas de inicio de las grietas de fatiga y la posterior propagación de estas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Determinación de las propiedades mecánicas estáticas y dinámicas de las juntas soldadas

La tabla II resume los resultados de la evaluación del esfuerzo de fluencia ($R_{0,2\%}$), resistencia a la tracción ($R_{m\max}$), esfuerzo real a carga máxima (σ_u) y deformación real a carga máxima (ϵ_u) para las juntas obtenidas mediante transferencia metálica por cortocircuito utilizando una mezcla protectora de Ar/5 % O_2 .

A partir del valor de $R_{0,2\%}$, se determinó el esfuerzo cíclico máximo a aplicar en el ensayo de fatiga uniaxial, el cual corresponde, aproximadamente al 75 % del mismo. La tabla III presenta el promedio y desviación estándar del número de ciclos a falla de las muestras ensayadas en cada condición y la figura 3 ilustra el efecto del contenido de O_2 de la mezcla protectora en la vida a la fatiga de las juntas para ambos modos de transferencia metálica.

De acuerdo a lo que se percibe de la misma, la vida a la fatiga de las juntas no presenta una variación significativa debido a que estos valores están comprendidos entre las desviaciones estándar obtenidas.

Sin embargo, se puede observar que para el modo de transferencia metálica por arco pulsado, la vida a la fatiga, en promedio, es algo mayor en comparación con el modo de transferencia por cortocircuito para ambas mezclas protectoras. Este resultado podría estar asociado al hecho que en la transferencia metálica por arco pulsado se generan cordones con un mejor acabado superficial (sin salpicaduras, ni mordeduras), en comparación con el modo de transferencia metálica por cortocircuito lo cual conllevaría a una extensión de la vida a la fatiga de la junta soldada.

Asimismo, de la figura anterior, se puede observar que las juntas soldadas con la mezcla protectora de Ar/1 % O_2 presentan una mayor vida a la fatiga que las juntas soldadas con la mezcla protectora Ar/5 % O_2 , para ambos modos de transferencia metálica. Se cree

Tabla II. Propiedades mecánicas estáticas de la junta soldada obtenida mediante transferencia metálica por cortocircuito, utilizando una mezcla protectora de Ar/5 % O₂

Table II. Tensile mechanical properties of the welded joints obtained by short circuit metallic transference, employing a protective mixture of Ar/5% O₂

Probeta #	R _{0,2} %, MPa	R _{máx} MPa	σ _u MPa	ε _u
1	247	575	998	0,55
2	271	585	1.015	0,55
3	289	578	1.003	0,55
Promedio	269	579	1.005	0,55
Desviación estándar	± 17	± 4	± 7	0

que este resultado podría atribuirse al hecho de que el incremento en el porcentaje de oxígeno en la mezcla protectora no solo promueve una mayor dilución del metal de aporte, lo cual genera un relleno insuficiente en las juntas soldadas creando así una menor resistencia a la fatiga en comparación con la mezcla de menor contenido de O₂ sino que, además, pudiera tener una influencia importante en la reducción del radio de curvatura entre el cordón y el metal base^[25], lo que traería como consecuencia un incremento del factor de concentración de esfuerzos en la raíz de la soldadura y una disminución de la vida a la fatiga de la junta.

Tabla III. Número de ciclos a la fractura en fatiga uniaxial de las juntas soldadas ensayadas a un esfuerzo alternante de 202 MPa

Table III. Number of cycles to fracture in uniaxial fatigue of the welded joints, tested at an alternating stress of 202 MPa

Probetas #	Número de ciclos a la fractura			
	Arco pulsado		Cortocircuito	
	Ar/1 %O ₂	Ar/5 %O ₂	Ar/1 %O ₂	Ar/5 %O ₂
1	504.943	77.373	372.917	67.091
2	176.962	232.991	158.026	127.961
3	792.518	58.991	332.111	—
4	265.393	92.400	147.889	—
5	251.736	178.891	380.615	—
6	143.091	204.918	149.472	—
7	222.652	429.110	—	—
Promedio	336.756	182.096	256.838	97.526
DE	±215.270	±118.505	±106.162	±30.435

3.2. Estudio microscópico de las juntas soldadas y de la superficie de fractura de las muestras ensayadas a fatiga

De la observación superficial se pudo apreciar que las juntas soldadas obtenidas mediante transferencia

Figura 3. Vida a la fatiga de juntas soldadas obtenidas mediante transferencia metálica por arco pulsado y cortocircuito utilizando mezclas protectoras de Ar/1 % O₂ y Ar/5 % O₂.

Figure 3. Fatigue life of welded joints obtained by pulsed arc and short circuit metallic transference, employing protective mixtures of Ar/1 % O₂ and Ar/5 % O₂.

Figura 4. Junta soldada: (a) esquema isométrico, (b) vista frontal y (c) vista posterior.

Figure 4. Welded joint. (a) Isometric view. (b) Frontal view. (c) Back view.

Figura 5. Macrografías características de las juntas soldadas: (a) Transferencia metálica por arco pulsado con una mezcla protectora de Ar/1 % O_2 , (b) Transferencia metálica por arco pulsado con una mezcla protectora de Ar/5 % O_2 , (c) Transferencia metálica por cortocircuito con una mezcla protectora de Ar/1 % O_2 , y (d) Transferencia metálica por cortocircuito con una mezcla protectora de Ar/5 % O_2 .

Figure 5. Characteristic macrophotographs of the welded joints. (a) Pulsed arc metallic transference with protective mixture of Ar/1 % O_2 . (b) Pulsed arc metallic transference with protective mixture of Ar/5 % O_2 . (c) Short circuit metallic transference with protective mixture of Ar/1 % O_2 . (d) Short circuit metallic transference with protective mixture of Ar/5 % O_2 .

metálica por arco pulsado presentan cordones sin mordeduras en los bordes del cordón y un metal base sin salpicaduras ni mordeduras, en contraste con las juntas realizadas mediante el modo de transferencia metálica por cortocircuito. Sin embargo, cabe destacar

que el porcentaje de oxígeno utilizado en estas mezclas protectoras está en el límite del intervalo recomendado para eliminar tales defectos.

La figura 4 ilustra un esquema de la junta soldada, en la cual se indica la numeración de las zonas

sobre las cuales se midieron los radios de curvatura entre la cara de la raíz del cordón o la cara superior del cordón y el metal base, mientras que en la figura 5 se presentan un conjunto de fotomicrografías características para cada condición de junta soldada, las cuales fueron tomadas transversalmente al cordón de soldadura. Este tipo de macrografías permitió la evaluación del radio de curvatura en las zonas críticas entre el cordón de soldadura y el metal base, cuyos valores promedio y desviación estándar se resumen en la tabla IV, indicándose la localización de la medición.

Los resultados obtenidos señalan que, tal como era de esperar, las grietas de fatiga se nuclean en las zonas de menor radio de curvatura, las cuales están ubicadas entre la cara de la raíz de la soldadura y el metal base. Además, se observa que a menor radio de curvatura, menor es el número de ciclos a la fractura de la respectiva condición del material soldado.

A fin de comprender, cabalmente, el efecto de la mezcla de gases protectores y el modo de transferencia metálica en la vida a la fatiga de las juntas soldadas, se realizó un análisis micrográfico detallado de las

Tabla IV. Radio de curvatura y desviación estándar de las juntas soldadas en ambas condiciones de transferencia metálica

Table IV. Radius of curvature and its standard deviation for the welded joints in both metallic transference conditions.

Zona de medición	Radio de curvatura, mm			
	Arco pulsado		Cortocircuito	
	Ar/1 % O ₂	Ar/5 % O ₂	Ar/1 % O ₂	Ar/5 % O ₂
1	20,80 ± 7,1	4,02 ± 3,51	17,8 ± 8,59	4,51 ± 2,58
2	29,00 ± 24,1	5,53 ± 5,35	18,3 ± 6,66	3,26 ± 2,81
3	5,12 ± 5,83	5,18 ± 9,00	5,17 ± 2,62	1,48 ± 2,05
4	7,46 ± 6,39	3,54 ± 4,16	1,73 ± 1,48	1,00 ± 0,71

probetas de fatiga representativas de las distintas condiciones estudiadas. En este sentido, la figura 6 presenta un conjunto de fotomicrografías correspondientes a una muestra representativa, soldada mediante arco

Figura 6. - Microestructura de una parte del perfil del cordón de soldadura de una muestra correspondiente al modo de transferencia por arco pulsado con mezcla protectora de Ar/1 % O₂.

Figure 6. Microstructure of a welded joint sample produced by pulsed arc metallic transference with a protective mixture of Ar/1 % O₂.

Figura 7.- Microestructura del cordón de soldadura de una muestra soldada por arco pulsado empleando una mezcla de Ar/5 % O₂.

Figure 7. Microstructure of a welded joint sample produced by pulsed arc metallic transference with a protective mixture of Ar/5 % O₂.

Figura 8.- Microestructura del cordón de soldadura de una muestra soldada por cortocircuito empleando una mezcla de Ar/1 % O₂.

Figure 8. Microstructure of a welded joint sample produced by short circuit metallic transference with a protective mixture of Ar/1 % O₂.

Figura 9.- Microestructura del cordón de soldadura de una muestra soldada por cortocircuito empleando una mezcla de Ar/5 % O₂.

Figure 9. Microstructure of a welded joint sample produced by short circuit metallic transference with a protective mixture of Ar/5 % O₂.

pulsado empleando una mezcla de Ar/1 % O₂. Las fotomicrografías A-C ilustran la microestructura de la junta en diversas zonas de esta, de acuerdo a lo indicado en la macrografía D.

En estas, puede observarse la presencia de ferrita delta en el cordón de soldadura, presentando una morfología de tipo vermicular, aspecto característico del proceso de soldadura del acero 316L cuando se emplea material de aporte con contenidos elevados de elementos que promueven la formación de ferrita. Las dos fotomicrografías correspondientes a distintas regiones del cordón (zonas B y D) señalan la existencia de dendritas, un poco más alargadas en el centro del cordón mismo en comparación con el centro de la raíz. En esta última localización, la velocidad de enfriamiento del material es mayor y, por ende, se genera una microestructura más fina.

De acuerdo a lo señalado en la macrografía D, en este tipo de muestras, las grietas de fatiga se nuclearon en la región de menor radio de curvatura entre la raíz y el metal base, específicamente en la ZAC, que es relativamente pequeña (del orden de 120 μm), tal como se aprecia en la fotomicrografía C.

De esta manera, la grieta se propaga desde la región inferior hacia la superior, donde ocurre la falla por sobrecarga. Estas características son bastante similares en las muestras representativas correspondientes a las cuatro diferentes condiciones de proceso analizadas, tal como puede observarse en las figuras 7 a 9.

Por otra parte, la figura 10 presenta un conjunto de fotomicrografías obtenidas mediante MEB donde se ilustra una vista general de la superficie de la fractura de la junta soldada mediante arco pulsado utilizando la mezcla Ar/1 % O₂. El análisis fractográfico demuestra que la superficie de fractura se caracteriza por la presencia de numerosos sitios de nucleación de grietas de fatiga que se encuentran en la región asociada al menor radio de curvatura entre la raíz de la soldadura y el metal base.

Las fotomicrografías correspondientes a las figuras 10b y 10c ilustran con mayor detalle la nucleación y propagación de las grietas desde dicha región, donde tiene lugar la mayor concentración de tensiones debido al pronunciado cambio en sección transversal, mientras que en la figura 7d puede observarse la presencia de grietas de fatiga secundarias, indicando

Figura 10. Fotomicrografías obtenidas por MEB de una muestra representativa soldada por arco pulsado empleando una mezcla de Ar/1 % O₂. (a) Vista general de la superficie de fractura, (b) Detalle A de la figura 10a, (c) Detalle B de la figura 10a, (d) Detalle C de la figura 10a.

Figure 10. SEM micrographs of a representative welded sample, produced by pulsed arc metallic transference, employing a protective mixture of Ar/ 1% O₂. (a) General view of the fracture surface. (b) Detail A in figure. 10a. (c) Detail B in figure 10a. (d) Detail C in figure 10a.

la posible bifurcación de algunas de las grietas que se propagaron sobre la superficie de fractura.

Esta descripción general es bastante similar a la encontrada en las otras superficies de fractura analizadas, correspondientes a las diferentes condiciones de soldadura estudiadas, tal como puede observarse a partir de las figuras 11 a 13, en algunas de las cuales es evidente la presencia de estriaciones de fatiga, a pesar de la apariencia de clivaje de las superficies de fractura general.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha permitido concluir que la composición de la mezcla de gases protectores del proceso GMAW pudiera tener una influencia importante en el comportamiento a la fatiga de las juntas soldadas del acero inoxidable austenítico 316L, a través de dos formas distintas: primeramente, mediante la modificación del radio de curvatura entre la raíz del cordón de soldadura y el metal base, ya que el incremento en el contenido de O₂ en la mezcla Ar/O₂ desde 1 % hasta 5 %, aparentemente, da lugar a una disminución en el radio de curvatura, lo que trae como consecuencia un incremento importante en el factor de concentración de esfuerzos y, por ende, en la reducción del número de ciclos a falla, cuando la junta es ensayada a esfuerzos alternantes máximos del orden del 75 % del esfuerzo de fluencia de esta. En segundo lugar, a través del mayor grado de oxidación de los

elementos de aleación lo que es inducido por un mayor contenido de O₂ en la mezcla.

En cuanto al modo de transferencia metálica, las juntas soldadas mediante arco pulsado presentan una mayor vida a la fatiga en comparación con las juntas obtenidas por cortocircuito para ambas mezclas protectoras.

Se cree que este resultado está asociado, no solo con una mayor penetración del cordón de soldadura en la raíz de la junta soldada como consecuencia del incremento en la intensidad del arco eléctrico para las muestras soldadas por arco pulsado, sino también con la generación de un menor número de defectos superficiales en el cordón, que pudieran inducir sitios adicionales de nucleación de grietas de fatiga, en comparación con las muestras soldadas por cortocircuito.

Agradecimientos

La presente investigación ha sido realizada con el financiamiento del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) a través de los proyectos S1-2000000642 y PI-2000001598, así como del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV) a través del Proyecto PG 08-17-4595-2000. Jonathan A. Berríos-Ortiz le agradece a la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.

Figura 11. Fotomicrografías obtenidas por MEB de una muestra representativa soldada por arco pulsado empleando una mezcla de Ar/5 % O₂. (a) Vista general de la superficie de fractura, (b) Detalle A de la figura 11a, (c) Detalle B de la figura 11a, (d) Detalle C de la figura 11a. (e) Estriaciones de fatiga generadas durante la propagación de las grietas.

Figure 11. SEM micrographs of a representative welded sample, produced by pulsed arc metallic transference, employing a protective mixture of Ar/5 % O₂. (a) General view of the fracture surface. (b) Detail A in figure 11a. (c) Detail B in figure 11a. (d) Detail C in figure 11a. (e) Fatigue striations produced during the propagation of the cracks.

Figura 12. Fotomicrografías obtenidas por MEB de una muestra representativa soldada por cortocircuito empleando una mezcla de Ar/1 % O₂. (a) Vista general de la superficie de fractura, (b) Detalle A de la figura 12a, (c) Detalle B de la figura 12a, (d) Detalle C de la figura 12a.

Figure 12. SEM micrographs of a representative welded sample, produced by short circuit metallic transference, employing a protective mixture of Ar/1 % O₂. (a) General view of the fracture surface. (b) Detail A in figure 12a. (c) Detail B in figure 12a. (d) Detail C in figure 12a.

Figura 13. Fotomicrografías obtenidas por MEB de una muestra representativa soldada por cortocircuito empleando una mezcla de Ar/5 % O₂. (a) vista general de la superficie de fractura, (b) detalle A de la figura 13a, (c) detalle B de la figura 13a, (d) detalle C de la figura 13a.

Figure 13. SEM micrographs of a representative welded sample, produced by short circuit metallic transference, employing a protective mixture of Ar/5 % O₂. (a) General view of the fracture surface. (b) Detail A in figure 13a. (c) Detail B in figure 13a. Detail C in figure 13a.

REFERENCIAS

- [1] *Stainless Steel*, ASM Specialty Handbook, J. R. Davis (Ed.), ASM International, Materials Park, OH, USA, 1994.
- [2] S. VENUGOPAL, S. L. MANNAN Y Y. V. R. K. PRASAD, *Mater. Sci. Technol.* 9 (1993) 899-906.
- [3] M. A. MARTÍNEZ, J. ORDIERES, J. BOTELLA, R. SÁNCHEZ Y R. PARRA, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 64-68.
- [4] J. OÑORO, R. GAMBOA Y C. RANNINGER, *Rev. Metal. Madrid* 42 (2005) 4-10.
- [5] D. RADAJ, C. M. SONSINO Y D. FLADE, *Int. J. Fatigue* 20 (1998) 471-480.
- [6] T. L. TENG, C. P. FUNG Y P. H. CHANG, *Eng Fail. Anal.* 10 (2003) 131-151.
- [7] J. RUDOLPH, E. WEISS, *Chemie Ingenieur Technik* 74 (2002) 33-40.
- [8] M. VALSAN, K. B. SANKARA, R. SANDHYA Y S. L. MANNAN, *Mater. Sci. Eng. A* 149 (1992) 9-12.
- [9] M. VALSAN, K. SUNDARARAMAN, K. B. S. RAO Y S. L. MANNAN, *Metall. Mater. Trans. A* 26 (1995) 1.207-1.219.
- [10] Y. X. ZHAO, Q. GAO, J.-N. WANG, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 22 (1999) 469-480.
- [11] G. CHENG, Z. B. KUANG, Z. W. LOU Y L. HUA, *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 67 (1996) 229-242.
- [12] K. B. SANKARA, M. VALSAN Y S. L. MANNAN, *Mater. Sci. Eng. A* 130 (1990) 67-82.
- [13] X. CHEN Y S.-M. ZHAO, *Eng. Fail. Anal.* 12 (2005) 616-622.
- [14] V. AMIGÓ, V. BONACHE, L. TERUEL Y A. VICENTE, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 90-97.
- [15] S. J. MADDUX, *Int. J. Fatigue* 11 (1975) 221-236.
- [16] K. H. FRANK Y J. W. FISHER, *Proc. ASCE* 105 (1979) 1.727-1.739.
- [17] C. MIKI, T. MORI, K. SAKAMOTO Y T. SASAKI, *Struct. Eng./Earthq. Eng. JSCE* 4 (1987) 289-297.
- [18] K. TAKENA, F. ITOH, F. NISHINO Y C. MIKI, *Struct. Eng./Earthq. Eng. JSCE* 5 (1988) 393-396.
- [19] M. SAKANO, H. ARAI Y T. NISHIMURA, *Proc. JSCE* 410/I-12 (1989) 195-203.
- [20] C. MIKI, M. SAKANO, Y. TOYODA Y T. YOSHIZAWA, *Struct. Eng./Earthq. Eng. JSCE* 7 (1990) 123-131.
- [21] P. C. PARIS Y F. ERDOGAN, *J. Basic Eng.* 85 (1963) 528-538.
- [22] G. C. SIH, *Int. J. Fract.* 10 (1974) 305-321.
- [23] G. C. SIH Y B. M. BARTHELEMY, *Eng. Fract. Mech.* 13 (1980) 439-451.
- [24] D. H. CHOI Y H. Y. CHOI, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 44 (2005) 17-27.
- [25] E. S. PUCHI-CABRERA, G. MESMACQUE, M. VODA Y F. ROUDET, *Proc. Internat. Institute of Welding*, XIII-2001-03, Bucharest, Romania, 2003.