

## RESISTENCIA A LA CORROSIÓN LOCALIZADA DE JUNTAS SOLDADAS EN UN ACERO INOXIDABLE DUPLEX SAF 2205

JOSÉ B. LEÓN, RAFAEL ARIAS, ABBY SÁNCHEZ, MARIBEL SUÁREZ, AMADO QUINTERO

Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales,  
Apartado Postal 47885, Los Chaguaramos, Caracas 1045, Venezuela.

Recibido: febrero de 2008

Recibido en forma final revisado: mayo de 2008

### RESUMEN

La corrosión por picadura es uno de los mecanismos de falla más frecuentes que se presentan en la industria química, petrolera y petroquímica. El hecho de que metales o aleaciones metálicas estén expuestos a ambientes agresivos inducen a fenómenos de corrosión como la «corrosión por picadura». El conocimiento de cómo se originan y la detección temprana de este mecanismo se traducen en ahorros económicos considerables debido a que se evitaría la interrupción momentánea de operaciones de una actividad dentro de un complejo industrial. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la resistencia a la corrosión localizada de juntas soldadas de un acero inoxidable duplex SAF 2205 en una solución salina que emule el ambiente marino. En el desarrollo de la investigación se utilizaron dos procesos tecnológicos de soldadura: Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) y Plasma Arc Welding (PAW). Los resultados obtenidos indican que el acero inoxidable duplex SAF 2205 presenta una resistencia a la corrosión por picadura elevada, comparado con otros aceros comerciales de características similares, siendo la técnica por soldadura GTAW la que presentó mejor comportamiento.

*Palabras clave:* Acero inoxidable dúplex 2205, Corrosión localizada, Potencial de picadura (Epic), Potencial de pasivación (Epp), Metal base (MB), Zona afectada por el calor (ZAC), Zona de fusión (ZF).

## LOCALISED CORROSION RESISTANCE OF WELDED JOINTS IN DUPLEX STAINLESS STEEL SAF 2205

### ABSTRACT

Pitting corrosion is one of the failure mechanisms which occur most frequently in the chemical, oil and petrochemical industries. This failure may occur when metals or alloys are exposed to an aggressive environment. Knowledge as to how pitting appears and its early detection could lead to considerable savings since it would avoid any shutdowns to operations in industrial plants. The aim of this study was to evaluate the pitting corrosion susceptibility of duplex stainless steel (SAF 2205) welded joints when submitted to a saline solution similar to a marine environment. Two welding process were used in this work: Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and Plasma Arc Welding (PAW). Results show that the Duplex Stainless Steel SAF 2205 has a very high pitting corrosion resistance compared to other similar commercial alloys and the GTAW welding process performs better.

*Keywords:* Duplex Stainless Steel SAF 2205, Localized corrosion, Pitting potential (Epic), Passivation potential.

### INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidables duplex son aleaciones que presentan un alto contenido de cromo y molibdeno. Su característica principal se evidencia en la microestructura, la cual presenta dos fases en proporciones similares como son la ferrita y la

austenita, lo que conduce a la obtención de un material con excelentes propiedades mecánicas y resistente a la corrosión (Nilsson, 1991). En la actualidad estos tipos de acero son ampliamente utilizados en la industria petroquímica en medios con altas concentraciones de sulfuros y cloruros (I.M.O.A, 2001). Una de las motivaciones de desarrollar este

estudio fue la poca información especializada existente referente a la influencia de los cloruros y la susceptibilidad a la corrosión localizada en este tipo de aleación soldada.

El objetivo de este trabajo de investigación fue evaluar el comportamiento electroquímico de las juntas soldadas utilizando dos procesos de soldadura diferentes, tomando como parámetros de estudio la corrosión localizada y la evolución microestructural de las diferentes zonas que conforman una junta.

## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

### Materiales

Se empleó como material de trabajo placas de acero inoxidable dúplex SAF 2205 de 40 x 20 x 0,6 cm, soldadas mediante las técnicas de PAW y GTAW. En esta última se empleó como material de aporte un electrodo de acero inoxidable ER 2209 (tabla 1).

**Tabla 1.** Composición química del acero inoxidable duplex SAF 2205 y del material de aporte ER 2209.

Elemento	M. Base SAF 2205	M. Aporte ER 2209
% C	0,024	0,014
% Si	0,420	0,48
% Mn	1,93	1,60
% P	0,025	0,015
% S	0,0003	0,0005
% Cr	22,66	22,93
% Ni	5,49	8,60
% Mo	2,83	3,19
% N	0,18	0,157

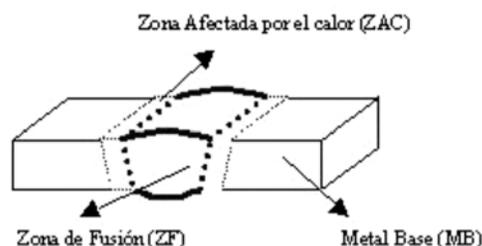
Las muestras de estudio, soldadas mediante las técnicas de PAW y GTAW, provienen de dos trabajos previos realizados por Quintero (2002) & Gil (2002), respectivamente. Ambas técnicas aplicadas consisten en soldaduras al arco con protección gaseosa (tabla 2), enfriadas en aire a presión.

**Tabla 2.** Composición del gas empleado en las soldaduras (Quintero, 2002 & Davison, 1999).

Elemento	% en volumen
Argón	99,989
O <sub>2</sub>	20 ppm
N <sub>2</sub>	80 ppm
Humedad	20 ppm

### Preparación de la muestra

Se realizaron diferentes cortes a los cupones de soldadura para la obtención de las probetas de estudio (figura 1). Estos cortes permitieron discriminar en el cupón las diferentes zonas de estudio: la zona afectada por el calor (ZAC), la zona de fusión (ZF) y el metal base (MB).



**Figura 1.** Esquema del cupón y del corte de las zonas para los ensayos de Polarización Cíclica.

La siguiente etapa consistió en realizar cortes de precisión en las zonas de estudio de manera separada. Para ello, se implementó un dispositivo que permitió la inclinación de la muestra en un determinado ángulo y con la ayuda de una cortadora de disco diamante se obtuvo la sección de interés para el estudio. Finalmente las muestras fueron embutidas utilizando «lucita» como resina termoendurecedora y fueron pulidas empleando el método convencional de pulido metalográfico.

### Observación microestructural

La microestructura del metal base y cada una de las zonas de los cordones (ZAC, ZF y MB) soldados mediante las técnicas de PAW y GTAW, fueron examinadas empleando un microscopio óptico digital Olympus modelo BX60 utilizado en campo claro y campo oscuro.

### Ensayos electroquímicos

Para evaluar el comportamiento electroquímico del material estudiado se empleó un montaje potencioestático de cuatro electrodos en una celda de vidrio. Se utilizó como electrodo de trabajo cada una de las zonas extraídas del cupón de soldadura y como contraelectrodos se emplearon electrodos de grafito conectados en serie. Como solución de trabajo se empleó una solución salina al 5% como sustancia emuladora de un medio corrosivo típico. Se utilizó la norma ASTM G61 (1998) y los trabajos de González (1989); Liening (1986) y Silverman (2000), como metodologías para la realización de las mediciones electroquímicas, utilizando un potencioestato modelo EG & G 273, el cual permitió la obtención de curvas potenciodinámicas de polarización cíclica tanto del metal

base como de la zona afectada por el calor y la zona de fusión en ambas técnicas de soldadura.

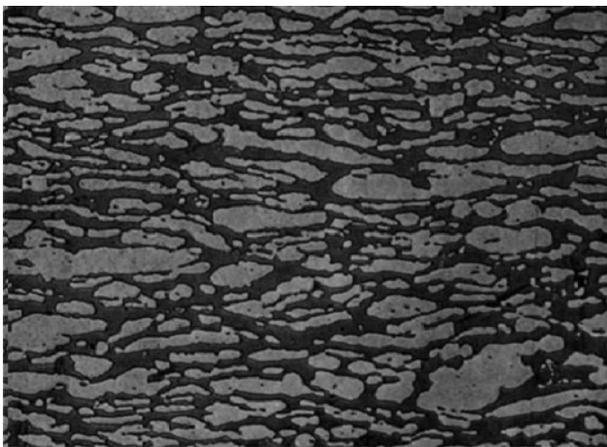
El procedimiento llevado a cabo en cada ensayo se inició con un proceso de desaireado de la celda por un periodo de tiempo de 30 minutos. Seguidamente se dejó estabilizar el sistema durante 900s y se procedió a realizar el ensayo mediante un barrido de potencial eléctrico entre -100 mV a 1500 mV entre la muestra estudiada y el electrodo de referencia a una velocidad de 1,67 mV/seg. Luego de obtener la curva potenciodinámica, el voltaje fue revertido (potencial de reversa) en la dirección catódica.

Por otra parte mediante el estudio de la curva de histéresis cíclica obtenida, se verificaron la estabilidad de la capa pasiva y la sensibilidad de las piezas a la corrosión localizada y finalmente se determinaron los potenciales de picadura.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Microestructura

A partir de los resultados del análisis microestructural del metal base (figura 2), se pudo observar una microestructura compuesta de islas de austenita (fase más clara) sin forma regular en una matriz continua de ferrita (fase más oscura).



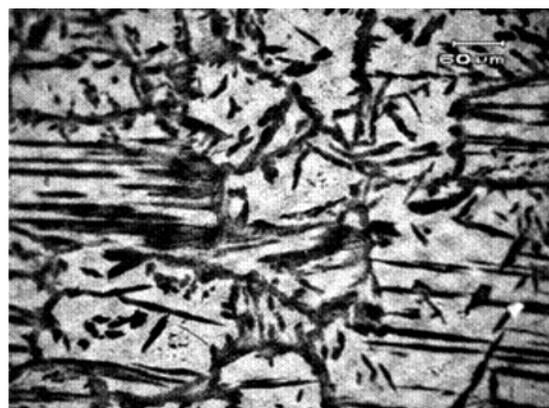
**Figura 2.** Fotomicrografía del metal base en la dirección transversal a la laminación a 1000 X.

En la muestra analizada, proveniente del proceso de soldadura mediante la técnica de PAW, se pudo observar en la zona afectada por el calor (figura 3a) la combinación de granos refinados bien definidos con estructura ramificada, la cual es consecuencia del aporte calórico durante la soldadura. Este procedimiento induce la variación de fases en el metal base (SAF 2205) tanto en la etapa de calentamiento como en la etapa de enfriamiento de la misma (recristalización de granos libres, deformación, crecimiento

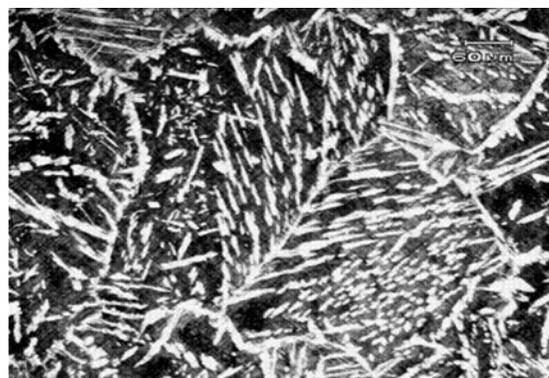
de grano, transformación de la ferrita primaria en austenita con diferentes morfologías, recocidos parciales, etc.).

Adicionalmente, se observó la presencia de brazos secundarios sobre las láminas de austenita las cuales crecieron a lo largo de todo su perímetro y pequeñas partículas aisladas de austenita, modificándose así la microestructura típica del material original.

En el caso de la zona de fusión (figura 3b) se pudo observar una microestructura desordenada con combinaciones de granos de diferentes tamaños. La formación de austenita con tendencia ramificada de brazos aciculares (morfología Widmanstatten) (fase clara), fue más marcada en esta zona de la soldadura. Finalmente, los brazos de austenita resultaron mucho más pronunciados y las partículas aisladas de austenita, con cierto alargamiento, se hallaron en mayor cantidad, en comparación con lo observado en la ZAC.



(a)



(b)

**Figura 3.** Fotomicrografías que muestran una vista longitudinal de la microestructura del cordón de PAW.

a) Zona afectada por el calor (ZAC) a 200X en campo oscuro. b) Zona de Fusión a 200X.

Los resultados correspondientes al análisis de la muestra soldada por la técnica GTAW indican que el efecto de la implementación de este procedimiento incide directamente

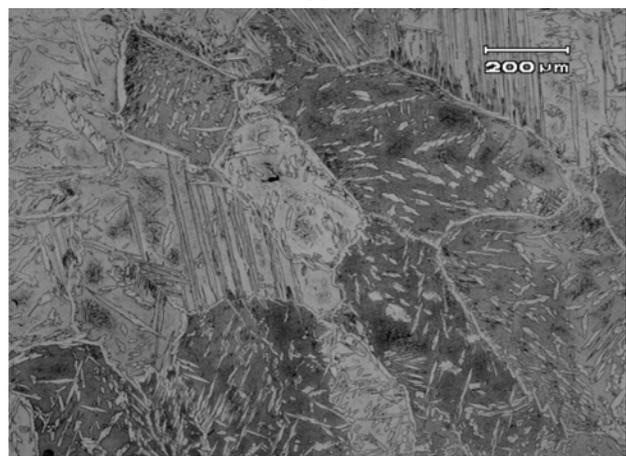
sobre la microestructura. En el caso específico de la zona de fusión se observa (figura 4) una variación microestructural, la cual puede ser explicada por el doble pase efectuado en la soldadura (pase de raíz y pase relleno). El pase de raíz presenta una microestructura más homogénea con un tamaño de grano más grande y la austenita cuenta con una morfología más redondeada. En cambio en el pase de relleno la austenita es del tipo Widmastatten y ramificada, típica de enfriamientos más bruscos. Por lo tanto la microestructura observada en el pase de raíz puede atribuirse a un tratamiento térmico local ocasionado por el pase de relleno. En la zona afectada por el calor se observa este mismo fenómeno (figura 5), en la cual la zona adyacente al pase de raíz cuenta con una microestructura más homogénea y más relajada que la zona adyacente al pase de relleno.

Por último, si se compara la soldadura del acero SAF 2205 en las variantes PAW y GTAW se destaca que la microestructura de esta última es mucho más homogénea. Esta diferencia puede ser atribuida a los parámetros de

soldadura de ambas técnicas (tabla 3) en la cual, en el caso de la GTAW, el aporte calórico es superior, lo que ocasiona un tamaño de grano más grande y por otra parte, la acción del metal de aporte (ER 2209) -rico en níquel- y el gas de protección (alto porcentaje en N<sub>2</sub>) favorecen la formación y la estabilidad de la austenita (tabla 4) (Gil, 2002).

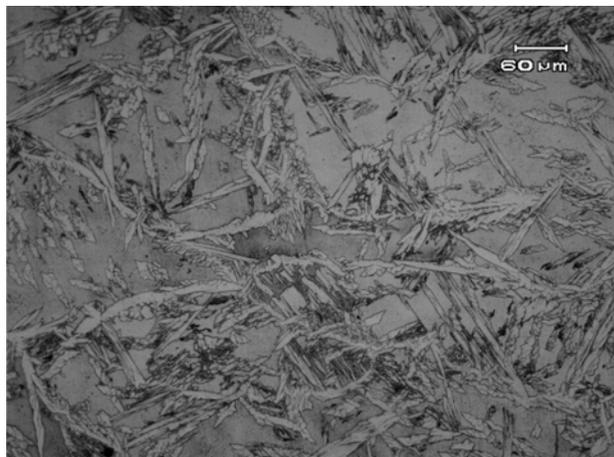


(a)



(b)

**Figura 4.** Fotomicrografías de la zona de fusión del cordón de GTAW a 100X: a) Zona superior del cordón (pase de relleno), b) Zona inferior (pase de raíz).



(a)



(b)

**Figura 5.** Fotomicrografías de la zona afectada por el calor de GTAW: a) ZAC superior del cordón (adyacente al pase de relleno) a 50X. b) Zona inferior (pase de raíz) a 200X.

**Tabla 3.** Condiciones de corriente, voltaje y calor aportados en las soldaduras (Quintero, 2002).

Cordón de soldadura	Corriente (A)	Voltaje (V)	Calor Aportado (KJ/mm)
Pase de raíz GTAW	125	20	3,62
Pase de relleno GTAW	125	20	4,25
PAW	210		1,481

**Tabla 4.** Valores promedios de fracción volumétrica de la fase austenita (Quintero, 2002).

	% AUSTENITA
<b>METAL BASE</b>	45,62 ± 1.3
<b>GTAW</b>	
Pase de raíz	54,98 ± 1.90
Pase de relleno	55,53 ± 2.63
ZAC (adyacente al pase de raíz)	52,74 ± 0.10
ZAC (adyacente al pase de relleno)	50,56 ± 0.59
<b>PAW</b>	
Pase del cordón	43,7 ± 1.2
ZAC	43 ± 1

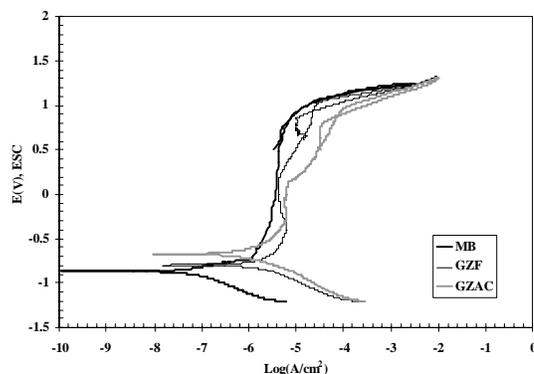
### Ensayos Electroquímicos

Se construyeron las curvas de polarización cíclica para cada caso de soldadura estudiado. En ellas, se midieron la resistencia a la corrosión en un medio de solución salina al 5% para el metal base, la zona de fusión y la zona afectada por el calor.

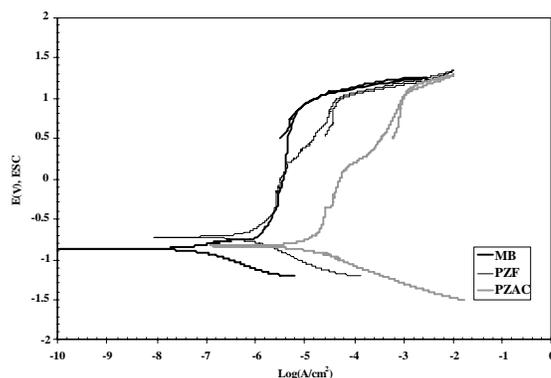
La figura 6a muestra el comportamiento del acero SAF 2205 soldado aplicando la técnica GTAW. En el caso específico del metal base, no se observa en el gráfico la presencia de un bucle de histéresis, lo cual indica que el material no sufre un ataque por picadura. En cambio se observa un desplazamiento del comportamiento de las curvas que indica densidades de corriente superiores, atribuible a un aumento de la velocidad de corrosión. En la zona afectada por el calor se observó un desplazamiento más pronunciado debido a la morfología microestructural presente. Sin embargo, los valores del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), potencial de pasivación ( $E_{pp}$ ) y potencial de picadura ( $E_{pic}$ ) alcanzan valores más nobles que el metal base. El ancho de banda de la región pasiva se encuentra entre -450 mV y 1000 mV tanto para la ZAC como para la ZF.

Se destaca la presencia de una bucle de histéresis (figura 6a) en la ZAC y la ZF de la soldadura GTAW, lo que sugiere la presencia de picaduras en la superficie. El análisis microestructural reveló la ausencia de picaduras lo cual puede ser atribuido a las diferencias apreciables entre  $E_{corr}$ - $E_{pic}$  y una zona de crecimiento  $E_{pic}$ - $E_{rep}$  pequeña, con valores de 97 mV para el caso ZF y 96 mV para la ZAC. Hay que destacar que la capacidad de regeneración de la capa pasiva es elevada.

Las curvas de polarización cíclica correspondientes al metal base, la zona de fusión y la zona afectada por el calor de la soldadura mediante la técnica PAW son presentadas en la



(a)



(b)

**Figura 6.** Curvas de polarización cíclica del metal base SAF 2205, ZF y ZAC de las muestras soldadas en una solución de NaCl al 5%:  
a) Técnica de GTAW.  
b) Técnica PAW.

figura 6b. Se observó un comportamiento similar referente al desplazamiento de las curvas de los casos ZAC y ZF pero con valores de densidad de corriente superiores si se compara al análisis anterior. De manera general los resultados obtenidos muestran que el medio se comportó de manera más agresiva. Se observó una diferencia apreciable en la región pasiva para ambas zonas si se compara con el metal base.

La curva de la ZF no presentó bucle de histéresis, sin embargo la curva de polarización cíclica perteneciente a la ZAC, cuenta con una zona de crecimiento de picaduras  $E_{pic}$ - $E_{rep}$  = 0,152 mV mucho mayor que la condición de GTAW, lo que implica una tendencia al ataque localizado y que en efecto de acuerdo al análisis microestructural por microscopía óptica se evidenció la presencia de picaduras en esta zona. De esta manera, de acuerdo a todos los resultados analizados de las curvas de polarización cíclica y las evidencias microestructurales, la técnica GTAW presentó un mejor comportamiento electroquímico en comparación

con la técnica de PAW, lo cual se puede resumir en dos puntos:

1. La curva de la ZF no presentó bucle de histéresis, por otra parte la curva de polarización cíclica perteneciente a la ZAC, cuenta con una zona de crecimiento de picaduras Epic- Erep= 0,152 mV mucho mayor que la condición de GTAW, lo que implica una tendencia al ataque localizado y que en efecto, de acuerdo a un análisis microestructural mediante microscopía óptica, se evidenció la presencia de picaduras en esta zona. La técnica GTAW recibió mayor aporte calórico (tabla 3), lo que implica una tasa de enfriamiento más lenta en comparación con la técnica PAW, favoreciendo así la formación de mayor cantidad de austenita posible (tabla 4), tanto en la zona de fusión (ZF) como en la zona afectada por el calor (ZAC).
2. Un doble pase (pase de raíz y pase de relleno), que con un aporte rico en níquel y con un contenido de nitrógeno similar al del metal base, favoreció la formación y estabilidad de la fase austenita ( $\bar{a}$ ) en el cordón (Davison *et al.* 1991). Por otra parte el pase de relleno generó un tratamiento térmico post-soldadura que libera tensiones residuales en la junta por efecto de la velocidad de enfriamiento, tomado en cuenta la morfología de las fases mencionadas anteriormente. Sin embargo, existe la posibilidad de que la zona afectada por el calor crezca y genere segregaciones y precipitados que desfavorezcan la resistencia a la corrosión de la pieza soldada.

## CONCLUSIONES

La junta soldada GTAW presentó una mayor resistencia a la corrosión localizada (picadura) y generalizada que la junta soldada PAW.

El proceso tecnológico GTAW modifica apreciablemente la fracción volumétrica y la microestructura de la fase austenita en las zonas que componen la junta (ZF y ZAC).

Una baja velocidad de enfriamiento acompañada de un material de aporte (ER 2209) rico en Níquel, mejora la resistencia a la corrosión localizada.

La resistencia a la corrosión localizada (picadura) y generalizada del acero inoxidable duplex SAF 2205 después de soldado es significativamente superior a la del acero inoxidable AISI/SAE 316L.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la

Universidad Central de Venezuela CDCH-UCV, por el financiamiento para la divulgación de este trabajo en el Congreso Latinoamericano de Corrosión Latincorr 2006.

## REFERENCIAS

- CHARLES, J. (1991). *Proc. Conf. Duplex Stainless Steel 91*. Les Ulis, France, Les Editions de Physique. p. 3.
- DAVISON, R. (1999). *ASTM update for stainless steel*. pp.38, 69.
- FOSTERVALL, H. (1998). *Plasma arc welding of duplex stainless steels*. p.8
- GIL, R. A. (2002). *Soldadura del acero inoxidable dúplex saf 2205 mediante el proceso de soldadura GTAW y caracterización de la junta*. Trabajo Especial de Grado. FI-U.C.V. Caracas, pp.21-27, 71-78.
- GONZÁLEZ, J. (1989). *Control de la corrosión Estudio y medida por técnicas electroquímicas*. CENIM-CSIC. Madrid. pp. 150-165.
- GUERRA, P. (1999). *Aceros Dúplex*. FASTPACK. Piping products. Boletín técnico. pp. 1, 4-5.
- HICKEN, G. K., CAMPBELL, R. D., MADIGAN R. B. (2002). *Soldadura por Arco de Tungsteno y Gas*. pp 74-88. 1998.
- HILKES, J., BEKKERS, K. (1995). *Welding Duplex Stainless Steel*. Welding Journal, Vol 64, N° 11 pp: 8-20.
- I.M.O.A, (2001). *Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steel*. N° 10. Revised Edition. pp. 4 –5, 8–11.
- LIENING. (1986). *Electroquimical corrosion testing techniques*. Process Industries Corrosion. NACE. B. J. Moniz. pp. 85-102.
- NILSSONN, J.O. (1991). *Super Duplex Stainless Steel*. AB Sandvik. Vol 8. Sweden, pp. 1-7, 11-16.
- QUINTERO, M. (2002). *Estudio y caracterización de un acero inoxidable duplex saf 2205 soldado por arco de plasma (PAW) a través de la técnica «ojo de cerradura»*. Trabajo Especial de Grado. FI-U.C.V. Caracas, pp. 9-18, 50-52, 63-65.
- SALOMON, H.D., DEVINE, T. M. (1979). *Influence of Microstructure on the mechanical properties and*

*localized corrosion of Duplex Stainless Steel.*  
Philadelphia, Pa ASTM. pp. 430, 672.

SILVERMAN, D. (2000). *Practical Corrosion Prediction using Electroquimical Techniques.* Ulhigs Corrosion Hanbook. Second Edition, Edited by R. Winston Revie. Capt. 68. pp. 1179-1198.

STANDARD TEST METHOD FOR CONDUCTING CYCLIC POTENTIODYNAMIC POLARIZATION MEASUREMENTS FOR LOCALIZED CORROSION SUSCEPTIBILITY OF IRON, NICKEL OR COBALT BASED ALLOYS. (1998). G61-86. Anual Book of ASTM Standars, Vol 11.01 and Vol 03.02.

URQUIDI, M., MACDONALD, D.(1989). *Theorical Analizis of de Effectos of alloying elements on distribution functions of passivity breakdown.* Les Ulis, France, Les Editions de Physique. pp.25-37.

WELDING HANDBOOK AWS (1991). Welding Process, Vol 2, 8va Edicion, pp.35-40.