

Evaluation of resistance to corrosion by pitting of stainless steel duplex SAF 2304

Laura Sáenz^{*,a}, Jesús García^b y Omar Guzmán^b

^aUniversidad de las Fuerzas Armadas ESPE Latacunga- Ecuador.

^bEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.- It was evaluated the corrosion resistance of a duplex SAF 2304 stainless steel. Pitting corrosion tests were carried out under ASTM G48-03 at a temperature of 50 °C for 72 hours in ferric chloride at 6 % concentration and electrochemical polarization tests under ASTM G5-87 at a temperature of 22 °C for 0.5hrs in sodium chloride at 3.5 % concentration. 9 cylinders samples of stainless steel SAF 2304 duplex were used, 6 samples for the pitting corrosion test and 3 samples for the electrochemical polarization test. Weight loss analysis, macroscopy, optical microscopy and Vickers Microhardness were performed. In the electrochemical test the value of the anodic slope turned out to be very high, in the sting tests where the formation of passive films on the surfaces of the samples tested, a process of localized corrosion could be appreciated with the presence of large amount of pitting. It was observed a localized deterioration in the interphases austenite-ferrite phases, with presence of pitting. The corrosion rate presented a variation similar to that obtained for the weight loss, which demonstrated the heterogeneity of the material.

Keywords: duplex stainless steel; corrosion stress; pitting.

Evaluación de la resistencia a la corrosión por picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304

Resumen.- Se evaluó la resistencia a la corrosión por picadura de un acero inoxidable dúplex SAF 2304. Se realizaron ensayos de corrosión por picadura bajo la norma ASTM G48-03, a una temperatura de 50 °C, durante 72 horas en cloruro férrico al 6 % de concentración, y ensayos electroquímicos de polarización bajo la norma ASTM G5-87, a una temperatura de 22 °C, durante 0,5hrs en cloruro de sodio al 3,5 % de concentración. Se utilizaron 9 probetas de acero inoxidable dúplex SAF 2304, 6 para el ensayo de corrosión por picadura, y 3 para el ensayo electroquímico de polarización. Se realizó análisis por pérdida de peso, macroscopía, microscopía óptica y Microdureza Vickers. En el ensayo electroquímico el valor de la pendiente anódica resultó ser muy alto, en los ensayos de picadura donde se observó la formación de películas pasivas sobre las superficies de las muestras ensayadas, se pudo apreciar un proceso de corrosión localizada con presencia de gran cantidad de picaduras. Se observó un deterioro localizado en las intercaras fases austenita-ferrita, con presencia de picaduras. La velocidad de corrosión presentó una variación similar a la obtenida para la pérdida de peso, lo que demostró la heterogeneidad del material.

Palabras claves: acero inoxidable dúplex; resistencia a la corrosión; picaduras.

Recibido: marzo 2018

Aceptado: mayo 2018

1. Introducción

Los aceros inoxidables dúplex son aleaciones de uso creciente en la actualidad para industrias químicas y derivados del petróleo, así como en aplicaciones específicas de generación de energía,

plantas offshore, industria de la pulpa y el papel, etc. Las propiedades mecánicas óptimas de estas aleaciones son generadas por una estructura bifásica o dúplex constituido por una fase ferrítica y una austenítica, sus ventajas frente a otros aceros inoxidables y aceros estructurales se refieren a mejores propiedades mecánicas, y de resistencia a la corrosión [1, 2, 3].

Sin embargo, los aceros inoxidables son susceptibles, en determinadas circunstancias, a ciertas formas de ataque, de entre las cuales destaca la corrosión por picaduras. La corrosión por

*Autor para correspondencia:

Correo-e: lasaenz@espe.edu.ec (Laura Sáenz)

picaduras es una forma de ataque localizado. Es un tipo de corrosión destructivo, que puede causar la destrucción de equipos mediante perforación, con muy pequeñas pérdidas de peso [4, 5, 6, 7].

Actualmente existen ciertas variedades de aceros convencionales, que le permite al sector industrial (alimenticio o petroquímico) priorizar entre la resistencia a la corrosión o las propiedades a la resistencia mecánica, tenacidad y dureza. Una alternativa son los aceros inoxidable ferríticos y los austeníticos, que de igual forma se oxidan, pero en vez de óxido común, lo que se forma en la superficie es una tenue película de óxido de cromo muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. En el desarrollo de nuevas aleaciones ha surgido dentro de la familia de los aceros inoxidable los dúplex, considerados como aleaciones pioneras en las aplicaciones que demanden gran resistencia mecánica en medios corrosivos que ofrece soluciones donde los aceros al carbono y austeníticos han fallado, para este estudio se tomara en cuenta la serie 2304, que es una aleación con bajo contenido de níquel, no contiene Molibdeno y que forman una mezcla de cantidades aproximadamente iguales de austenita y ferrita [Aceros dúplex]. Una de las motivaciones del 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. El objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento de un acero inoxidable dúplex SAF 2304 frente a la corrosión por picadura en un medio clorurado.

2. Materiales y métodos

2.1. Material

Se utilizó un acero inoxidable dúplex SAF 2304 de composición química mostrada en la Tabla 1.

Para realizar el corte del material se utilizó una máquina de electroerosión de hilo (inyección de agua).

2.2. Ensayo de corrosión

Se realizaron dos tipos de ensayos, ensayo por picadura ASTM G48-03 [9] método A y ensayo electroquímico de polarización normalizado

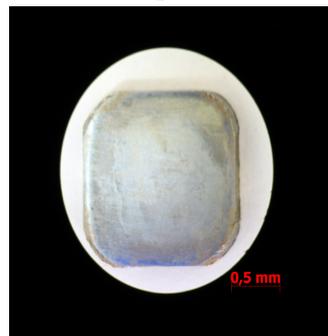
Tabla 1: Composición química del acero dúplex SAF 2304, (% peso) [8].

%C	%Si	%Mn	%P	%S
0,03	1,00	2,50	0,04	0,03
%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu
23,00	4,25	0,33	0,13	0,33

ASTM G5-87 [10]. En la Figura 1 se muestran las dimensiones de las probetas utilizadas. Las muestras de acero dúplex SAF 2304, fueron divididas en dos grupos de probetas “A” y “B”, donde el primer grupo de muestras pertenecientes a las probetas tipo “A” fueron sometidas a un ensayo de corrosión por picadura a una temperatura de 50°C, durante 72hrs en cloruro férrico al 6% de concentración, y el segundo grupo de muestras pertenecientes a las probetas tipo “B” fueron sometida a un ensayo electroquímico de polarización a una temperatura de 22°C, durante 0,5 hrs en cloruro de sodio al 3,5% de concentración.



(a) Probeta A usada para el ensayo de picadura, de 20x50 mm, con espesor de 10 mm



(b) probeta B usada para el ensayo electroquímico de polarización de 14 x 14 mm con un espesor 2,5 mm [8].

Figura 1: Diagrama esquemático de las probetas del ensayo.

2.3. Evaluación de la pérdida de peso y la velocidad de corrosión para el acero expuesto a cloruro férrico al 6 %

Se utilizó una balanza analítica marca, Ohaus con capacidad de 201 g. y precisión 0,0001 g.

Para evaluar la pérdida de peso, se utilizó la ecuación (1).

$$W = W_{inicial} - W_{final} \quad (1)$$

Donde, W es la Pérdida de peso en gramos (g), $W_{inicial}$ es el peso inicial en gramos (g) y W_{final} es el peso final en gramos (g).

Para el cálculo de la velocidad de corrosión se utilizó la ecuación (2) de acuerdo a la norma ASTM G31 – 72(2004) [11] que viene expresada:

$$V_c = \frac{KW}{Adt} \quad (2)$$

Donde,

K : Constante que viene expresada en función del sistema métrico de trabajo, y cuyo valor depende de la unidad utilizada para expresar la velocidad de corrosión.

V_c : Velocidad de corrosión expresada en milipulgadas por año (mpy).

T : Tiempo de exposición en horas (h).

A : Área de la superficie de exposición en centímetros cuadrados (cm²).

W : Pérdida de peso en gramos (g).

D : Densidad del material de la muestra en gramo/cm³ (g/cm³).

$$\delta = \sqrt{\frac{(x_i - x)^2}{n}} \quad (3)$$

Donde δ es la desviación estándar, x_i es la pérdida de peso de la muestra (g), n es la cantidad de muestras y x es el promedio de la pérdida de peso.

2.4. Microscopia óptica

Las muestras fueron preparadas por las técnicas metalográficas convencionales y el reactivo de ataque utilizado fue: 15 ml HCl, 50 ml H₂O y 1 g de bisulfito de sodio. La microestructura de las muestras se determinó utilizando un microscopio óptico marca Unión modelo MC 86267.

2.5. Microdureza

Para la realización de los ensayos se utilizó un Microdurómetro marca Buehler, modelo Indentamet 110. Se utilizó una carga de 25 g. durante por 5seg., se realizaron un número de 5 indentaciones por muestra, basado en la norma ASTM E384-11 [12].

2.6. Evaluación de la resistencia a la polarización para el acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

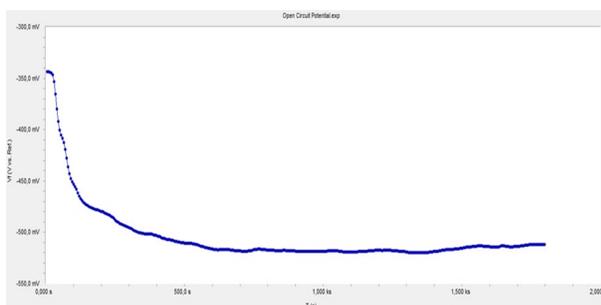
Con el propósito de obtener una medición cuantitativa de la resistencia a la polarización de las muestras ensayadas, y así poder determinar la velocidad de corrosión del material en estudio, se traza la curva de resistencia a la polarización, utilizando el método de polarización lineal, en la cual se extrapola la curva para obtener la pendiente de la resistencia a la polarización. La curva se grafica a partir del potencial de equilibrio [13] (la muestra se polariza entre ± 20 mV con respecto al potencial de equilibrio, con una velocidad de barrido de 2 mV s⁻¹), que se obtiene luego de polarizar la muestra en el medio de exposición, hasta alcanzar la estabilización del potencial. En la Figura 2 se puede observar la estabilización del potencial de la muestra al medio de exposición.

Mediante la ecuación (4) y sustituyendo el valor de alguna de las pendientes de Tafel en la ecuación (5), se obtiene el punto de intersección de ambas pendientes, que representará el valor de la corriente de corrosión.

$$p = \frac{\eta}{i_t} = R_p \quad (4)$$

Donde, p es la pendiente y está expresada en $\frac{\Omega}{\text{cm}^2}$.

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2,3R_p(b_a + b_c)} \quad (5)$$



Polarización de la muestra desde -300 mV.
 Barrido de potencial constante: 2 mVs^{-1}
 Comportamiento de la muestra: catódico
 Tiempo de estabilización: 667 s – 1800 s
 Potencial de equilibrio: -521,77 mV.

Figura 2: Potencial de equilibrio (o estabilización) de la muestra de acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

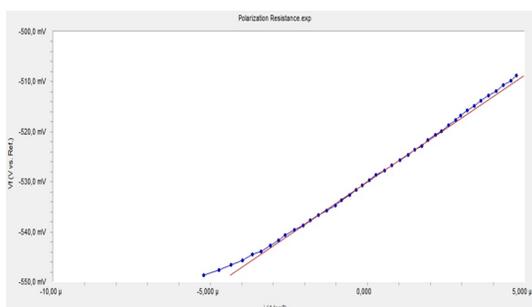


Figura 3: Curva de resistencia a la polarización del acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

Esto se realiza a través de la interfaz gráfica del software asociado al equipo utilizado para el desarrollo del ensayo. basado en los datos registrados por el procesador de cómputos del potenciostato Gamry reference 600, se grafica la curva de polarización lineal, de la cual se obtiene el valor de corriente de corrosión, donde el valor obtenido de la corriente de corrosión es igual a $i_{corr} = 60,10 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ (Figura 3).

3. Resultados y discusión

3.1. Pérdidas de peso

Las Tablas 2 y 3 presentan los pesos iniciales y finales de las muestras evaluadas, la pérdida de peso y las velocidades de corrosión obtenidas para cada uno de los ensayos realizados. También se muestran los valores de desviación estándar de la

pérdida de peso y velocidad de corrosión para cada uno de los ensayos.

Tabla 2: Pérdida de peso promedio para el acero dúplex SAF 2304, expuesto a 50 °C por 72 horas.

Muestra	Peso Inicial Winicial (g)	Peso Final Wfinal (g)	Pérdida de Peso W (g)
1	78,9912	77,5982	1,393
2	79,5047	78,0541	1,4506
3	79,3073	77,9260	1,3813
4	79,8003	78,2286	1,5717
5	79,9270	78,2600	1,6670
6	79,8748	78,4648	1,4100
Desviación Estándar de la pérdida de peso			0,1052
Pérdida de peso promedio W(g)			1,4789

En la Tabla 2 se observa que la probeta 5 es la que presenta la mayor pérdida de peso del grupo de muestras ensayadas, mientras que la probeta 3 es la que presentó menor pérdida de peso en este estudio, con un rango de 0,2857 g, esto posiblemente debido a discrepancias en la homogeneidad del material durante su proceso de solidificación y laminación. La pérdida de peso 1,4789 g y su desviación estándar de δ , es 0,1052.

3.2. Velocidad de Corrosión

Considerando que la velocidad de corrosión es una función de la pérdida de peso del material, se verifica mediante la Tabla 3 que la probeta 5 tiene la mayor velocidad de corrosión del grupo de muestras ensayadas, mientras que la probeta 3 es la que tiene menor velocidad de corrosión de todo el grupo del estudio. La velocidad de corrosión promedio del grupo de muestras es de 267,2667 mpy y su desviación estándar es de 18,9667.

En la Figura 4 se muestra la curva de comportamiento de la pérdida de peso para el acero dúplex SAF 2304, sometido a 50°C, se observa que el mayor rango de diferencia en los valores de pérdida de peso obtenidos se presenta entre las probetas 5 y 3, en donde la media entre ambos valores es de 0,2857 g. Al comparar los resultados de la velocidad de corrosión de cada una de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304, se obtuvo un resultado similar al de la pérdida de peso, en el cual el rango obtenido a partir de los valores

Tabla 3: Velocidad de corrosión promedio y desviación estándar para SAF 2304, expuesto a 50 °C.

Muestra	Velocidad de Corrosión (mpy)	Velocidad de Corrosión Promedio (mpy)	Desviación estándar
1	251,6890	267,26667	18,9667
2	262,0962		
3	249,8822		
4	283,9767		
5	301,1956		
6	254,7606		

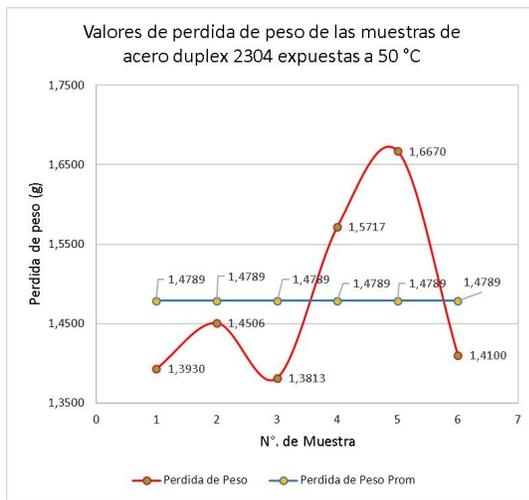


Figura 4: Curva de pérdida de peso de las muestras de acero dúplex 2304, expuestas a 50 °C

máximo y mínimo de las muestras en estudio se presenta entre las probetas 5 y 3, y es igual a 51,3134 mpy, y en donde a partir del coeficiente de variación se determinó que la variación en el caso de la pérdida de peso es mayor al obtenido para la velocidad de corrosión, esto concluye que la dispersión en los valores de la pérdida de peso tienen una leve diferencia a los obtenidos para la velocidad de corrosión, debido que el peso se obtuvo en forma experimental y la velocidad de corrosión se calculó por la ecuación [2].

Como se pudo observar en las Figuras 4 y 5 existe una diferencia considerable entre las muestras 3 y 5 con respecto al valor promedio, esto se debe a discrepancias en las propiedades del material, posteriormente será evaluada la homogeneidad de

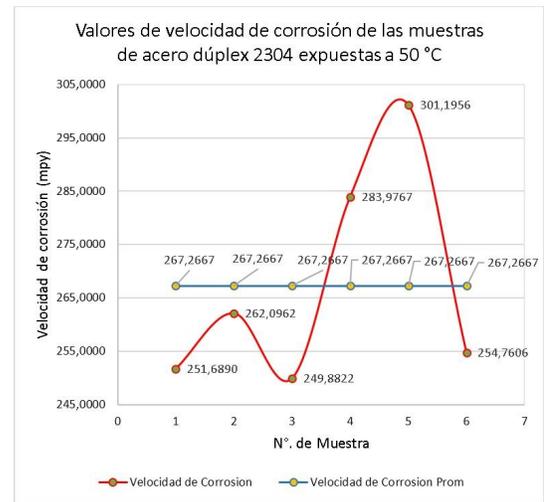


Figura 5: Curva de velocidad de corrosión de las muestras de acero dúplex 2304, expuestas a 50 °C

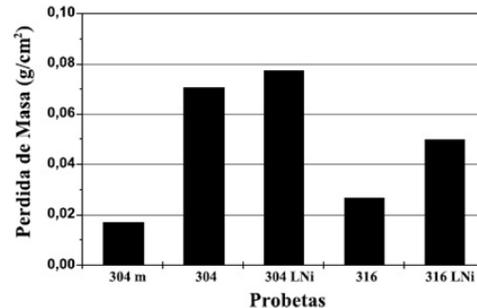


Figura 6: Pérdida de masa de un grupo de muestras de acero inoxidable sometidas a un medio corrosivo de cloruro férrico al 6,5 %, expuestas a a 50 °C

la microestructura.

Los resultados del presente estudio son comparados con la investigación realizada por Otero [1], en donde se evaluó la pérdida de masa mediante un ensayo de picadura utilizando la norma ASTM G 48-00 [9] para un grupo de muestras de acero inoxidable, de las cuales se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6.

Se puede observar como la relación de la velocidad de corrosión del acero inoxidable dúplex SAF 2304 con la de los otros aceros inoxidables estudiados por Otero [1], posee un resultado análogo a lo obtenido en el caso de la pérdida de peso, en donde el valor más aproximado de la velocidad de corrosión que se obtuvo para el acero inoxidable dúplex SAF 2304 lo presentaba el acero

inoxidable 316 LNi. Esto le da cierta relevancia al contenido de níquel en el acero inoxidable, para la resistencia a la picadura en medios clorurados.

Tabla 4: Comparación entre los valores pérdida de masa y velocidad de corrosión del acero inoxidable dúplex 2304 con los aceros inoxidables estudiados por Otero [1].

Material	W (g/cm ²)	V _C (mpy)
Acero inoxidable dúplex SAF 2304 (%C= 0,03 ; %Mn = 2,5)	0,0440	267,2667
Acero inoxidable 304 M (%C=0,022 ; %Mn=0,18)	0,0166	100,0766
Acero inoxidable 304 (%C= 0,049 ; %Mn=0,22)	0,0700	420,3216
Acero inoxidable 304 LNi (%C= 0,0,081 ; %Mn =10,59)	0,0775	465,3561
Acero inoxidable 316 (%C= 0,021 ; %Mn =1,28)	0,0250	150,1149
Acero inoxidable 316 LNi (%C= 0,024 ; %Mn = 8,02)	0,0500	300,2297

W: Pérdida de masa

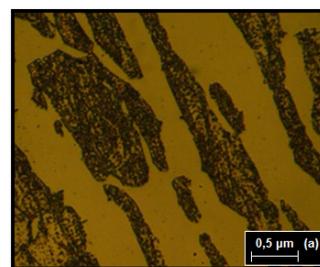
V_C: Velocidad de corrosión

En la Tabla 4, se observa como el acero inoxidable 304 (a pesar de tener alto contenido de níquel) muestra una mayor pérdida de peso y una rápida velocidad de corrosión, el cual lleva a analizar los demás porcentajes en peso de los aleantes presentes. En correlación a las Tablas 3 y 4, y además comparando a los materiales que tienen mayor pérdida de masa con su composición química en % de peso de los aleantes, se observa que tanto el Carbono (C) como el Manganeso (Mn) tienen altos valores para el 304 y el 304 LNi, siendo más determinante el Carbono por que el 316 LNi a pesar de tener un valor alto de contenido del Manganeso la pérdida de masa no es tan alta como la del 304 y 304 LNi.

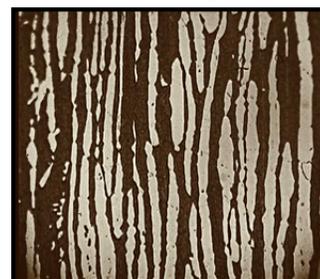
3.3. Evaluación Microestructural

3.3.1. Muestras Condición Original

En la Figura 7a, se muestra la microestructura del material original del acero dúplex SAF 2304, formada por ferrita (zonas oscuras) y austenita (zonas claras).



(a) Condición original 400x.



(b) Sección longitudinal sometido a 50°C 400x.



(c) Sección transversal sometido a 50°C 400x.

Figura 7: Microscopía óptica acero dúplex SAF 2304.

3.3.2. Muestras de acero inoxidable dúplex 2304 sometidas a 50°C

En las Figuras 7b y 7c se puede apreciar como las muestras de acero dúplex SAF 2304 (tanto en su sección longitudinal como transversal respectivamente), presentan intercaras fases austenita-ferrita bien definidas, con una posible precipitación de los carburos de cromo.

En la Figura 7c se puede observar además un proceso de deformación plástica en donde se ve claramente una distribución grosera o basta, en la microestructura de las fases austenita-ferrita, esto posiblemente debido a un descontrol durante la solidificación y laminación del material, hecho que a su vez incide en los resultados obtenidos para la pérdida de peso y velocidad de corrosión, en

donde se evidenció la presencia de heterogeneidad en el material, lo que explica la discrepancia en estos resultados al comparar las muestras 3 y 5 del ensayo.

3.4. Análisis Macroscópico de las muestras de aceros inoxidable dúplex SAF 2304

Se realizó un estudio de las muestras utilizando imágenes tomadas con el microscopio óptico con un aumento máximo de 10X.

3.4.1. Vista Transversal

En la Figura 8a se puede apreciar la formación de una capa de óxido, la cual presentó corrosión localizada con una mayor densidad de picaduras profundas que se presentaban hacia la zona del borde de la muestra, y con una gran pérdida de material en algunas áreas del borde como se observa en la Figura 8b. En la Figura 8a además podemos observar la formación de micro-hoyuelos en gran parte de la superficie de la muestra. En la Figura 9a se puede observar la formación de una película de óxido, con picaduras causadas por la corrosión localizada (figura 9b), con agujeros de gran profundidad y una significativa pérdida de material. En la Figura 9a también se aprecia la formación de ranuras profundas a lo largo de la superficie.

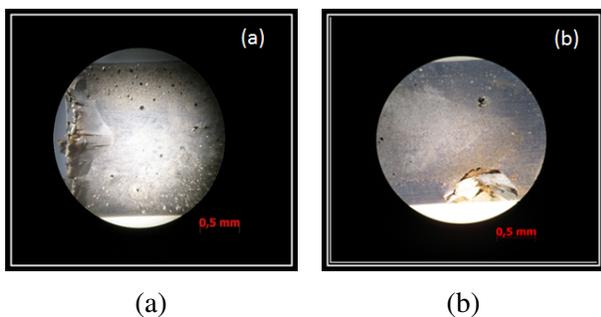


Figura 8: Imágenes macro (sección transversal) a un aumento de 10X de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a 50°C.

3.4.2. Vista longitudinal

En la Figura 8 se pueden observar un ataque generalizado en toda la superficie, con formación de la capa de óxido y picaduras de gran profundidad

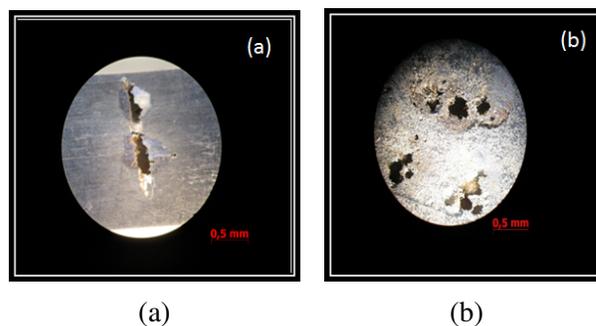


Figura 9: Imágenes (sección transversal) a un aumento de 10X de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a 50°C.

como las que se aprecian en la Figura 10a. En la Figura 10b se observan picaduras en el borde que coinciden con una ranura en la cara transversal.

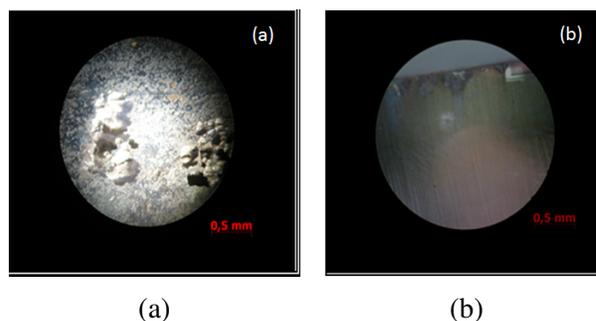


Figura 10: Imágenes (sección longitudinal) a un aumento de 10X de las muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a 50°C.

3.5. Índice equivalente de resistencia a la picadura, PRE (Pitting Resistance Equivalent)

Al calcular el índice PRE, ecuación (6) para el acero inoxidable dúplex SAF 2304, el cual es igual a 24, y se comparó con los resultados obtenidos por Otero [1] para los distintos tipos de aceros inoxidables usados durante el estudio, se aprecia en la Figura 11.

$$PRE = \%Cr + 3,3(\%Mo) + 16(\%N) \quad (6)$$

Donde,

PRE = índice de corrosión por picaduras.

%Cr = porcentaje en peso de Cromo.

%Mo = porcentaje en peso de Molibdeno.

%Ni = porcentaje en peso de Nitrógeno.

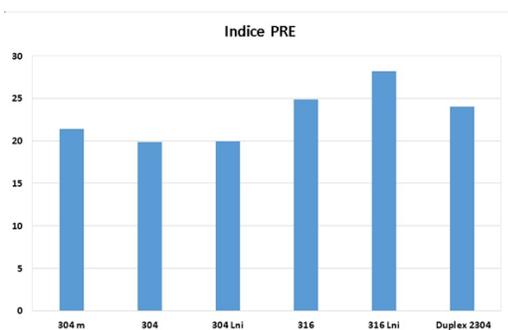


Figura 11: Comparativa del Índice equivalente de resistencia a la picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304, con los estudiados por Otero [1].

El índice *PRE* en este caso para el acero inoxidable dúplex SAF 2304 resulta ser similar a los aceros inoxidables 316 y 316 LNi, con valores de 24,9 y 28,156 respectivamente, esto demostró que aunque hay discrepancias en los resultados, por las significativas variaciones del contenido de molibdeno en algunos aceros (hecho que impacta de forma considerable el valor del *PRE*), se evidenció la influencia en el contenido de níquel para los aceros inoxidables en la resistencia a la corrosión por picadura en medios clorurados.

3.6. Microdureza Vickers (HV)

En la Tabla 5 se muestran los valores de microdureza Vickers para el acero dúplex SAF 2304 en su condición original y luego de ser expuesto al medio corrosivo respectivamente.

De los valores obtenidos en la Tabla 5 se puede observar que existe una disminución en la dureza del material acero inoxidable dúplex SAF 2304 para ambas fases (Ferrita y Austenita) luego de ser sometido al cloruro férrico al 6 % de concentración a 50 °C, y al comparar los valores máximos y mínimos obtenidos en los promedios de las muestras se puede observar una diferencia de hasta un 65 % para la fase Ferrita y de 70 % para la Austenita de disminución en la microdureza.

Tabla 5: Microdureza Vickers, HV con 25 g, 5 seg, para acero inoxidable Dúplex 2304.

Probeta	Microdureza Vickers promedio HV (Kg/mm ²)	
	Ferrita, α	Austenita, γ
Original	310,80	361,60
MLA	184,20	211,80
MTA	213,00	271,00
MLB	181,40	239,40
MTB	241,00	298,80

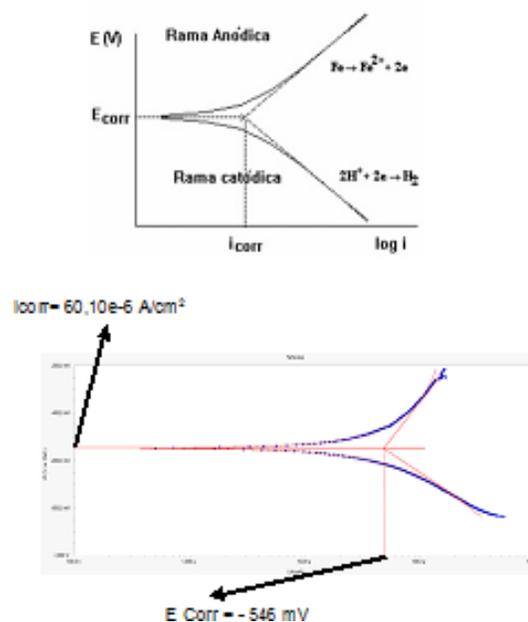


Figura 12: Curvas de Tafel anódicas y catódicas del acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %.

3.7. Resistencia a la polarización para el acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %

Aplicando el método de las pendientes de Tafel, en donde se polariza la muestra a un potencial de circuito abierto de ± 300 mV respecto al potencial de equilibrio con una velocidad de barrido de 2 mV s⁻¹. Graficando las curvas de Tafel (Figura 12) mediante la ecuación (4) y extrapolando ambas funciones (anódicas y catódicas) representándolas como una función del potencial respecto a la corriente de corrosión, es decir $\eta = f(\log i_t)$, se obtienen las pendientes de Tafel (ecuaciones (4) y (5)).

El valor de la velocidad de corrosión se pudo obtener aplicando las leyes de Faraday, en donde $V_{corr} = 27,53$ mpy.

Los datos obtenidos durante el ensayo fueron capturados mediante los electrodos que componen el experimento, los cuales son los que permitieron procesar las diferentes variaciones de voltaje y amperaje, y así obtener la interpretación de los resultados mediante el software utilizado para graficar las curvas. En la Tabla 6 podemos observar los resultados finales del ensayo.

Tabla 6: Potencial y velocidad de corrosión del acero dúplex SAF 2304 expuesto a cloruro de sodio al 3,5 %, sometido a 22 °C.

Muestra de acero dúplex SAF 2304	
E _{corr}	-546,0 mV
I _{corr}	$60,10 \times 10^{-6}$ A/cm ²
R _p	$4,274 \times 10^{-3}$ Ω cm ²
V _{corr}	27,53 mpy
b _a	$1,000 \times 10^{15}$ V/década
b _c	$676,1 \times 10^{-3}$ V/década

El valor que se obtuvo de la pendiente anódica resultó ser muy alto, lo cual pudiera sugerir un proceso de corrosión controlado por pasivación, que corresponde con los resultados obtenidos en los ensayos de picadura, donde se observó la formación de películas pasivas sobre las superficies de las muestras ensayadas, sobre todo por las caras transversales donde se pudo apreciar un proceso de corrosión localizada con presencia de una gran cantidad de picaduras y pérdida de material.

Al comparar estos valores con los obtenidos para el acero inoxidable dúplex 2304, en donde la pérdida de masa para el dúplex SAF 2304 fue de 1,4789 g x 34 cm² (es decir 0,044 g/cm²), se puede observar que presenta un valor semejante al del acero inoxidable 316 LNi, este resultado corresponde con los contenidos de níquel en ambos aceros (donde para el caso de acero inoxidable dúplex SAF 2304 es de 4,25 % y para el del acero inoxidable 316 LNi es de 6,04 %), y esto se traduce en la influencia que representa el contenido de níquel para la resistencia a la picadura de los aceros inoxidables en medios clorurados.

3.8. Análisis General

Ambos ensayos proponen diferentes comportamientos para el acero dúplex SAF 2304, en donde en el caso del ensayo de corrosión por picadura se refleja una mayor degradación el material al medio clorurado en exposición con respecto al ensayo de polarización. Como se pudo observar para el ensayo de corrosión por picadura el material presentó una pérdida de peso promedio de 1,4789 g y una elevada velocidad de corrosión promedio de 267,2667 mpy, en comparación el material alcanzó una velocidad de corrosión promedio de 27,53 mpy durante el ensayo de polarización. Estos resultados demuestran que aunque en ambos ensayos se evidenció un proceso de corrosión controlado por pasivación, en el caso del ensayo de picadura el acero dúplex 2304 presentó un mayor deterioro microestructural localizado en las intercaras fases austenita-ferrita, como lo demostraron las imágenes (Figuras 5 y 6) obtenidas en la microscopía óptica, esto debido principalmente al bajo contenido de níquel presente en este acero.

En el caso de la desviación estándar se puede observar, que en la pérdida de peso se presentó la mayor variación, esto es debido posiblemente a discrepancias en la homogeneidad del material, ocurrido durante el proceso de laminación, causando que la pérdida de peso en algunas muestras fuese significativamente mayor respecto a otras.

4. Conclusiones

El acero inoxidable dúplex SAF 2304 sometido a una temperatura de 50 °C en cloruro férrico al 6 % de concentración durante 72 horas presentó una pérdida de peso promedio de 1,4789 g.

La velocidad de corrosión promedio del grupo de muestras de acero inoxidable dúplex SAF 2304 es de 267,2667 mpy, este valor ofrece una buena resistencia a la corrosión por picadura, ya que no es tan rápida su velocidad de corrosión en comparación con los aceros inoxidables estudiados por Otero [1] y expuesto en la Tabla 4.

A través del análisis microestructural se determinó que el acero inoxidable está conformado por

microestructura bifásica compuesta de austenita y ferrita y donde se evidenció corrosión localizada y por picadura a través del análisis macroscópico.

En el caso del acero dúplex SAF 2304 la pérdida de peso es $0,044 \text{ g/cm}^2$ siendo similar a la obtenida para el acero inoxidable 316 LNi, por Otero [1] en su trabajo de investigación donde la pérdida de peso fue de $0,050 \text{ g/cm}^2$, se determina que el dúplex SAF 2304 ofrece una mejor alternativa en bajo costo manteniendo una buena resistencia a la corrosión por picadura debido a que su % en peso del Níquel que contiene es del 4% menor al del 316 LNi que es del 6,04%.

Se puede evidenciar que el contenido de Níquel influye en la resistencia a la corrosión por picadura para los aceros inoxidables expuestos a medios clorurados, sin embargo el % en peso del Níquel no es determinante, ya que otros elementos químicos como el Carbono y Manganeso provocan que esta resistencia disminuya aumentando su pérdida de masa y velocidad de corrosión.

Aunque no se puede comparar los resultados obtenidos para el cálculo de la velocidad de corrosión en el caso del ensayo de picadura con el del ensayo polarización, ambos ensayos demuestran la presencia de un proceso de corrosión controlado por pasivación, con la formación de una capa de óxido, en donde en el caso electroquímico de del ensayo de picadura se evidenció mediante la microscopía óptica el proceso de degradación microestructural localizado en las intercaras fases austenita-ferrita.

5. Referencias

- [1] E. Otero, M. V. Utrilla, A. Urena, and C. J. Munez. Influencia de la composición química en la resistencia a la corrosión por picadura de los aceros inoxidables. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 43(2):190–192, 2004.
- [2] Laureano Soria Conde. *Medida de la susceptibilidad a la corrosión por picaduras de los aceros inoxidables austeníticos*. Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, España, 1988.
- [3] E. R. Ruiz, R. S. Stampella, and C. M. Méndez. Evaluación del ataque corrosivo localizado en aceros inoxidables de alto cromo expuestos a medios oxidantes clorurados. *Revista de Ciencia y Tecnología*, (4b):61–67, 2002.
- [4] Walter Moreira Lima. *Materiales compuestos de matriz acero inoxidable austenítico reforzado con intermetálicos: comportamiento mecánico, a corrosión y desgaste*. Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, España, 1999.
- [5] Laura Molina Pérez. Estudio avanzado de corrosión: Análisis del estado de corrosión de un edificio modernista de barcelona y estudio de mecanismos de protección basados en recubrimientos orgánicos. Trabajo final de carrera, Universitat Politècnica de Catalunya, España, 2011.
- [6] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España). *Corrosión y protección metálicas*, volume 1. Editorial CSIC-CSIC Press, 1991.
- [7] Adrián Sánchez García. Montaje y puesta a punta de un potencióstato comercial para llevar a cabo medidas de corrosión electroquímica. Trabajo Especial de Grado, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2009.
- [8] Jesús García and Omar Guzmán. Evaluación de la resistencia a la corrosión por picadura del acero inoxidable dúplex SAF 2304. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2015.
- [9] ASTM G48 - 03(2009), standard test methods for pitting and crevice corrosion resistance of stainless steels and related alloys by use of ferric chloride solution, 2009.
- [10] ASTM Designation: G 5 - 87, standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements, 1987.
- [11] ASTM G31-72(2004), standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, 2004.
- [12] ASTM E384 - 11e1(2011), standard test method for knoop and vickers hardness of materials, 2011.
- [13] Florian Mansfeld and Martin Kendig. Technical note: Concerning the choice of scan rate in polarization measurements. *CORROSION*, 37(9):545–546, 1981.