

Duplex stainless steel subjected to corrosive mediums

Laura Sáenz * , María Carabaño

Centro de Investigación en Mecánica CIMEC, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i3.284>

Abstract.- Duplex stainless steels are very attractive materials of construction for use in aggressive environments due to their several advantages over austenitic stainless steels. Duplex steels have excellent resistance to pitting and crevice corrosion, are highly resistant to chloride stress corrosion cracking, and are about twice as strong as common austenitic steels. Better properties are associated with its microstructures consisting of ferrite and austenite grains. However, with some being subjected to aggressive media, these excellent properties can be reduced due to unwanted changes in the microstructure of the steel, mainly related to the destruction of the phases due to the loss of the elements nickel and chromium. The weight loss and corrosion rate increase of duplex stainless steels 2205, 2507 and 2304 were investigated. The three types of duplex steels were exposed to corrosive media such as: nitric acid, hydrochloric acid, sulfuric acid, oxalic acid, chloride sodium and ferric sulfate. Examinations were carried out with a light microscope, a Scanning Electron Microscope with Dispersed X-Ray Spectroscopy. The main objective of the investigations was to determine the effect of the corrosive medium on the steels, evaluating the loss of weight, corrosion rate and the changes in the microstructure.

Keywords: duplex stainless steels; aggressive media; weight loss; corrosion rate.

Aceros inoxidables dúplex sometidos a medios corrosivos

Resumen.- Los aceros inoxidables dúplex son materiales de construcción muy atractivos para su uso en entornos agresivos debido a sus varias ventajas sobre los aceros inoxidables austeníticos. Los aceros dúplex tienen una excelente resistencia a la corrosión por picaduras y grietas, son altamente resistentes al agrietamiento por corrosión bajo tensión de cloruro y son aproximadamente el doble de fuertes que los aceros austeníticos comunes. Mejores propiedades están asociadas con sus microestructuras que consisten en granos de ferrita y austenita. Sin embargo, al someter los aceros a medios agresivos, estas excelentes propiedades pueden reducirse debido a cambios no deseados en la microestructura del acero, relacionados principalmente con la destrucción de las fases a consecuencia de la pérdida de los elementos níquel y cromo. Se evaluó la pérdida de peso e incremento de velocidad de corrosión de los aceros inoxidables dúplex 2205, 2507 y 2304. Los tres tipos de aceros dúplex fueron expuestos a medios corrosivos tales como: ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido oxálico, cloruro de sodio y sulfato férrico. Se realizaron exámenes con microscopio de luz y microscopio electrónico de barrido con espectroscopia dispersa de rayos X. El objetivo principal de las investigaciones fue determinar el efecto del medio corrosivo sobre los aceros, evaluando la pérdida de peso, velocidad de corrosión y los cambios en la microestructura.

Palabras clave: aceros inoxidables dúplex; medios agresivos; pérdida de peso; velocidad de corrosión.

Recibido: 04 de noviembre, 2022.

Aceptado: 13 de febrero, 2023.

1. Introducción

El acero inoxidable es un tipo de acero con alta resistencia a la corrosión en medios débilmente corrosivos como el aire y el agua dulce. El acero resistente a los ácidos se refiere al acero con resistencia a la corrosión en medios corrosivos

duros, como ácidos, álcalis, sal y agua de mar. Los resultados muestran que la resistencia a la corrosión del acero incrementa con el aumento del contenido de Cr. Cuando el contenido de Cr supera el 12 %, la resistencia a la corrosión del acero en la atmósfera cambia de débil a fuerte. La resistencia a la corrosión del acero inoxidable se debe a la formación de una película de pasivación en su superficie. La composición química, la estructura y las propiedades de la película de pasivación varían según la composición química y los métodos de tratamiento del acero inoxidable y el medio ambiente [1].

* Autor para correspondencia:

Correo-e: lsaenz29@gmail.com (L. Sáenz)

Los aceros inoxidable son ampliamente utilizados en muchas áreas de la industria petrolera, química, naval, aérea entre otras, es necesario un material con propiedades aún superiores a las del acero inoxidable convencional (ferríticos, austeníticos y martensíticos), por esa razón se agregaron diferentes elementos aleantes que contribuyen a mejorar la resistencia a la corrosión, la resistencia a altas y bajas temperaturas y sus propiedades mecánicas; es aquí donde se generan los aceros inoxidables dúplex también denominados “Aceros de última generación” [1].

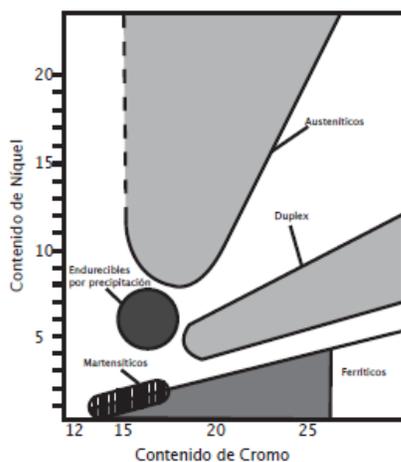


Figura 1: Relación entre el contenido de cromo y níquel en los distintos grupos de aceros inoxidables [1]

Los aceros inoxidables dúplex fueron desarrollados para sustituir a los aceros austeníticos que son vulnerables al agrietamiento por corrosión de tensiones (SCC) en ambientes de cloruro y a los ferríticos que tienden a ser frágiles y con baja soldabilidad pero que resisten stress corrosión cracking, SCC. Los aceros inoxidables dúplex contienen cromo entre 18 y 28 % para mantener la resistencia a la corrosión de los aceros austeníticos y cantidades moderadas de níquel (entre 4,5 y 8 %) para aumentar el contenido de ferrita y así la resistencia SCC en medios con cloruros a alta temperatura [1] (Figura 1). Los formadores de ferrita, cromo y molibdeno se equilibran con los formadores de austenita, níquel y nitrógeno, para desarrollar la estructura duplex [2]. Además, poseen mayor resistencia mecánica

y una resistencia considerablemente mayor al SCC, a expensas de una tenacidad, ductilidad y soldabilidad levemente menor, combinados con una mayor resistencia a la tracción y punto de fluencia que los aceros inoxidables convencionales austeníticos y ferríticos [1].

El acero inoxidable dúplex DSS posee excelentes propiedades mecánicas y buena resistencia ante agentes corrosivos. La aplicación generalizada y extensa de nitrógeno en el acero inoxidable es el avance más importante en el campo del acero inoxidable. El nitrógeno se agregó al DSS para desarrollar la segunda generación (grado representativo SAF2205) y la tercera generación (acero inoxidable súper dúplex, grado representativo SAF2507 de DSS). No solo mejora significativamente la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables austeníticos y dúplex en medios ácidos oxidantes y ácidos reductores, sino que también mejora su resistencia a la corrosión local, como la corrosión intergranular, la corrosión por picaduras y la corrosión por grietas. En el acero inoxidable, el nitrógeno mejora la resistencia a la corrosión por picaduras y grietas entre 16 y 30 veces más que el cromo [2, 3].

La resistencia a la corrosión por picadura conocida como PRE, tiene un valor por encima de 40 en los aceros dúplex, considerado como un valor alto. Mientras mayor sea la PRE, mejor resistencia a la corrosión posee el material, lo cual es beneficioso al momento de aplicaciones bajo ambientes altamente corrosivos [3]. Los aceros dúplex son altamente resistentes al agrietamiento por corrosión bajo tensión por cloruros y son aproximadamente el doble de fuertes que los aceros austeníticos comunes [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

El principal objetivo de la investigación fue el de determinar el efecto de diferentes medios corrosivos (ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido oxálico, cloruro de sodio y sulfato férrico) sobre los aceros inoxidables dúplex DSS 2205, 2304 y 2507.

2. Metodología

Se utilizaron muestras de aceros inoxidables dúplex DSS 2205, 2304 y 2507, en la Tabla 1 se

muestra la composición química de los mismos.

Tabla 1: Composición química de los aceros inoxidables dúplex, DSS 2205, 2304 y 2507 [1]

	Acero Dúplex DDS		
	2205	2304	2507
Cr	21,0-23,0	21,5-24,5	25,15
Mo	2,5-3,5	0,05-0,6	3,91
Mn	2	2,5	0,77
Ni	4,5-6,5	3,0-5,5	6,96
N	0,08-0,20	0,05-0,20	0,282
C	0,03	0,03	0,014

Las muestras fueron conformadas por probetas de tracción, probetas de impacto tipo charpy en V, cupones, muestras media luna, y fueron expuestas a los siguientes medios corrosivos: ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido oxálico, cloruro de sodio y sulfato férrico. Se determinó la pérdida de peso y la velocidad de corrosión, variando la concentración del ácido, el tiempo de exposición y la temperatura para cada medio corrosivo. En el Tabla 2 se especifican las condiciones de exposición utilizadas para cada uno de los aceros inoxidable dúplex.

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).

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

Donde,

W : Pérdida de peso en gramos (g),

W_{inicial} : Peso inicial en gramos (g) y

W_{final} : Peso final en gramos (g).

Se determinó la velocidad de corrosión, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM A262 – Práctica C [12], haciendo uso de la ecuación (2) de acuerdo a la norma ASTM G-31 [13].

$$\text{Velocidad de Corrosión} = \frac{K \cdot W}{A \cdot T \cdot D} \quad (2)$$

Donde:

K : Constante que se toma de la tabla N° 8.1.2 de la norma ASTM G1 [14].

W : Masa perdida en gramos.

A : Área expuesta en cm^2 .

T : Tiempo de exposición en horas.

D : Densidad del material g/cm^3 .

Los aceros inoxidables dúplex DSS 2205, 2403 y 2507 sometidos a los diversos medios corrosivos fueron basados en las normas ASTM A262-02a (2008) [12], ASTM G-31[13], ASTM G1-01 [14], ASTM A240 / A240M-04a [15] y ASTM G4-01(2014) [16].

Para la observación microscópica se utilizó un microscopio óptico metalográfico marca UNION, modelo MC8626, con aumentos de 50X-1000X, y un microscopio electrónico de barrido con espectroscopía dispersa de rayos X, marca PHILIPS, modelo XL30 S FEG, resolución 1,5 nm, 200 V y 30 kV.

3. Resultados y discusión

En la Tabla 3 se muestran los datos experimentales promedio obtenidos de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los diferentes aceros inoxidables dúplex, DSS (2205, 2403 y 2507).

3.1. Acero inoxidable dúplex, DSS 2205

Los resultados mostrados en la Tabla 2, demuestran que el mayor índice de pérdida de peso se encuentra en la condición de 40 °C y 30 % H_2SO_4 [2], con una pérdida de masa de 4,5 %. En la microscopía óptica mostrada en la Figura 2, se observa una mayor densidad de microgrietas que en las condiciones de 10 y 20 % de H_2SO_4 alineadas en los límites de grano provocando un ablandamiento del material. En cuanto a la velocidad de corrosión, se observa un comportamiento siempre creciente proporcional tanto a la temperatura de exposición como al porcentaje de concentración del ácido sulfúrico para la exposición del DSS 2205 [2].

En los resultados obtenidos al exponer DSS 2205 a ácido clorhídrico al 5 % [4] se puede observar una mayor velocidad de corrosión en comparación con el ácido sulfúrico, alcanzando 27, 32 mm/mes para la condición de 40 °C y 30 % de H_2SO_4 , mientras que con el ácido clorhídrico alcanzó un valor máximo de 5,2 mm/mes para la exposición de

Tabla 2: Condiciones de exposición utilizadas para cada uno de los aceros inoxidable dúplex DSS

Acero inoxidable dúplex	Medio corrosivo	Tiempo	Referencias
SAF 2205	Ácido sulfúrico al 10 % 25 °C y 40 °C	12 horas	[2]
	Ácido sulfúrico al 20 % 25 °C y 40 °C	12 horas	
	Ácido sulfúrico al 30 % 25 °C y 40 °C	12 horas	
SAF 2304	Ácido clorhídrico al 5 % 27 °C, 47 °C y 65 °C	24, 48 y 72 horas	[4]
	Ácido nítrico al 65 % 121 °C	48, 96, 144, 192, y 240 horas	[7]
SAF 2507	Cloruro de sodio al 3 % 33-37 °C	24, 48, 72 y 96 horas	[5]
	Ácido oxálico al 10 % 50 °C (6, 8 y 10 voltios)	120 horas	[8]
	Ácido nítrico al 65 % 121 °C	48, 96, 144, 192 y 240 horas	[3, 10, 11]
	Sulfato férrico - ácido sulfúrico al 96 % 30 °C, 45 °C y 137 °C	120 horas	[9]
	Ácido clorhídrico al 5 % 27 °C, 47 °C y 65 °C	24, 48 y 72 horas	[6]
	Ácido clorhídrico al 4 % 27 °C, 47 °C y 65 °C	24, 48 y 72 horas	[6]
	Ácido clorhídrico al 3 % 27 °C, 47 °C y 65 °C	24, 48 y 72 horas	[6]

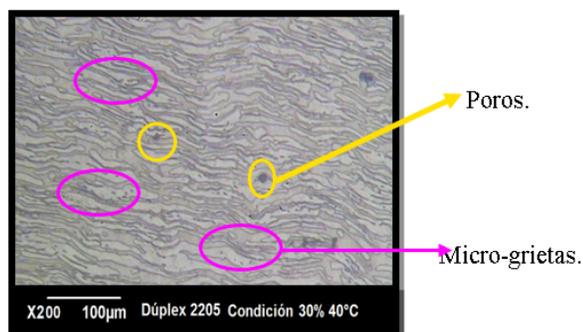


Figura 2: Microestructura del DSS 2205 a 200X, por microscopía óptica, condición de 30 % de H₂SO₄ a 40 °C [2]

24 horas, mostrando así una mejor resistencia a la corrosión para el DSS 2205 en el ácido clorhídrico. Con respecto a la disminución de la velocidad de corrosión, esto se puede atribuir a la saturación de las muestras, ya que la exposición al ácido clorhídrico permite que este reaccione con el hierro contenido en el acero y formando como resultado cloruro férrico (FeCl₂) que actúa como una capa protectora contra el ácido clorhídrico [4].

Por otra parte, para el ácido clorhídrico, la pérdida de peso en las probetas de tracción e

impacto mostró un comportamiento directamente proporcional al tiempo de exposición, con un incremento desde la condición de 24 horas hasta la de 72 horas de exposición al medio del 98 % y 134 % respectivamente [4]. Sin embargo, a pesar de que el incremento fue menor, se registró mayor pérdida de peso en todas las condiciones para las probetas de tracción, esto se puede deber a que dichas probetas tienen una mayor área de exposición al medio. En la Figura 3 se aprecia la degradación total de la fase ferrítica y un deterioro notable de la fase austenítica como resultado del ataque del ácido clorhídrico [4].

3.2. Acero inoxidable dúplex DSS 2304

Para el acero inoxidable dúplex 2304 [7] como se puede observar en la Tabla 2, la pérdida de peso, al igual que la velocidad de corrosión, presentó una variación entre las probetas de impacto y las probetas de tracción. La primera presenta una pérdida de peso aproximadamente constante mientras que las de tracción experimentaron una variación importante en el último periodo de exposición que pudo deberse a la formación de precipitados de cromo originados durante el

Tabla 3: Datos experimentales de pérdida de peso y velocidad de corrosión de los diferentes DSS (2205, 2403 y 2507) expuestos a diferentes medios corrosivos

Acero inoxidable dúplex	Medio corrosivo	Temperatura (°C)	Tiempo de exposición (h)	Concentración (%)	Pérdida de peso [Tracción] (g)	Pérdida de Peso [Impacto] (g)	Velocidad de corrosión [Tracción] (mm/mes)	Velocidad de corrosión [Impacto] (mm/mes)	
DSS 2205	HCl [4]	65	24	5	3,9554	1,5477	5,2652	3,2827	
			48		5,1372	2,2257	3,4119	2,3035	
			72		7,8485	3,6211	3,4538	2,4864	
	H ₂ SO ₄ [2]	25	12	10	0	0	0		
				20	0,2	0,2	0,27		
				30	0,6	0,7	0,76		
	40	12	10	0,1	0,1	0,11			
		20	0,8	0,7	0,87				
		30	2	1,9	2,28				
DSS 2304	HNO ₃ [10]	121	48	65	0,03	0,03	0,01972	0,0305	
			96		0,0533	0,05	0,0175	0,0235	
			44		0,4267	0,07	0,0927	0,0218	
DSS 2507	H ₂ C ₂ O ₄ [8]	50	0.033	10 (6v)	0,0669	0,0538	-	-	
			2min	10 (8v)	0,0604	0,0526	-	-	
				10 (10v)	0,1145	0,0569	-	-	
	HCl [6]	27	24	3	0,0245	0,0562			
			48		0,0481	0,1542			
			72		0,0731	0,3055			
				24	4	0,0671	0,0552		
		48		0,1368		0,1572			
		72		0,2158		0,3227			
				24	5	0,1329	0,056		
		48		0,2808		0,1653			
		72		0,4018		0,3078			
			47	24	3	0,2189	0,5032		
		48		0,3869		1,0118			
		72		0,6151		1,6794			
			24	4	0,4402	0,4447			
	48		0,7726		0,888				
	72		1,2479		1,6152				
			24	5	0,7306	0,4713			
	48		1,4054		0,9562				
	72		2,1957		1,6823				
		65	24	3	0,6001	1,3793			
	48		1,2558		2,7521				
	72		1,9091		4,2084				
		24	4	1,1973	1,4433				
48		2,4479		2,8134					
72		3,6396		4,082					
		24	5	1,8308	1,4627				
48		3,5516		2,7887					
72		5,2249		4,0034					
Fe ₃ S - H ₂ SO ₄ [9]		30	120	96,5	0,0803	0,0803			
		45			0,1254	0,1254			
		135			1,437	1,437			
HNO ₃ [11] (Cupones)		121	48	65	0,157	0,187			
			96		0,451	0,2723			
			144		0,701	0,2827			
			192		2,291	0,6904			
			240		3,666	0,8736			
HNO ₃ [3] (Medialuna)		121	48	65	2,4	4,9732			
			96		4,66	4,8412			
			144		7,3	5,0514			

tratamiento térmico de sensibilización. Indica que no se observó una corrosión o susceptibilidad

intergranular severa, sino pequeñas singularidades.

Mientras que para el acero inoxidable dúplex

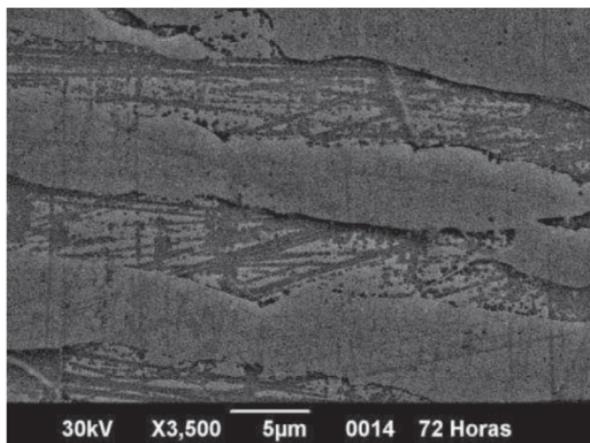


Figura 3: Microscopía electrónica de barrido de DSS 2507 expuesto a ácido clorhídrico al 5% durante 72 horas [4]

2304 [5] sometido en medio corrosivo de NaCl al 3%. Las muestras sometidas en una cámara de niebla salina a tiempos de exposición de 24, 48, 72, 96 horas, no se encontró variación en el peso de las muestras bajo el ambiente de NaCl al 3% en las condiciones estudiadas, y no se evidenció deterioro microestructural.

3.3. Acero inoxidable dúplex DSS 2507

En el acero DSS 2507 expuesto al ácido clorhídrico [6] se puede apreciar la influencia de la temperatura de exposición. La Tabla 2 muestra que la pérdida de peso presenta una tendencia lineal de pendiente positiva [6]. La condición de 27 °C se tiene un incremento en pérdida de peso desde la concentración de 3 a 5 %, en promedio, de 458,51 %, mientras que para la condición de 65 °C se obtuvo un incremento del 185,54 % en el mismo intervalo. En la Figura 4a, se puede notar que la ferrita no está presente en la superficie ni en los bordes de grano por el ataque químico, debido a la corrosión selectiva que sufrió el material en la condición de 47 °C [6].

Con respecto a la velocidad de corrosión [6], se puede apreciar en la Tabla 2, para la condición de 27 °C en promedio se alcanzó un incremento aproximado del 458 % desde la concentración de 3 a 5 % y para la condición de 47 °C el incremento en este mismo intervalo del 250,52 %, mientras que para la condición de 65 °C logró un

186,87 % de aumento. Sin embargo, la velocidad de corrosión tiende a un valor constante para cada concentración y temperatura de exposición a medida que transcurren las horas de exposición al ácido clorhídrico. En la Figura 4b se puede observar el deterioro de la austenita en los límites de grano y en los granos austeníticos de mayor tamaño, además se evidencia gran profundidad en las cavidades dejadas por la ferrita, que fue devastada por completo, ocasionando un grave deterioro a la microestructura del DSS 2507 [6].

Para el acero DSS 2507 expuesto a ácido oxálico [8] se registraron en general pérdidas de peso de alrededor 0,2 % siendo estos datos no representativos para aseverar la existencia de un proceso corrosivo severo. Esta pérdida de peso mínima se puede atribuir a la caída de ciertas capas de óxido remanentes del tratamiento térmico de sensibilización y suciedad adheridas a las probetas [8].

Con respecto al acero DSS 2507 expuesto al ácido sulfúrico y sulfato férrico al 96 % [9], donde se utilizaron muestras tipo chapas, se puede notar que la temperatura de exposición al medio corrosivo vuelve a ser un factor determinante en el proceso corrosivo. La microestructura del acero cambió luego de 120 horas de exposición desde la condición de 45 °C hasta la de 135 °C, evidenciando la corrosión intergranular, afectando notablemente a la ferrita, lo que justifica en aumento drástico de la pérdida de peso en la condición de 120 horas.

De acuerdo a los datos reportados en la Tabla 2 y representados en las Figuras 5 y 6, se muestra el comportamiento del DSS 2507 expuesto a ácido nítrico al 65 % a temperatura de ebullición (121 °C), donde se puede contrastar la influencia del área expuesta en el proceso corrosivo, ya que se tienen muestra tipo cupones [11], media luna [3] y probetas sub-size para ensayo Charpy y de tracción [10].

Se puede notar que el medio corrosivo que tuvo menos incidencia sobre el acero fue el sulfato férrico – ácido sulfúrico al 96 % cuyo valor mínimo fue de 0,043 mm/mes, ocasionando la menor velocidad de corrosión en un tiempo de exposición de 120 horas y a su vez el medio que más repercutió resultó ser el ácido clorhídrico al 5 %

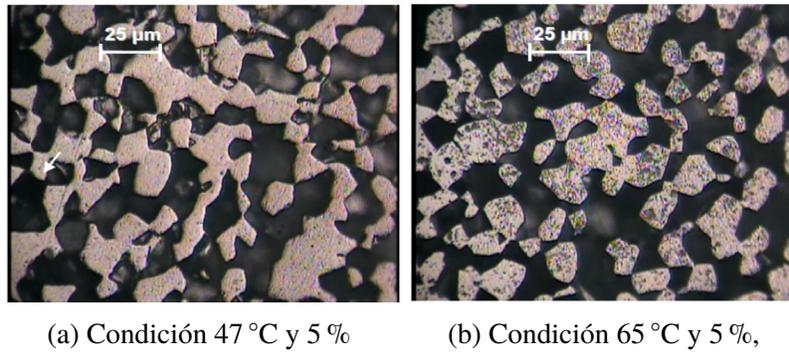


Figura 4: Muestras de DSS 2507 expuesto a ácido clorhídrico [6]

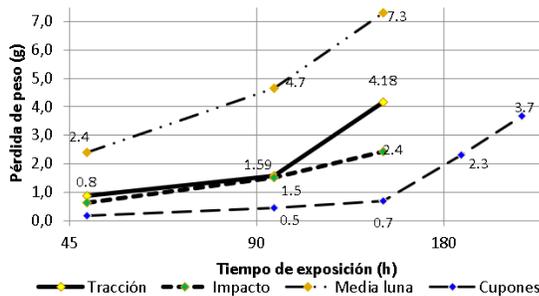


Figura 5: Comparación de pérdida de peso en diferentes geometrías de probetas de acero inoxidable 2507, expuestas a ácido nítrico al 65 % y 121 °C [3, 10, 11]

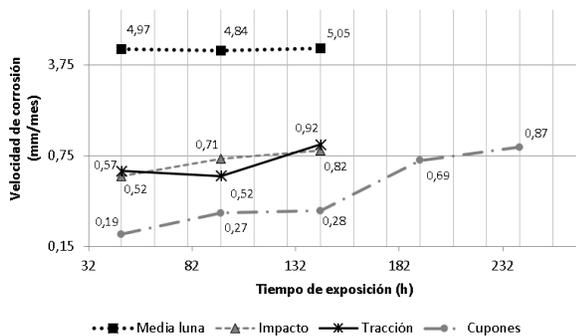


Figura 6: Comparación de velocidad de corrosión en distintas probetas de acero inoxidable 2507, expuestas al ácido nítrico al 65 % [3, 10, 11]

de concentración y 65 °C, con 50,5 mm/mes; y de igual forma se aprecia un comportamiento similar en la pérdida de peso del material (Figura 7).

Las Figuras 7 y 8 muestran las curvas de pérdida de peso (g) y velocidad de corrosión (mm/mes) de los aceros y medios utilizados, y se observa que el DSS 2304 mostró mayor resistencia a

la corrosión que el resto de los aceros objeto de estudio, presenta una menor pérdida de peso y velocidad de corrosión, manteniendo valores promedio inferiores al 0,06 g y 0,03 mm/mes; contrastando con el DSS 2205, que obtuvo valores 7,84 g y 5,26 mm/mes, siendo estos los más elevados al ser expuesto a ácido clorhídrico al 5 %, que cabe destacar fue el medio corrosivo con mayor impacto en cuanto a pérdida de peso y velocidad de corrosión tanto para el DSS 2205 y 2507.

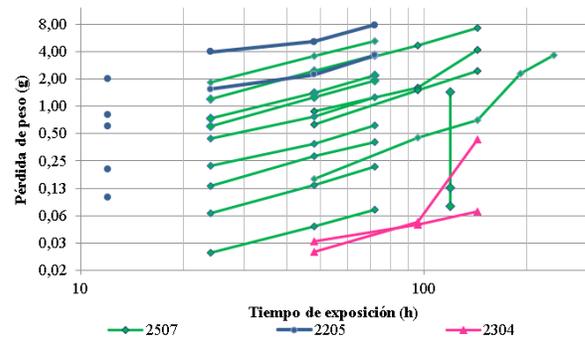


Figura 7: Pérdida de peso para los aceros DSS 2205, 2304 y 2507 expuesto a diversos medios corrosivos

Para el acero inoxidable dúplex SAF2205 [2] para la condición de mínima y máxima degradación por el ácido las cuales fueron del 10 % de H₂SO₄ a 25 °C y 30 % de H₂SO₄ a 40 °C respectivamente, con una pérdida de peso de 0 % y 4,3 % para el acero inoxidable dúplex SAF 2205. Por microscopía electrónica de barrido MEB se observó que el proceso de sensibilización generó la precipitación de carburos en los límites de grano, por EDX se identificaron segregaciones en la fase ferrítica del acero dúplex SAF 2205.

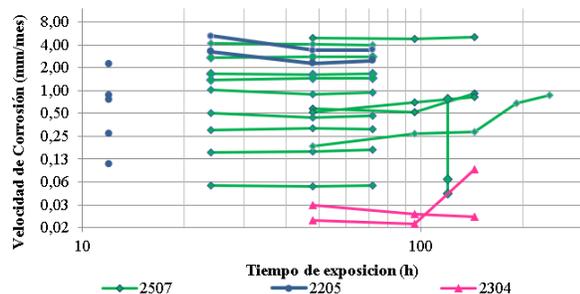


Figura 8: Velocidad de corrosión para los aceros DSS 2205, 2304 y 2507 expuesto a diversos medios corrosivos

Para el acero inoxidable dúplex 2205 [4] expuesto a una solución de HCl con 5 % de concentración a una temperatura de 65 °C, en diferentes periodos de tiempo, las muestras fueron expuestas a un tratamiento previo de sensibilización de una hora a 675 °C. La velocidad de corrosión mostró un comportamiento decreciente desde la condición de 24 a 48 horas para ambas probetas, y para los periodos de 48 a 72 horas se mantuvo constante. Por otra parte, Sáenz *et al.* [17] determinaron para el acero inoxidable dúplex 2205 expuesto a similares condiciones pero utilizando probetas de tracción e impacto, encontraron que la velocidad de corrosión incrementaba en la medida que se aumentaba el tiempo de exposición en el ácido, determinándose un incremento de 40 % entre la condición de 48 y 72h de exposición. También observaron un considerable deterioro microestructural de las tres condiciones sometidas al medio corrosivo, observándose corrosión por picaduras de tipo selectiva sobre los granos de ferrita [17].

Para el acero inoxidable dúplex 2304 [5] sometido en medio corrosivo de NaCl al 3 %. Las muestras sometidas en una cámara de niebla salina a tiempos de exposición de 24, 48, 72, 96 horas, no se evidenció deterioro microestructural. No se encontró variación en el peso de las muestras bajo el ambiente de NaCl al 3 % en las condiciones estudiadas.

Para el acero inoxidable dúplex 2304 [7], expuesto en ácido nítrico HNO₃ al 65 % de concentración en ebullición por tres (3) periodos de tiempo. 48 h, 96 h y 144 h, todas las muestras fueron sometidas a un tratamiento previo de

sensibilización de una hora a 675 °C. Se puede observar en la Figura 7 y 8 la pérdida de peso, al igual que la velocidad de corrosión, presentó una variación entre las probetas de impacto y las probetas de tracción. La primera presenta una pérdida de peso aproximadamente constante; mientras que las de tracción experimentaron una variación importante en el último periodo de exposición, que pudo deberse a la formación de precipitados de cromo originados durante el tratamiento térmico de sensibilización.

Para el acero dúplex SAF 2507 [6] expuesto a una solución acuosa de ácido clorhídrico con concentraciones de 3 %, 4 % y 5 % basándose en la norma ASTM 262-02a [12]. La velocidad de corrosión mostró un comportamiento constante para una misma condición de ensayo. A nivel microscópico el deterioro se evidenció por picaduras, pérdida de la fase ferrita, pérdida de límite de grano y separación intergranular. Mediante el análisis de espectroscopía de energía dispersa de rayos X se demostró la pérdida de la fase de ferrita a partir de condiciones de temperatura de 47 °C y concentraciones de 4 % de ácido clorhídrico.

Para el acero Dúplex 2507 [8] con exposición al ácido oxálico basándose en la norma ASTM 262-02a [12]. Las muestras del acero fueron sometidas al medio corrosivo de ácido oxálico a 10 % de concentración, durante un periodo aproximado de 2 (dos) minutos, variando la diferencia de potencial del medio entre 6 (seis), 8 (ocho) y 10 (diez) voltios. Se registraron en general pérdidas de peso de alrededor 0,2 % siendo estos datos no representativos para aseverar la existencia de un proceso corrosivo severo como se puede apreciar en la Tabla 2. Además, se observó gran cantidad de carburos de cromo en la microestructura, lo que permite concluir que los cambios que se generaron dentro del proceso son debidos en parte al proceso de sensibilización aplicado.

Para el aceros inoxidables dúplex 2507 [9] y austenítico 316L sometidos a sulfato férrico – ácido sulfúrico al 96,5 % de concentración a 30 °C, 45 °C y ebullición. Se observó el deterioro de la microestructura por presentar picaduras, pérdida de homogeneidad, pérdida de límite de grano,

socavación del grano y separación intergranular, reflejando el mayor deterioro para el acero dúplex 2507, a través del análisis de espectroscopía de energía dispersa de rayos X se observó la migración de cromo y níquel en ambos aceros. La microestructura del acero luego de 120 horas de exposición desde la condición de 45 °C hasta la de 135 °C, se observe corrosión intergranular, afectando notablemente a la ferrita, lo que justifica en aumento drástico de la pérdida de peso en la condición de 120 horas.

Para el acero dúplex 2507 [3, 18] sometido a ensayos de inmersión en ácido nítrico con 65 % de concentración a temperatura de ebullición durante períodos de exposición de 48 h, 96 h y 144 h. Se observó la reducción de los espesores de las probetas como resultado de la corrosión uniforme, y perforaciones resultantes de la corrosión por picadura. El comportamiento más desfavorable para el acero dúplex 2507 sometido a ensayos de inmersión en ácido nítrico, se observa en las muestras tipo media luna, que presentaban un área superficial del 9,38 cm², con un peso inicial de 7 g por cada muestra en promedio, lo que resulta en una pérdida de peso de aproximadamente el 100 % para las muestras que fueron expuestas por 144 horas al HNO₃, por lo que los valores de velocidad de corrosión mostrados en la Tabla 2 se ven afectados por la pérdida de peso tan grande, esto puede estar relacionado con que las muestras, al ser tan pequeñas, se vieron afectadas al disminuir tanto su espesor en la exposición al ácido, lo que condujo a una contaminación mayor a lo esperado del mismo, logrando así un efecto erosivo, de las partículas de acero disueltas, sobre las muestras que continuaban expuestas al medio corrosivo [3, 18]. Se realizó una evaluación metalográfica mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, en donde se pudo observar la degradación del material, principalmente en la fase ferrítica, la cual se sacrifica durante el proceso de deterioro, partiduras de granos evidenciando presencia de corrosión transgranular y desprendimientos de granos como producto de la corrosión intergranular.

Para el Acero Inoxidable Dúplex SAF 2507 [10] expuesto al ácido nítrico HNO₃ al 65 % de

concentración en ebullición para tres (3) periodos de exposición 48, 96 y 144 horas, todas con un tratamiento previo de sensibilización de una hora a 675 °C, se observa que para las probetas de tracción con una velocidad de corrosión de 0,92 mm/mes y las de impacto con 0,82 mm/mes para un tiempo de exposición de 144 horas al medio corrosivo; se apreció la influencia del área expuesta en la velocidad de corrosión del DSS 2507.

Para los aceros inoxidable dúplex SAF 2507 y AISI 316 [11] expuestos al ácido nítrico (HNO₃) con 65 % de concentración las muestras fueron sometidos a 5 periodos de 48 horas de exposición al medio corrosivo, se debe mencionar que el comportamiento del DSS 2507 al exponerse a ácido nítrico al 65 % basado en la norma ASTM A240 / A240M-04a [14] presentó un comportamiento constante creciente que alcanzó hasta un 350 % de incremento en la velocidad de corrosión de los cupones desde la condición de 48 horas hasta la de 240 horas de exposición, lo que denota la susceptibilidad del DSS 2507 al HNO₃ [11]. Además, el deterioro de la microestructura mostró la pérdida de límites de grano, separación intergranular, presencia de picadura y pérdida de la homogeneidad de la microestructura, determinándose por el medio visual un mayor deterioro para el acero dúplex SAF 2507 en comparación con el acero AISI 316, mediante el análisis de espectroscopía de energía dispersa de rayos X se corrobora la migración de los elementos cromo y níquel en ambos casos [11].

4. Conclusiones

Los resultados de la presente investigación confirman que para cada uno de los aceros inoxidable dúplex estudiados es importante tomar en consideración la concentración del medio corrosivo, el tiempo de exposición al medio corrosivo y la temperatura de servicio, cada uno de estos aceros tienen un comportamiento completamente diferente.

A continuación, se da un breve resumen de los comportamientos más resaltantes del estudio realizado para los aceros estudiados.

El acero inoxidable dúplex 2304 mostró una mayor resistencia a la corrosión en comparación con el acero inoxidable dúplex 2205 y el acero inoxidable dúplex 2507, presentando una mínima pérdida de peso de apenas 0,06 g luego de 96 horas de exposición al ácido nítrico al 65 % y 121 °C, así como una velocidad de corrosión de 0,03 mm/mes para la condición de 48 horas en el mismo medio corrosivo.

Para el acero inoxidable dúplex 2205 expuesto a ácido clorhídrico al 5 %, perdió 7,84 g para 96 horas de exposición y alcanzo una velocidad de corrosión de 5,26 mm/mes para la condición de 24 horas, que fue disminuyendo en función del tiempo.

El acero inoxidable dúplex 2507 mantuvo un comportamiento intermedio sin embargo presentó una notable susceptibilidad al ácido nítrico al 65 % donde se observó un incremento del 350 % en velocidad de corrosión desde la condición de 48 horas hasta la de 240 horas de exposición.

5. Referencias

- [1] International Molybdenum Association (IMOA), *Directrices Prácticas para la Fabricación de los Aceros Inoxidables Dúplex*, 1era ed. Londres, Reino Unido: Internacional Molybdenum Association, 2012.
- [2] O. López y L. Sáenz, "Evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento por exposición a ácido sulfúrico sobre un acero inoxidable 316l y un acero inoxidable dúplex SAF 2205," *Revista Ingeniería y Sociedad*, vol. 11, no. 1, pp. 55–69, 2016.
- [3] L. Sáenz, D. Espinoza, and J. Herrera, "Microstructural degradation of a Duplex stainless steel SAF 2507 exposed an immersion test in 65 % concentration nitric acid," *Revista Ingeniería UC*, vol. 22, no. 3, pp. 19–28, 2015.
- [4] F. Fernández y M. Masi, "Evaluación de la tenacidad de impacto del acero inoxidable dúplex 2205 expuesto en una solución de ácido clorhídrico con 5 % de concentración y a 65 °C, en diferentes períodos de tiempo," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia. Carabobo, 2013.
- [5] R. Garay y P. Rodríguez, "Evaluación del deterioro microestructural de un acero inoxidable dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de cloruro de sodio (nacl) al 3 %," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia. Carabobo, 2011.
- [6] L. Sáenz, F. Rodríguez, y T. Loaiza, "Evaluación de la degradación microestructural del acero inoxidable dúplex SAF 2507 expuesto a una solución de ácido clorhídrico a bajas temperaturas," *Revista Ingeniería UC*, vol. 19, no. 1, pp. 51–56, 2012.
- [7] C. Roque y L. López, "Evaluación de la tenacidad de impacto del acero dúplex expuesto al Ácido nítrico con 65 % de concentración en ebullición (en períodos de tiempo de 48, 96, 144 h)," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia. Carabobo., 2011.
- [8] A. Jiménez y J. Vidoza, "Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10 % según la norma astm a262-02," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia. Carabobo, 2010.
- [9] J. Ossa y C. Villasana, "Evaluación de la susceptibilidad al ataque intergranular en aceros inoxidables dúplex 2507 y austenítico 316l sometidos a sulfato férrico – ácido sulfúrico al 96,5 % de concentración a 30 °C, 45 °C y ebullición," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia. Carabobo, 2010.
- [10] J. Martín y J. Medina, "Evaluación de la tenacidad de impacto del acero inoxidable dúplex saf 2507 expuesto al Ácido (HNO₃ con 65 % de concentración en ebullición)," Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo, Valencia. Carabobo, 2010.
- [11] L. Sáenz Palencia, F. Pevalonic, and O. García, "Susceptibility to the intergranular attack of duplex stainless steel exposed to nitric acid with 65 % concentration in boiling," *Revista Ingeniería UC*, vol. 24, no. 3, pp. 53–59, 2017.
- [12] ASTM International, *ASTM G-31 Standard Guide for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*, ASTM, PA, USA, 2018.
- [13] ASTM International, *ASTM G1 (2017). Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*, ASTM, PA, USA, 2017.
- [14] ASTM International, *ASTM A240/A240M-04a,(2004), standard specification for chromium and chromium–nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications.*, ASTM, PA, USA, 2017.
- [15] ASTM International, *ASTM A262-02a (2008), standard practices for detecting susceptibility to intergranular attack in austenitic stainless steels*, ASTM, PA, USA, 2008.
- [16] ASTM International, *ASTM G4-01(2014), standard guide for conducting corrosion tests in field applications*, ASTM, PA, USA, 2014.
- [17] L. Sáenz P., J. Castillo, y J. Márquez, "Susceptibilidad a la corrosión del acero inoxidable dúplex 2205 expuesto a inmersión en ácido clorhídrico (HCl)," *Revista Ingeniería industrial. Actualidad y nuevas tendencias*, vol. V, no. 19, pp. 59–74, 2017.

- [18] L. Sáenz, J. Herrera, y D. Espinoza, “Degradación microestructural de un acero dúplex SAF 2507 sometidos a ensayos de inmersión en ácido nítrico con 65 % de concentración,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 22, no. 3, pp. 19–28, 2015.