

Evaluation of the Corrosion Resistance of AISI 316l Steel Subjected to Severe Deformation Using the Groove Pressing Technique

Walter-Yesid Aragón-Lozano; Luis-Felipe Fernández-Vega; Oscar-Fabián Higuera-Cobos; José-Luis Tristancho-Reyes; Cristian-Antonio Pedraza-Yepes

Citación: W.-Y. Aragón-Lozano, L.-F. Fernández-Vega, O.-F. Higuera-Cobos, J.-L. Tristancho-Reyes, C.-A. Pedraza-Yepes, “Evaluation of the Corrosion Resistance of AISI 316l Steel Subjected to Severe Deformation Using the Groove Pressing Technique,” *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 29 (54), e10343, 2020.

<https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10343>

Recibido: Septiembre 18, 2019; **Aceptado:** Noviembre 22, 2019;

Publicado: Noviembre 25, 2019

Derechos de reproducción: Este es un artículo en acceso abierto distribuido bajo la licencia [CC BY](#)



Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Evaluation of the Corrosion Resistance of AISI 316L Steel Subjected to Severe Deformation Using the Groove Pressing Technique

Walter-Yesid Aragón-Lozano¹

Luis-Felipe Fernández-Vega²

Oscar-Fabián Higuera-Cobos³

José-Luis Tristancho-Reyes⁴

Cristian-Antonio Pedraza-Yepes⁵

Abstract

In this investigation, samples of AISI 316L steel were subjected to severe plastic deformation by the groove pressing (GP) technique using 2 dies A2 type tool steel dies with dimensions of 96 mm X 96 mm, a corrugated die with 2 mm teeth and 45° angle and a flat die. Each pass through the GP die includes 2 states of corrugated and 2 states of straightening with a 180° rotation between each of them. This configuration provides the material with an equivalent theoretical deformation per pass of $\epsilon \sim 1.16$. The material was deformed by 4 passes per GP to an equivalent deformation of $\epsilon \sim 4.64$. Prior to the deformation, the specimens were subjected to an annealing heat treatment for 1 hour at 1000 °C with water cooling, in order to eliminate the lamination texture. The annealed and deformed material was

¹ Universidad del Atlántico (Barranquilla-Atlántico, Colombia). wvaragon@mail.uniatlantico.edu.co. ORCID: [0000-0001-7212-1547](https://orcid.org/0000-0001-7212-1547).

² Universidad del Atlántico (Barranquilla-Atlántico, Colombia). lffernandez@mail.uniatlantico.edu.co. ORCID: [0000-0001-6817-6166](https://orcid.org/0000-0001-6817-6166).

³ Ph. D. Universidad del Atlántico (Barranquilla-Atlántico, Colombia). oscarhiguera@mail.uniatlantico.edu.co. ORCID: [0000-0002-4836-5215](https://orcid.org/0000-0002-4836-5215).

⁴ Ph. D. Universidad Tecnológica de Pereira (Pereira-Risaralda, Colombia). jsetris@utp.edu.co. ORCID: [0000-0003-3550-8042](https://orcid.org/0000-0003-3550-8042).

⁵ M. Sc. Universidad del Atlántico (Barranquilla-Atlántico, Colombia). cristianpedraza@mail.uniatlantico.edu.co. ORCID: [0000-0002-5951-7835](https://orcid.org/0000-0002-5951-7835).

characterized chemically and microstructurally by X-ray fluorescence and scanning electron microscopy, respectively. In order to evaluate the corrosion behavior of the material, linear polarization resistance and analysis by Tafel plot were used in a 0.6 M NaCl solution for 0 and 24 hours. The results show an atypical behavior regarding the corrosion resistance of AISI 316L steel. An increase in corrosion resistance of 45% of the material was observed after 4 passes per GP compared to annealed material (0 passes).

Keywords: austenitic stainless steel; corrosion rate; groove pressing; linear polarization resistance; severe plastic deformation; Tafel plot.

Evaluación de la resistencia a la corrosión del acero AISI 316L sometido a deformaciones severas mediante la técnica presión calibrada

Resumen

En esta investigación, muestras de acero AISI 316L fueron sometidas a deformación plástica severa por la técnica presión calibrada (GP) mediante el uso de 2 matrices de acero de herramientas tipo A2 con dimensiones de 96 mm X 96 mm, una matriz corrugada con dientes de 2 mm y ángulo de 45° y una matriz plana. Cada pase por la matriz GP incluye 2 estados de corrugado y 2 estados de enderezado con una rotación de 180° entre cada uno de ellos. Esta configuración provee al material una deformación teórica equivalente por pase de $\epsilon \sim 1.16$. Al material fue deformado por 4 pases por GP hasta una deformación equivalente de $\epsilon \sim 4.64$. Previo a la deformación, las probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico de recocido durante una 1 hora a 1000 °C con enfriamiento en agua, con el fin de eliminar la textura de laminación. El material en estado de recocido y deformado se caracterizó química y microestructuralmente mediante fluorescencia de rayos X y microscopía electrónica de barrido, respectivamente. Con el fin de evaluar el comportamiento a la corrosión del material, se utilizó la resistencia a la polarización lineal y el análisis mediante las curvas de Tafel en una solución de 0.6 M de NaCl por un tiempo de 0 y 24 horas. Los resultados muestran un comportamiento atípico en cuanto a la resistencia a la corrosión del acero AISI 316L. Se observó un aumento en la resistencia a la corrosión del 45% del material después de 4 pases por GP en

comparación con el material recocido (0 pases).

Palabras clave: acero inoxidable austenítico; curvas de Tafel; deformación plástica severa; presión calibrada; resistencia a la polarización lineal; velocidad de corrosión.

Avaliação da resistência à corrosão do aço AISI 316I submetido a deformações severas mediante a técnica pressão calibrada

Resumo

Nesta pesquisa, amostras de aço AISI 316L foram submetidas a deformação plástica severa pela técnica pressão calibrada (GP) mediante o uso de 2 matrizes de aço de ferramentas tipo A2 com dimensões de 96 mm X 96 mm, uma matriz corrugada com dentes de 2 mm e ângulo de 45° e uma matriz plana. Cada passe pela matriz GP inclui 2 estados de corrugado e 2 estados de endireitado com uma rotação de 180° entre cada um deles. Esta configuração provê ao material uma deformação teórica equivalente por passe de $\epsilon \sim 1.16$. O material foi deformado por 4 passes por GP até uma deformação equivalente de $\epsilon \sim 4.64$. Prévio à deformação, as provetas foram submetidas a um tratamento térmico de recozimento durante uma 1 hora a 1000 °C com esfriamento em água, com o fim de eliminar a textura de laminação. O material em estado de recozimento e deformado caracterizou-se química e microestruturalmente mediante fluorescência de raios X e microscopia eletrônica de varredura, respectivamente. Com o fim de avaliar o comportamento à corrosão do material, utilizou-se a resistência à polarização linear e a análise mediante as curvas de Tafel em uma solução de 0.6 M de NaCl por um tempo de 0 e 24 horas. Os resultados mostram um comportamento atípico em quanto à resistência à corrosão do aço AISI 316L. Observou-se um aumento na resistência à corrosão de 45% do material depois de 4 passes por GP em comparação com o material recocido (0 passes).

Palavras chave: aço inoxidável austenítico; curvas de Tafel; deformação plástica severa; pressão calibrada; resistência à polarização linear; velocidade de corrosão.

I. INTRODUCCIÓN

Los aceros inoxidable austeníticos (ASS) tienen amplias aplicaciones en campos que incluyen las industrias químicas, nuclear, petroquímica, marítimas y en la tecnología de implantes metálicos debido a sus muy buenas propiedades, como lo es, su excelente resistencia a la corrosión y a la oxidación, buena maleabilidad, soldabilidad y biocompatibilidad. Sin embargo, las aplicaciones del acero inoxidable austenítico están limitadas por su relativamente bajo límite elástico. Debido a que estos materiales no son tratables térmicamente, sus propiedades mecánicas solo pueden mejorarse a través del endurecimiento por trabajo en frío. Con los años, se han hecho muchos esfuerzos para obtener una buena combinación de alta resistencia y excelente plasticidad. El refinamiento de grano mediante técnicas de deformación plástica severa es el enfoque más prometedor para mejorar el límite elástico sin sacrificar la plasticidad teniendo en cuenta que al procesar este material por trabajo en frío, su refinamiento de grano viene acompañado de la transformación de martensita. De ahí la importancia del estudio del efecto de la deformación plástica sobre la resistencia a la corrosión y el comportamiento mecánico de estos materiales [1-3].

Las técnicas de presión calibrada restringida (CGP) y presión calibrada (GP) son técnicas de deformación plástica severa (SPD) en la que se pueden obtener laminas con tamaño de grano ultrafino mediante la aplicación de altas deformaciones cortantes repetitivas. Esto se obtiene deformando laminas entre matrices asimétricas ranuradas y planas (Figura 1), alternadamente.

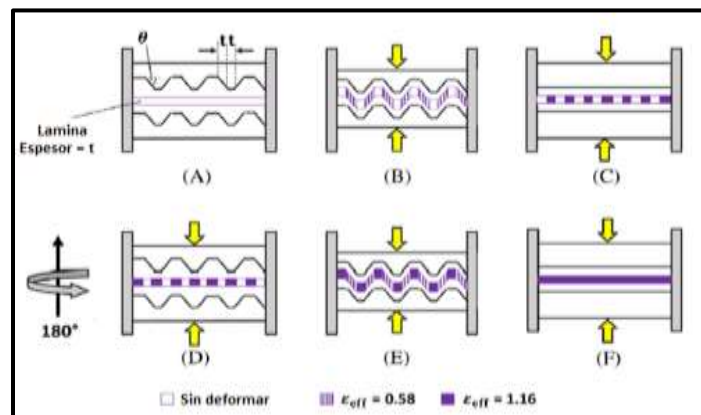


Fig. 1. Presión calibrada restringida (CGP) [5].

Debido a su potencial para la producción industrial a gran escala, este proceso es prospectivo para su aplicación en la industria aeronáutica, aeroespacial, transporte y muchos otros campos de ingeniería [3]. En CGP, la lámina está restringida dentro de la matriz. En cambio, al procesar a través del método presión calibrada (GP), no hay restricción, y la muestra se fluye libremente a lo largo de las direcciones longitudinal y transversal [4].

A la fecha, en la literatura no hay muy pocos trabajos que analicen el efecto de la deformación plástica severa sobre la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables 316L con grano ultrafino. Por lo que en este trabajo se estudia el efecto del refinamiento del grano y la transformación martensítica inducida por deformación mediante la técnica de presión calibrada sobre la resistencia a la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en solución salina [1].

II. METODOLOGÍA

En este estudio se utilizó un acero inoxidable de tipo 316L laminado en frío con acabado 2B y dimensiones de 1524 mm x 3048 mm y 2 mm de espesor. La composición química del material fue suministrada por el fabricante en el certificado de calidad y se corroboró mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (Tabla 1) [6,7].

Tabla 1. Comparación de la composición química suministrada por la empresa productora (YCINOX.LTD), la ASTM A240 y los resultados por XRF [7].

Ítem	Datos del Fabricante	Designación UNS (máx.)	XRF	
			Resultado	Error (±)
Nombre	316L	S31603	316	
Carbono, C	0.018	0.030	No detecta	
Silicio, Si	0.590	0.750	0.339	0.153
Manganeso, Mn	0.740	2.000	0.853	0.080
Fósforo, P	0.035	0.045	0.000	0.093
Azufre, S	0.001	0.030	0.000	0.118
Níquel, Ni	10.220	10.00 - 14.00	10.280	0.270
Cromo, Cr	16.790	16.00 - 18.00	16.696	0.109
Molibdeno, Mo	2.040	2.00 - 3.00	2.062	0.052
Nitrógeno, N	0.010	0.100	No detectado	
Hierro, Fe	*69.556	Balance	69.119	0.866

Para el desarrollo de las pruebas GP, inicialmente se sometieron las placas de 20 mm × 96 mm × 2 mm de acero inoxidable austenítico AISI 316L a un recocido de homogenización a 1000 °C durante 60 minutos a una velocidad de calentamiento de 30°C / min con un posterior enfriamiento en agua. Este proceso se realizó con el fin de eliminar la textura del laminado [7, 14]. Posteriormente, el material fue deformado a temperatura ambiente por la técnica GP a una velocidad de deformación fue de 2 mm/min (Figura 2) hasta una deformación máxima equivalente de $\varepsilon \sim 4.64$ [4] y como lubricante se utilizó disulfuro de molibdeno (MoS_2).

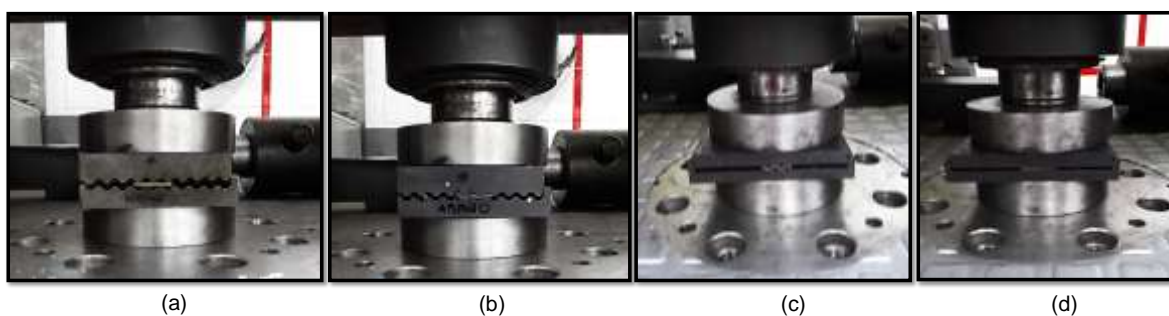


Fig. 2. Probeta sometida a proceso de GP [7, 14].

Para el análisis microestructural se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido. Las muestras fueron cortadas desde el centro de las probetas de GP y pulidas mecánicamente hasta solución de alúmina de 0.3 μm . El equipo utilizado fue un microscopio electrónico de barrido HITACHI SUM3500 a un voltaje de 20 kV [6]. Para el análisis corrosivo se utilizaron las técnicas de resistencia a la polarización lineal (RPL) y el análisis mediante las curvas de Tafel. El equipo utilizado fue el Potenciostato Galvanostato PG - TEKCORR 4.2 USB que cuenta con una tarjeta de adquisición de datos National Instruments NI USB 6009 [8]. Como electrodo de referencia se utilizó un electrodo Calomel saturado (SCE), como contraelectrodo se utilizó un electrodo de grafito y como electrodo de trabajo el material en estudio, con un área de exposición de 1cm². El montaje realizado se resume en la Figura 3.

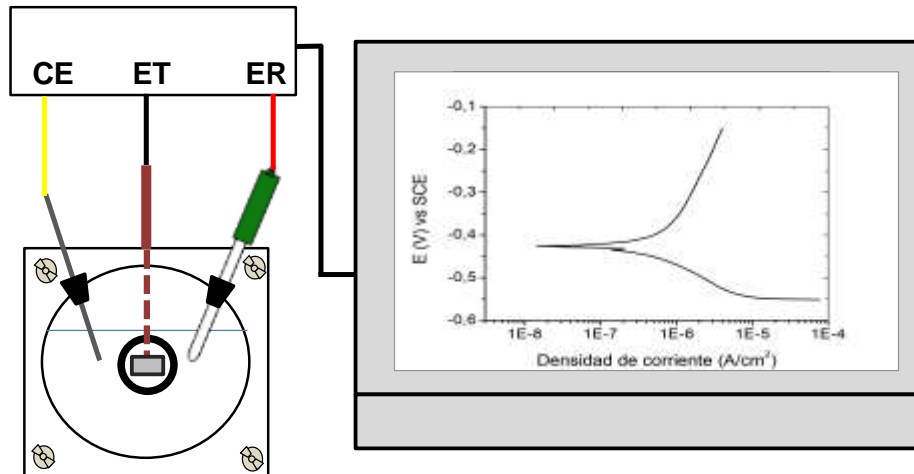


Fig. 3. Esquema de las pruebas electroquímicas.

Como electrolito se utilizó una solución de cloruro de sodio con una concentración de 0.6 M. Primeramente, se realizaron las curvas de polarización lineal y después de 10 segundos, la resistencia a la polarización lineal, con los parámetros descritos a continuación. Para las curvas de Tafel se registraron los datos de voltaje cada 0.5 segundos por un tiempo de 120 segundos (2 min) con el fin de conseguir las pendientes de las curvas anódicas y catódicas. Y para la resistencia la polarización lineal se realizó según la norma ASTM G59-14 [15] en donde los voltajes se llevan desde -20mV hasta +20mV respecto a E_{corr} . La velocidad de barrido fue de 10mV/s registrando el valor de corriente por segundo. Los valores cuantitativos de los parámetros de corrosión, tales como pendientes anódica y catódica (β_a , β_c), constante de Tafel (β), densidad de corriente de corrosión (I_{corr}), potencial de corrosión (E_{corr}) velocidad de corrosión por penetración (V_{corr}) fueron determinadas a partir de las técnicas electroquímicas antes mencionadas. En donde β y V_{corr} se obtuvieron indirectamente de las gráficas de polarización aplicando los criterios de la norma ASTM G102-15 [9].

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se analizará el efecto del grado de deformación plástica severa obtenido mediante la técnica GP sobre el comportamiento a la corrosión del acero inoxidable AISI 316L en solución salina 0.6M.

A. Análisis microestructural

En la Figura 4 se muestran las variaciones microestructurales obtenida para los diferentes grados de deformación obtenidos 0, 1, 2, 3 y 4 pases por GP. Como se puede apreciar hay una reducción del tamaño de grano después del primero pase por GP ($d_{\text{medio}}=11\mu\text{m}$) en comparación con el material en estado de recocido ($d_{\text{medio}}=22\mu\text{m}$) un comportamiento similar fue reportado por Satheesh y Raghu [13], durante el procesamiento por presión calibrada restringida de aluminio puro. El diámetro medio de la aleación deformada por 2, 3 y 4 pases no se pudieron cuantificar debido a la presencia de la martensita inducida por deformación que impidió su visualización. Además, se evidenció después del primer pase la presencia de maclas mecánicas. La presencia de martensita en este material cambió el comportamiento magnético del material [1,7,11,14].

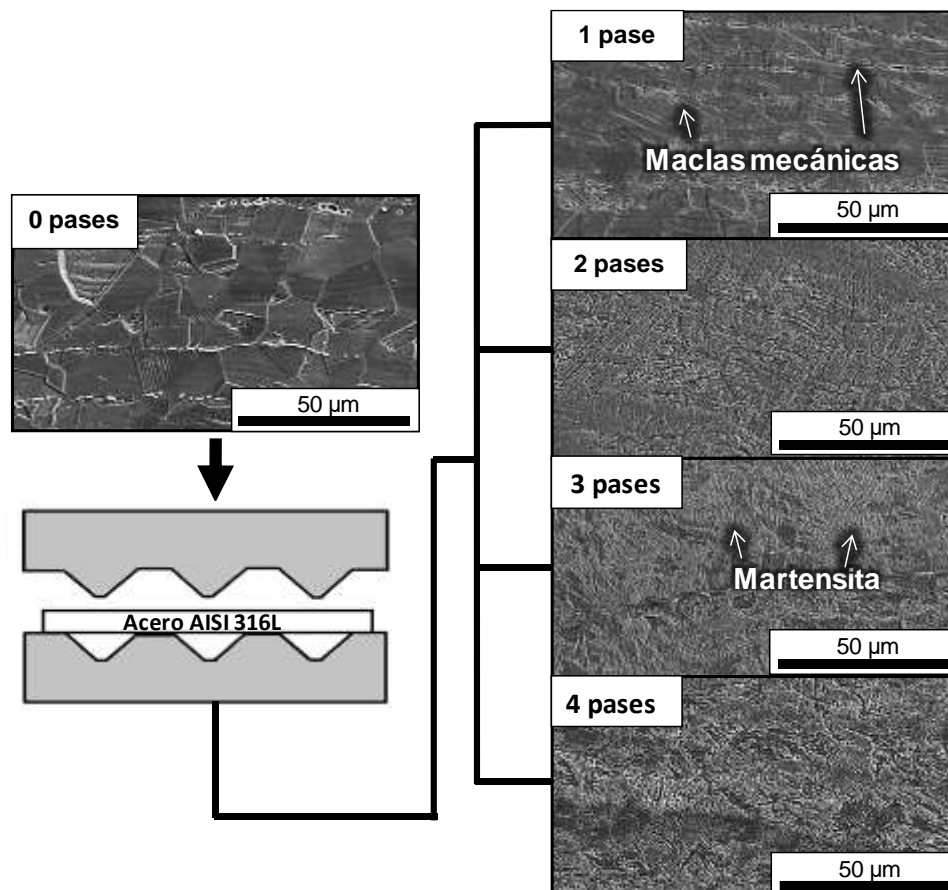


Fig. 4. Evolución de la microestructura del acero AISI 316L deformado por GP [7, 14].

B. Análisis electroquímico

1) **Curvas de Tafel.** En la Figura 5 se muestran los resultados de curvas de Tafel en medio salino al 3.5% NaCl para un tiempo inmersión de 0 y 24 horas para 0, 1, 2, 3, 4 pases.

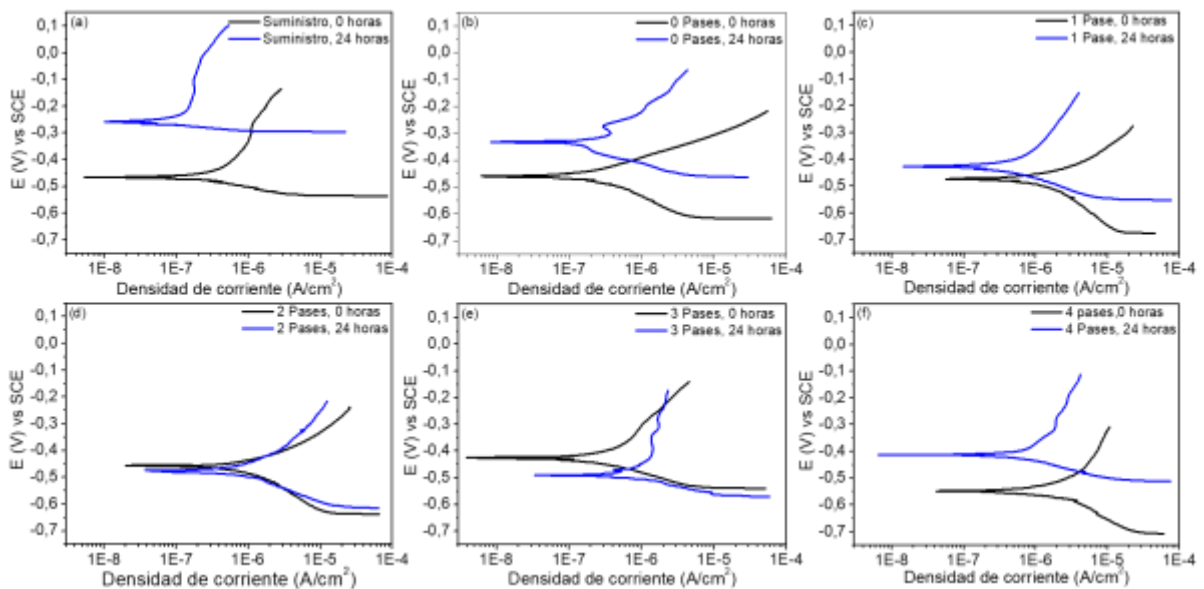


Fig. 5. Curvas de Tafel, (a) suministro, (b) 0 pase, (c) 1 pase, (d) 2 pases, (e) 3 pases, (f) 4 pases.

Como se puede apreciar en todas las curvas obtenidas en la zona de reducción no hay una tendencia lineal de los valores de densidad de corriente a formar una línea vertical paralela al eje del potencial (corriente límite de corrosión) [12]. Además, en la Figura 5 se puede observar que para cada una de las probetas existe una tendencia de mejora en la resistencia a la corrosión, es decir que el potencial de las curvas de Tafel a 24 horas para el material de suministro, 0, 1 y 4 pasadas permanecen por encima de las curvas a 0 horas, siendo estos más positivos, por lo cual, se corrobora que la resistencia a la corrosión para las probetas de 24 horas es mayor, esto se puede explicar por la presencia de una película protectora de óxido de cromo uniforme (Cr_2O_3), este proceso es conocido como pasivación, también se puede observar que para 3 pases, el cambio de la densidad de corriente en la curva anódica con respecto al potencial es menor en comparación con las demás

probetas, lo cual es un indicio de que es más resistente a la corrosión. Finalmente, para 2 pasadas se pudo observar gráficamente que no hubo un cambio significativo ni en los potenciales, ni en las pendientes a 0 y 24 horas, por lo que no se puede obtener una respuesta clara acerca de si la resistencia a la corrosión aumentó o disminuyó. Debido a este comportamiento, fue necesario realizar los cálculos pertinentes que permitieron determinar las velocidades de corrosión, con el fin de realizar un análisis más detallado de su comportamiento corrosivo [8-13]. A través de la asistencia del software PG 01X18E1CE6 del equipo se determinaron las pendientes anódica y catódica (" β_a " pendiente anódica, " β_c " pendiente catódica), las cuales se resumen en las Tablas 2 y 3 con el fin de calcular la pendiente de Tafel " B ", según la norma ASTM-G102-15 [9] y así determinar la velocidad de corrosión [10-12].

2) Resistencia a la polarización lineal (R_p). La Tabla 4 resume los valores de R_p donde " M " es la pendiente y R^2 el factor de correlación, comprobándose la respuesta lineal entre la corriente y el voltaje respecto al E_{corr} planteada por la ecuación de Butler-Volmer para polarizaciones pequeñas (-20mV a +20 mV vs E_{corr}) [12].

Tabla 2. Valores de las curvas de Tafel para 0 horas.

Probeta 0 horas	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	E_{corr} (mV)	B
Suministro	34.95	-33.56	-464.8	7.44
Cero pases	74.88	-74.68	-460	16.26
Un pase	30.8	-30.94	-472.32	6.71
Dos pases	52.36	-52.15	-458.03	11.36
Tres pases	24.44	-24.55	-425.85	5.32
Cuatro pases	60.53	-60.22	-547.45	13.12

Tabla 3. Valores de las curvas de Tafel para 24 horas.

Probeta 24 horas	β_a (mV/dec)	β_c (mV/dec)	E_{corr} (mV)	B
Suministro	19.78	-19.29	-255.420	4.246
Cero pases	84.26	-84.21	-332.080	18.312
Un pase	48.54	-48.75	-426.000	10.575
Dos pases	38.25	-38.75	-475.650	8.369
Tres pases	45.56	-45.46	-488.800	9.893
Cuatro pases	44.84	-44.54	-410.500	9.715

Tabla 4. Resultados de resistencia a la polarización lineal, kΩ

Probeta	Tiempo de exposición			
	0 horas		24 horas	
	M	R ²	M	R ²
Cero pases	32.765	0.9498	33.502	0.9659
Un pase	15.892	0.9769	26.87	0.924
Dos pases	19.000	0.9536	20.212	0.9833
Tres pases	67.918	0.9472	40.836	0.9596
Cuatro pases	11.901	0.9788	23.258	0.9382

Los valores de Rp obtenidos estuvieron entre 11.091 y 67.918 KΩ para 0 horas y para 24 horas se tuvieron valores entre 20.212 y 40.836 KΩ. La Figura 6a muestra la tendencia de la resistencia a la polarización lineal con respecto a los diferentes grados de deformación con 0 y 24 horas de exposición. Teniendo en cuenta los valores descritos en la Tabla 4, se puede observar que hay una tendencia a la disminución a la resistencia a la polarización exceptuando para la probeta de 3 pases, la cual obtuvo el mayor valor de 67.918 kΩ y 40.836kΩ para un tiempo de exposición de 0 y 24 h, respectivamente. El valor más bajo registrado fue para las probetas deformadas durante cuatro pases, con un valor de 11.901 KΩ con el mismo tiempo de exposición (0 horas).

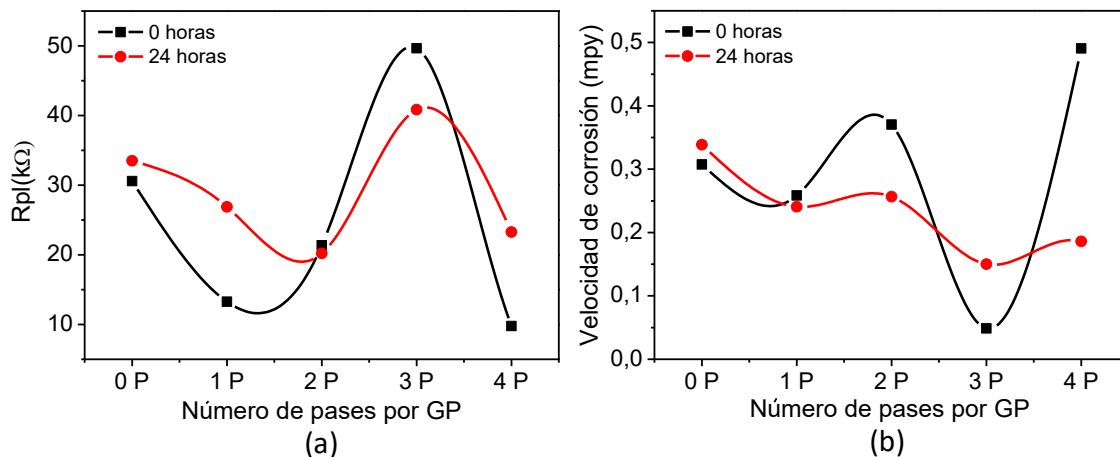


Fig. 6. Efecto del grado de deformación plástica severa por GP sobre (a) Resistencia a la polarización lineal y (b) Velocidad de corrosión para cada tiempo de exposición.

De acuerdo con lo planteado para el cálculo de velocidad de corrosión en la norma ASTM-G102-15 [9], se procedió primeramente a determinar el peso equivalente del material en función de la composición química del acero aportada por el fabricante y las densidades de corriente de corrosión (i_{corr}) que fueron calculados a partir de los valores de resistencia a la polarización y las constantes de Tafel para así determinar la velocidad de corrosión en milipulgadas por año (mpy). El % de error entre los valores teóricos y los experimentales no superó el 0.5%. La Figura 6b muestra el comportamiento de la velocidad de corrosión en milipulgadas por año para diferentes grados de deformación, con respecto al tiempo de exposición en que se realizó la prueba, como se puede detallar para las probetas de 0 horas no se observa una tendencia clara, en cambio para las probetas evaluadas a las 24 horas se observa una mejoría en la resistencia a la corrosión del material con respecto al número de pasadas por GP. Este comportamiento es muy similar al reportado por H. Miyamoto y M. Yuasa, [2], ellos encontraron una mejora notoria en aleaciones de Fe-Cr, en donde la pasivación se torna más estable debido a la formación de granos ultrafinos inducidos por SPD. Termodinámicamente, se ha descrito que el efecto de las tensiones residuales en el metal favorecen el incremento en la tendencia a la corrosión, sin embargo, la energía producida por el trabajo en frío, medido mediante calorimetría de barrido diferencial usualmente es menor que 30 J/g, por lo tanto es mucho menor que el necesario para producir un cambio en la energía libre del sistema [3,10].

IV. CONCLUSIONES

El estudio se realizó con el propósito de obtener un mayor entendimiento sobre el efecto de la deformación plástica severa (SPD) sobre el comportamiento a la corrosión del acero inoxidable austenítico AISI 316L después de ser sometido a la técnica de presión calibrada. El efecto de la deformación plástica sobre este material permite una reducción en el tamaño de grano austenítico y favorece los procesos de maclado mecánico y transformación martensítica inducida por deformación, lo que incrementa la resistencia mecánica del material, afectando su comportamiento

electroquímico. En ese orden de ideas, este trabajo presenta las siguientes conclusiones:

Con la implementación de la técnica de deformación plástica severa tipo presión calibrada (GP), se obtuvo una reducción significativa del tamaño de grano en el material, pasando de granos con diámetro medio de 22.1 μm en estado de recocido a diámetros medios de 11.0 μm después del primer pase por GP, además se evidenció la transformación martensítica inducida por deformación, lo cual se comprobó mediante el cambio en sus propiedades magnéticas.

En cuanto al comportamiento corrosivo, se observó una mayor resistencia a la corrosión a nivel general para las probetas evaluadas después de 24 horas, en comparación a las de 0 horas, esto es debido a la presencia de una capa pasiva en el material (Cr_2O_3), la cual se torna más estable a mayor tiempo de exposición. Los resultados mostraron un comportamiento atípico en cuanto a la resistencia a la corrosión obteniéndose mejoras en el comportamiento corrosivo del material a medida que el tamaño del grano disminuía con el incremento de la deformación plástica en las probetas de 0 a 4 pases. Se observó un aumento en la resistencia a la corrosión del 45%.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

La contribución en el trabajo por parte de los autores se realizó de la siguiente manera: Walter Aragón, Luis Fernández y José Luis Trisancho evaluaron el comportamiento corrosivo del acero 316L sometido a deformación plástica severa por GP; Oscar F. Higuera y Cristian Pedraza desarrollaron las pruebas de deformación plástica por GP y los ciclos térmicos utilizados en el estudio.

REFERENCIAS

- [1] L. Jinlong, L. Hongyun, L. Tongxiang, and G. Wenli, "The effects of grain refinement and deformation on corrosion resistance of passive film formed on the surface of 304 stainless steels," *Materials Research Bulletin*, vol. 70, pp. 896-907, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.06.030>
- [2] S. Tanhaei, K. Gheisari, and S. R. Alavi Zaree, "Effect of cold rolling on the microstructural, magnetic, mechanical, and corrosion properties of AISI 316L austenitic stainless steel," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 25 (6), pp. 630-640, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12613-018-1610-y>

- [3] H. Miyamoto, M. Yuasa, R. Muhammad, and H. Fujiwara, "Corrosion Behavior of Severely Deformed Pure and Single-Phase Materials," *Materials Transactions*, vol. 60 (7), pp. 1243-1255, 2019. <https://doi.org/10.2320/matertrans.mf201935>
- [4] X. Wu, Y. Li, Y. Guo, Q. Ruan, and J. Lu, "Grain refinement and mechanical properties of metals processed by constrained groove pressing," *Materials Science and Engineering*, vol. 504, e 012027, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/504/1/012027>
- [5] G. Faraji, H. Kim, and T. Kashi, *Severe plastic deformation: methods, processing and properties*, United Kingdom, Oxford: Elsevier, 2018.
- [6] NKS, *Aceros Inoxidables 316 y 316L*. <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/>
- [7] B. Fontalvo-Gelvez, and E. S. Jiménez-Lora "Comportamiento mecánico de un acero AISI 316L sometido a deformación plástica severa por la técnica presión calibrada," Grade Thesis, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2018
- [8] INCETEMA, *Potencióstat Galvanostat PG - Tekcorr 4.2 USB*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [9] American Society for Testing and Materials, *G102-Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements*, 2015.
- [10] S. Kumar, and T. Raghu, "Structural and mechanical behaviour of severe plastically deformed high purity aluminium sheets processed by constrained groove pressing technique," *Materials & Design*, vol. 57, pp. 114-120, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.053>
- [11] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraww Hill Book Company, 1988.
- [12] J. Avendaño, and E. Escobar, "Estudio de la resistencia a la corrosión de la aleación Ni₂+XMn₁-XGa en soluciones de NaCl y H₂SO₄ mediante técnicas electroquímicas," Grade Thesis, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia, 2016.
- [13] R. Wiston, and H. Uhlig, "Corrosion and Corrosion Control", *Passivity*, Eds. New Jersey: Wiley-Interscience, 2014, pp 90-95.
- [14] E. S. Jiménez-Lora, B. A. Fontalvo-Gélvez, O. F. Higuera-Cobos, I. C. Niño-Camacho, and H. A. González-Romero, "Effect generated by the calibrated pressure in the metallographic structure and mechanical properties of AISI 316L austenitic stainless steel," *Prospectiva*, vol. 17 (1), 70-74, 2019. <https://doi.org/10.15665/rp.v17i1.1825>
- [15] American Society for Testing and Materials, *G59 - Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*, 2014.