



Análisis cuantitativo de un acero austéntico forjado y nitrurado por plasma

Ricardo Reyes Hernández^{*1}, Horacio Martínez Valencia², David Juárez Romero¹, Víctor Zezatti Flores¹, Oscar Sotelo Mazon², Arianna Parrales Bahena¹, Angel Tlatelpa Becerro³

¹Centro de Investigación en Ingeniería Y Ciencias Aplicadas (CIICAp), UAEM, Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México; ²Instituto de Ciencias Físicas (ICF), UNAM, Av. Universidad 2001, Col. Chamilpa, 62210, Cuernavaca, Morelos, México; ³Escuela de Estudios Superiores de Yecapixtla (EESY), UAEM, Avenida Félix Árias, 62824, Yecapixtla, Morelos, México.

Keys: *Stainless steel, Austenit, Forge, Plasm, Nitrured*; **Claves:** *Acero inoxidable, Austenita, Forjado, Plasma, Nitrurado*.

ABSTRACT

Quantitative analysis of an austenitic steel forged and plasma nitrided. We developed a 18Cr-18Mn steel intended for retaining rings in electric generators. In its austenitic phase, predicted using the Schaeffler diagram, a Nieq>30 corresponds to an austenitic steel for a Creq of 20.7; however, once forged and nitrided, it acquires duplex traits, exhibiting high corrosion resistance and immunity to stress corrosion. In addition, we present a study and discussion on nitrogen concentration together with analytical results of the steel's crystalline structure, its phases, and the corrosion tests performed.

RESUMEN

Diseñamos un acero 18Cr-18Mn destinado a anillos de retención en generadores eléctricos. En su fase austenítica, prevista mediante el diagrama de Schaeffler, un Nieq>30 corresponde a un acero austenítico para un Creq de 20.7; sin embargo, tras forjarlo y nitrurarlo, adquiere rasgos dúplex, mostrando elevada resistencia a la corrosión y ausencia de susceptibilidad a corrosión bajo esfuerzo. Asimismo, incluimos un estudio y discusión sobre la concentración de nitrógeno junto con resultados analíticos de la estructura cristalina del acero, de sus fases y de las pruebas de corrosión efectuadas.

Revista Boliviana de Química, 2026, 43, 32-42
ISSN 0250-5460, Rev. Bol. Quim. *Paper edition*
ISSN 2078-3949, Rev. boliv. quim. *e-edition, Jan-Jun*
30 junio 2026, <https://doi.org/10.53287/pyii9560fa09k>
© 2026 Universidad Mayor de San Andrés,
Facultad de Ciencias Puras y Naturales,
Carrera Ciencias Químicas, Instituto de Investigaciones Químicas
<https://bolivianchemistryjournaliiq.umsa.bo>

¹Received October 25, 2025, accepted June 1, 2026, published June 30, 2026. *Mail to: ricardo.reyes@uaem.mx

INTRODUCCIÓN

Los anillos de retención de turbinas en generadores eléctricos se fabricaban con acero 18Cr-4Ni. Este material sufrió fallas graves ocasionadas por corrosión bajo esfuerzo; la solución fue emplear anillos de retención elaborados con acero 18Cr-18Mn, el cual no presenta susceptibilidad a corrosión bajo esfuerzo. Este tipo de acero es no magnético y ofrece una elevada resistencia frente a la corrosión¹.

Este material ha sido objeto de numerosos estudios debido a su elevada resistencia frente a la corrosión bajo esfuerzo. Sin embargo, se ha prestado poca atención a su comportamiento frente a la corrosión general y localizada, así como a los mecanismos que explican la modificación de sus fases cuando se incorpora nitrógeno al acero. Según Erozi, los aceros nitrurados exhiben buenas propiedades mecánicas gracias a la estabilidad de su fase austenítica, lo que representa una alternativa favorable para resolver los problemas que afectan a los anillos². En general, la nitruración de los aceros mejora tanto sus propiedades mecánicas como su resistencia a la corrosión³.

Nosotros presentamos solución a este problema, mostrando una predicción del comportamiento del acero, apoyados en el diagrama de Schaeffler y un estudio matemático completo de la difusión intersticial de nitrógeno en el material, así como los resultados de tres pruebas de corrosión básica, polarización potencio dinámica, impedancia electroquímica y ruido electroquímico, al someter al material a un medio salino (3.5 % de NaCl). Estos estudios son la mejor solución para tener un conocimiento amplio del nuevo acero utilizado para anillos de retención. Patra, Nayak, Singhal y Pal señalan que el modelo matemático para predecir el nitrógeno en un acero inoxidable resulta útil⁴ además de los métodos más tradicionales como el de WPPM de Fourier⁵.

Una limitante para considerar es la falta de información sobre el acero 18Cr-18Mn, que era muy limitada cuando se inicia el estudio. Con el estudio se espera ampliar el conocimiento de este acero, además de dar a conocer que para un valor de $Ni_{eq} > 30$, equivale a un acero austenítico, lo que se puede observar en el diagrama de Schaeffler, y que este valor de Ni_{eq} varía de forma drástica al modificar el contenido de carbono y/o nitrógeno en el acero. Pequeñas variaciones de carbono o de nitrógeno en el acero pueden provocar cambios de fase.

Un acero inoxidable austenítico tiene una gran resistencia a la corrosión por picaduras, mucho mayor que la del acero inoxidable dúplex y aún mayor que la de un acero ferrítico. La adición de nitrógeno a los aceros austeníticos aumenta la resistencia a la picadura. La adición de nitrógeno en los aceros hace crecer el contenido de austenita, aproximadamente 200 veces el porcentaje de nitrógeno adicionado, 36 % de austenita al adicionar 0.02 % de nitrógeno, hasta 100 % de austenita al adicionar 0.40 % de nitrógeno.

EXPERIMENTAL

Se trabajó con 4 tipos de muestras: el acero de llegada 18Cr-18Mn, el acero 18Cr-18Mn forjado, el acero 18Cr-18Mn nitrurado y el acero 18Cr-18Mn forjado nitrurado.

El acero 18Cr-18Mn se desarrolló en un horno de inducción magnética. La composición del acero se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición del acero 18Cr-18Mn inicial

Elemento	Porcentaje en peso [%]
Fe	61.24
Cr	18
Mn	17
Si	1.8
C	1.96

Se cortaron muestras de 1 cm de ancho por 1 cm de largo y 2 mm de espesor; se desbastaron con lijas de agua; posteriormente, se pulieron con paño hasta llegar a espejo, finalmente, se aplicó un ataque químico (Nital II) para observar su microestructura. A estas las llamamos acero inicial.

Para la obtención de las muestras nitruradas, se realiza una limpieza previa con argón a una presión de 2×10^{-2} atm. Posteriormente, el tratamiento por plasma se realizó a 400 °C durante 8 h utilizando una mezcla gaseosa compuesta

por 20% de N_2 y 80% de H_2 , a una presión de 400 Pa. La potencia de descarga fue de 300 V y la corriente de descarga de 0.12 A (36 W). La Figura 1 muestra la microestructura observada al microscopio óptico de barrido de las muestras de acero nitrurado⁶.

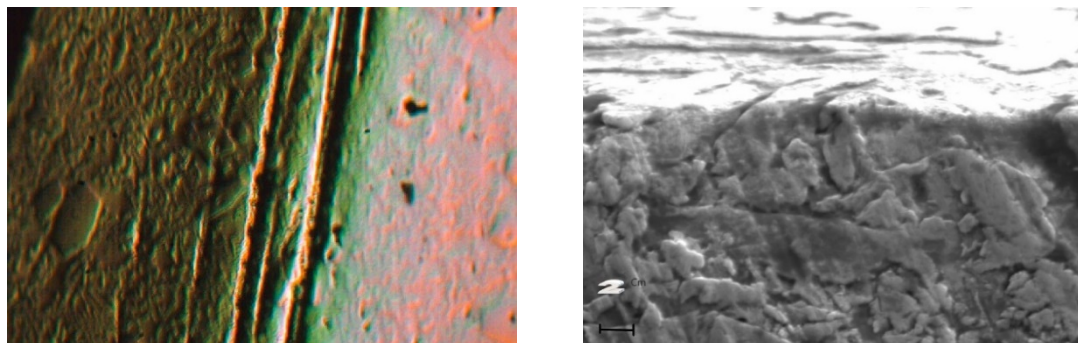


Figura 1. Acero 18Cr-18Mn nitrurado.

El proceso de forjado a partir del acero inicial se llevó a cabo a 1100 °C en un horno eléctrico tipo mufla y, posteriormente, se aplicó la fuerza necesaria mediante una prensa hidroneumática de 50 toneladas⁷.

Se obtuvieron muestras forjadas y nitruradas mediante nitruración del acero forjado por plasma.

Se obtuvieron las microestructuras de cada acero mediante un microscopio óptico de barrido y la composición y las fases presentes mediante difracción de rayos X. Se determinó la microdureza de cada acero con un microdurómetro Vickers.

Se realizaron pruebas de polarización potenciodinámica a cada acero, con una velocidad de barrido de 1 mV/s; pruebas de impedancia electroquímica con una amplitud de 10 mV, un rango de frecuencia de 1 mHz a 10 KHz durante 24 h con pausas de 1 hora entre prueba y prueba; ruido electroquímico con dos electrodos de trabajo idénticos en una secuencia de 2048 segundos con adquisición de datos cada segundo.

RESULTADOS, DISCUSIÓN

Fases presentes en el material

Se utiliza el diagrama de Schaeffler (Figura 2) para predecir las fases presentes en el acero[6]; se calculan los valores de Cr_{eq} y Ni_{eq} , de acuerdo con las fórmulas:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + (1.5) (Si)$$

Ecuación 1

$$Ni_{eq} = Ni + (0.87) (Mn) + (30) (C) + (18) (N)$$

Ecuación 2

Para el acero 18Cr-18Mn de llegada:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + (1.5) (Si) = 18 + 0 + (1.5) (1.8) = 20.7$$

$$Ni_{eq} = Ni + (0.87) (Mn) + (30) (C) + (18) (N) = 0 + (0.87) (18) + (30) (1.96) + (18) (0.56) = 73.59$$

Se puede observar en el diagrama de Schaeffler que, para un $Cr_{eq} = 20.7$, se obtienen valores de $Ni_{eq} > 30$, con fase austenítica en el acero. El diagrama de Schaeffler permite predecir la fase presente en el acero 18Cr-18Mn. Se obtuvo un valor de Ni_{eq} de 73.59, muy alto; por lo tanto, de acuerdo con el diagrama de Schaeffler, el acero presenta la fase austenítica. El acero nitrurado presenta una transformación de ferrita a austenita⁶. Se comprueba la existencia de la fase austenita presente en el acero, con un microscopio electrónico de barrido (SEM) y mediante la técnica de Difracción de Rayos X (XRD)

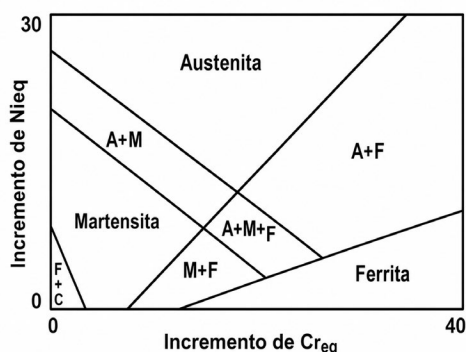


Figura 2. Diagrama de Schaeffler [6].

La Figura 3 muestra que el nitrógeno incrementa la proporción de la fase austenítica en el acero⁸. Hartline encontró que los aceros austeníticos presentan mayor resistencia a la corrosión por picaduras que los aceros dúplex y, a su vez, mayor resistencia que los aceros ferríticos, lo cual representa un factor adicional en las propiedades de los aceros austeníticos⁹.

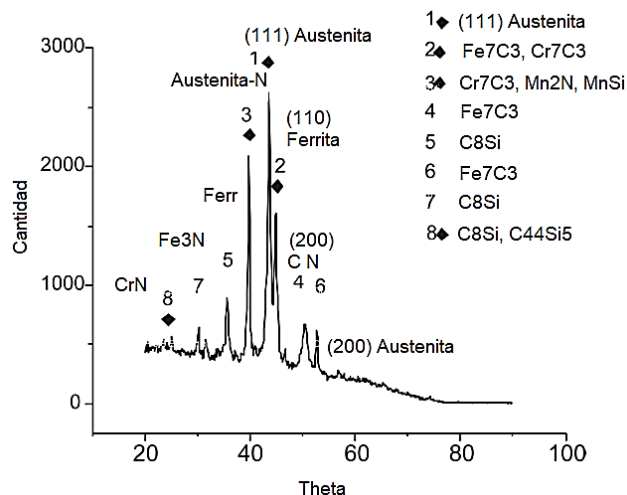


Figura 3. 18Cr-18Mn XRD.

El valor de Ni_{eq} tan alto encontrado se debe al alto contenido de carbono de este. El contenido de carbono es un factor determinante para que en el acero existan una o varias fases. Siderey encontró en su trabajo la formación de precipitados de nitruros de cromo en los límites de grano¹⁰. Para el acero nitrurado:

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + (1.5) (Si) = 18 + 0 + (1.5) (1.8) = 20.7$$

$$Ni_{eq} = Ni + (0.87) (Mn) + (30) (C) + (18) (N) = 83.67$$

El aumento del valor del Ni equivalente indica un incremento de la fase austenita en el acero, el nitrógeno favorece la fase austenita [8]. Se observa que la adición de nitrógeno intersticial al acero amplifica el pico de la fase ferrita en el difractograma. El acero inoxidable austenítico con alto contenido de Mn y N y posterior a la nitruración, forma nitruros de cromo, el nitrógeno favorece la formación y estabilidad de la película pasiva protectora, mejorando significativamente la resistencia a la corrosión del material, especialmente por picaduras, y aumenta la resistencia al desgaste^{11 12 13}.

La Figura 4 evidencia la formación de carburos de cromo (Cr₃C₂, Cr₇C₃ y Cr₂₃C₆) en proporciones relativamente bajas, debido a la elevada concentración de cromo en comparación con el carbono. Estos carburos se caracterizan por su notable dureza, lo que les confiere gran resistencia al desgaste, además de una excelente estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. En los ensayos de corrosión, la Figura 5 muestra las curvas de polarización del acero bajo

distintas condiciones: el acero en estado inicial presenta una densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) superior a 0.048 A/cm^2 ; el acero forjado alcanza un valor de 0.014 A/cm^2 ; y el acero nitrurado registra el valor más bajo, 0.010 A/cm^2 . En cuanto al potencial de corrosión (E_{corr}), el acero de llegada exhibe el valor más alto (-860 mV), lo que indica mayor susceptibilidad a la corrosión; el acero forjado presenta -900 mV y el acero nitrurado -950 mV [6, 8].

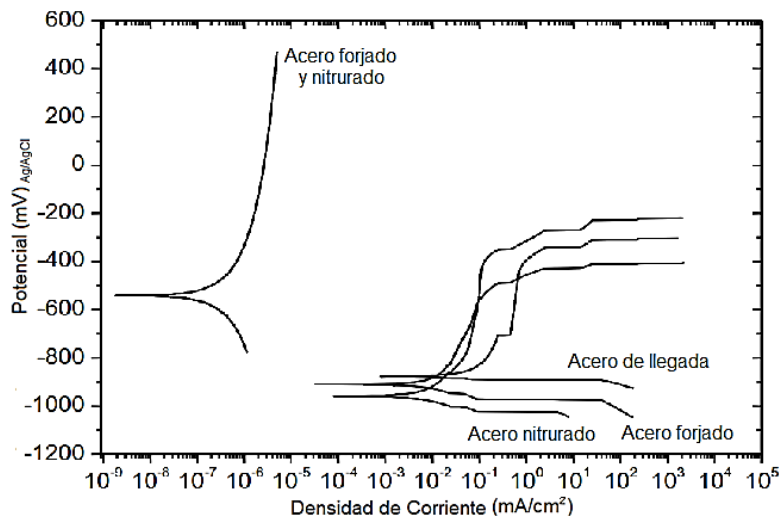


Figura 4. Curva de polarización de los diferentes aceros.

Estructura Cristalina

De la difracción de rayos X, tenemos que en el plano (111) el valor de 2θ es 43.485° y la longitud de onda (λ) es 0.154184 nm ; a partir de estos valores se puede determinar el valor del parámetro de red.

Determinamos el parámetro de red a_0 de la austenita en el plano (111), utilizando la Ecuación 3:

$$a_0 = [(\lambda^2) * (h^2 + k^2 + l^2) / (4 * \sin^2 \theta)]^{1/2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$a_0 = [(0.154184)^2 * (1^2 + 1^2 + 1^2) / 4 * (\sin^2 1.7425)]^{1/2} = 0.36 \text{ nm}$$

Calculamos la distancia interplanar del Fe en el plano (111) con la ecuación 4:

$$d_{hkl} = (a_0) / (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$d_{hkl} = 0.36 / (1^2 + 1^2 + 1^2)^{1/2} = 0.2078 \text{ nm}$$

Donde h, k y l son los índices de Miller del plano.

Calculamos el factor de empaquetamiento del Hierro en la celda FCC, con la ecuación 5:

$$\text{Factor de empaquetamiento (FCC)} = \frac{[(\text{Número átomos/celda}) (\text{Volumen átomo})]}{(\text{Volumen celda})} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\text{Factor de empaquetamiento (FCC)Fe} = \frac{[(4) (\frac{4}{3} \pi r^2)]}{(a_0)^3} = 0.74$$

Calculamos la densidad de la celda con la ecuación 6:

$$\rho = [(\text{Numero de átomos de Fe}) (\text{Peso molecular del Fe}) + (\text{Numero de átomos de C}) (\text{Peso molecular del C})] / [(\text{Volumen de la celda}) (\text{Numero de Avogadro})] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\rho = [(4 \text{ átomos})(55.845 \text{ g/cm}^3) + (4 \text{ átomos})(12.0107 \text{ g/cm}^3)] / [(3.6 \times 10^{-9} \text{ cm})^3 (6.023 \times 10^{23} \text{ átomos/mol})]$$

$$\rho = 271.4228 / 0.0281 = 9,658.86 \text{ g/cm}^3$$

Solubilidad del nitrógeno en el acero

Para calcular la solubilidad del N (porcentaje en peso) en aceros austénicos con alto contenido de Mn y Cr, utilizamos la ecuación 7:

$$\%N = 0.067\%Cr + 0.02\%Mn + 0.04\%Mo - 0.01\%Ni$$

Ecuación 7

$$\%N = (0.067)(18) + (0.02)(17) + (0.04)(0) - (0.01)(0)$$

$$\%N = 1.206 + 0.34 + 0 - 0 = 1.546$$

Concentración de nitrógeno vs distancia de difusión

Calculamos la concentración de nitrógeno a una distancia "x" de la superficie, con la ecuación 8:

$$C(x) = \left[\frac{(C_o)}{(4\pi Dt)^{1/2}} \right] \left[e^{\left[\frac{(-x^2)}{(4Dt)} \right]} \right]$$

Ecuación 8

Dónde:

C(x) = concentración a "x" distancia de la cara (variable dependiente)

t = tiempo de tratamiento (variable independiente)

D = coeficiente de difusión de nitrógeno

C_o = concentración en la cara superior

El valor del coeficiente de difusión lo obtuvimos mediante la Ecuación 9.

$$D = \frac{d^2}{t}$$

Ecuación 9

Podemos observar en la Figura 5 el crecimiento lineal de la capa nitrurada en el acero 18Cr-18Mn, tanto en el acero de llegada como en el forjado. Sin embargo, la velocidad de crecimiento de la capa nitrurada en el acero forjado es mayor.

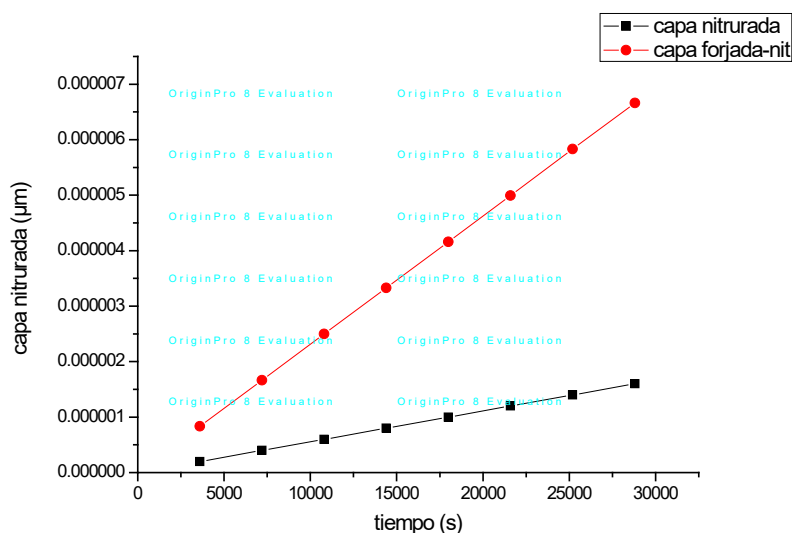


Figura 5. Capa nitrurada vs. tiempo.

En la Figura 6 observamos cómo varía el coeficiente de difusión con el tiempo. El valor del coeficiente de difusión del nitrógeno aumenta más rápidamente en el acero previamente forjado.

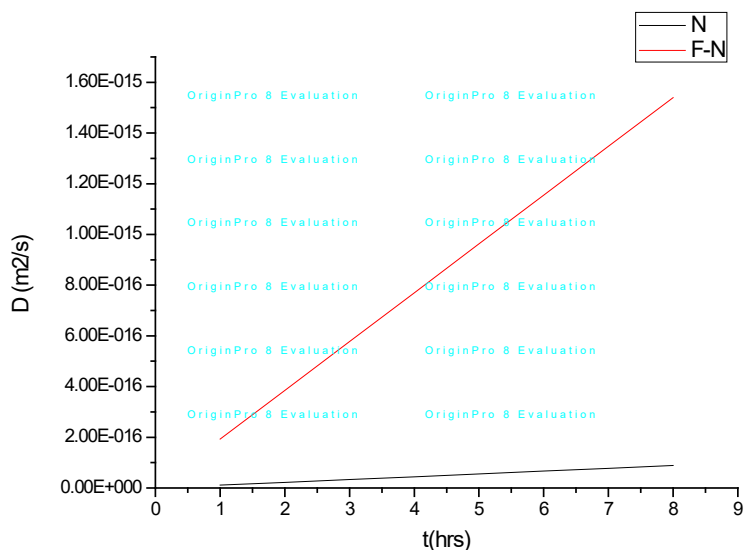


Figura 6. Coeficiente de difusión de nitrógeno vs. tiempo.

En la Figura 7 observamos la variación de forma exponencial de la concentración del nitrógeno (% en masa) a través del tiempo de tratamiento. La concentración de nitrógeno decrece a medida que transcurre el tiempo; una respuesta de este comportamiento es que en la difusión de nitrógeno en forma intersticial se inicia hasta saturar un área del material y entonces continúa la difusión saturando otra área, esa saturación de nitrógeno en la zona, es la que causaría la disminución de concentración a medida que transcurre el tiempo del tratamiento.

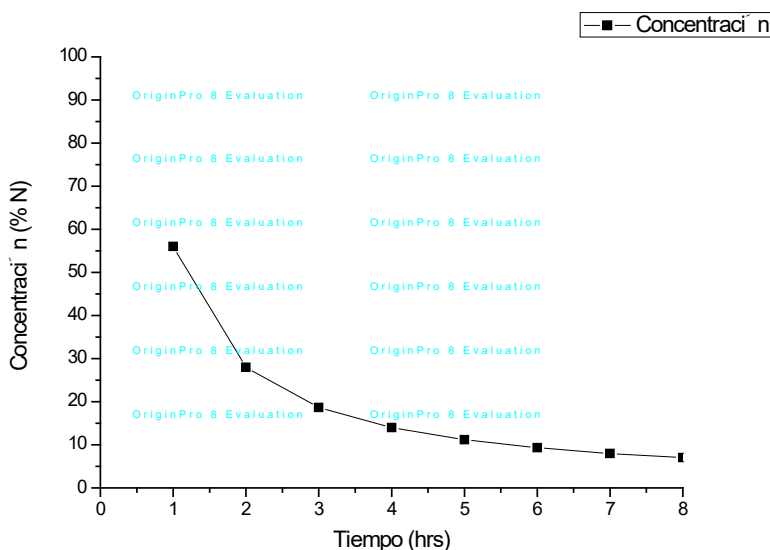


Figura 7. Concentración de nitrógeno en el acero nitrurado.

Resistencia a la picadura del acero

Calculamos la resistencia a la picadura del acero con la Ecuación 10:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + (3.3) (\% \text{Mo}) + (X) (\% \text{N})$$

Ecuación 10

Pitting Resistance Equivalent Number (Para aceros con alto contenido de N)

Dónde:

X= 16 para aceros austeníticos

X= 30 para aceros dúplex

Encontramos para el acero de llegada:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + (3.3) (\% \text{Mo}) + (X) (\% \text{N}) = 18 + (3.3) (0) + (16) (0) = 18$$

Encontramos para el acero nitrurado:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + (3.3) (\% \text{Mo}) + (X) (\% \text{N}) = 18 + (3.3) (0) + (16) (0.56) = 26.96$$

Como lo indica la literatura, al adicionar nitrógeno en el acero, la resistencia a la picadura aumenta.

De las gráficas de LPR se obtienen los valores de Resistencia a la Polarización (RP), tal como lo muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la prueba de Resistencia a la polarización lineal (LPR)

Acero	Resistencia a la Polarización Lineal (Ohm.cm ²)	i _{corr}
18Cr-18Mn	122.19	0.21348
18Cr-18Mn-F	341	0.0765
18Cr-18Mn-N	527.3	0.04947
18Cr-18Mn-F-N	1.612x10 ⁸	1.619x10 ⁻⁷

a) Acero 18Cr-18Mn

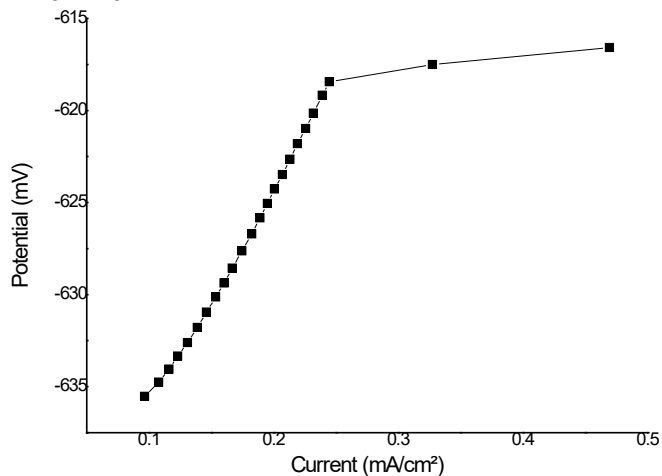
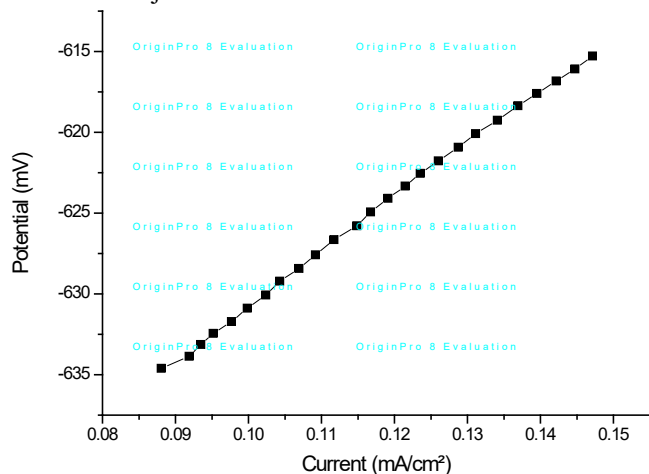
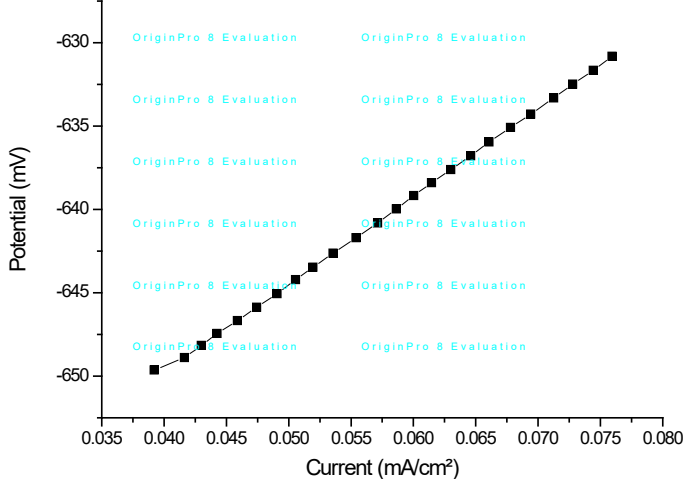


Figura 7a. Resultado de las pruebas de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR). a) Acero 18Cr-18Mn

b) 18Cr-18Mn forjado



c) 18Cr-18Mn nitrurado



d) 18Cr-18Mn forjado nitrurado

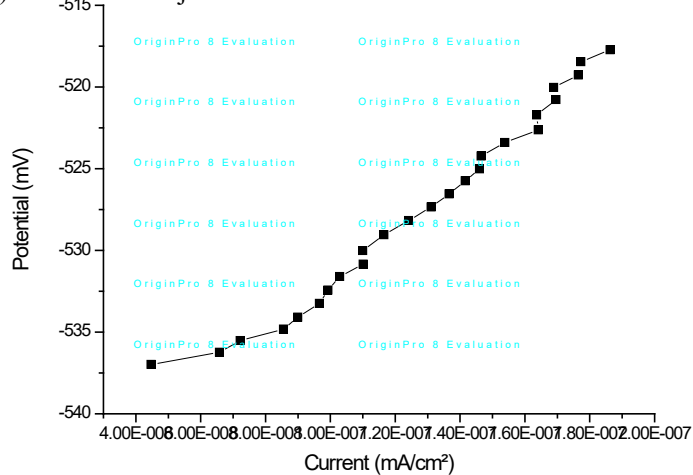


Figura 7a. (cont.). Resultados de las pruebas de Resistencia a la Polarización Lineal (LPR). b) 18Cr-18Mn forjado, c) 18Cr-18Mn nitrurado y d) 18Cr-18Mn forjado nitrurado.

Tabla 3. Velocidad de corrosión (datos obtenidos de la prueba de LPR)

Acero	Velocidad de corrosión	
	(mm/año)	(cm/h)
18Cr-18Mn	2.3973	2.7366×10^{-5}
18Cr-18Mn forjado	0.85909	9.70319×10^{-6}
18Cr-18Mn nitrurado	0.5555	6.3413×10^{-6}
18Cr-18Mn forjado y nitrurado	1.818×10^{-6}	2.075×10^{-11}

Se calcula, además, la pérdida de masa con la Ecuación 11.

$$W = \frac{(At \text{ Velocidad de corrosión})}{1 \times 10^4} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde W es la pérdida de masa en gramos, A es el área de la muestra, t es el tiempo de exposición. A partir de los datos, encontramos que:

$$W_{18\text{Cr-18Mn}} = (2.7366 \times 10^{-9}) \cdot t \quad W_{18\text{Cr-18Mn forjado}} = (9.703 \times 10^{-10}) \cdot t$$

$$W_{18\text{Cr-18Mn nitrurado}} = (6.3413 \times 10^{-10}) \cdot t \quad W_{18\text{Cr-18Mn forjado y nitrurado}} = (2.075 \times 10^{-15}) \cdot t$$

En la Figura 8 se muestran los resultados analíticos de la pérdida de masa de los cuatro aceros en función del tiempo de exposición.

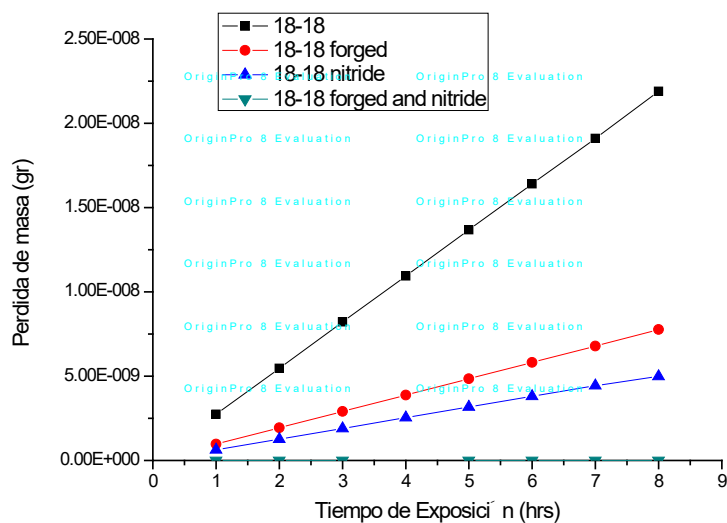


Figura 8. Pérdida de masa en función del tiempo.

La pérdida de masa es mayor en el acero de llegada y menor en los aceros nitrados; en el brasero 18Cr-18Mn forjado y posteriormente nitrurado, la pérdida de masa es casi nula, lo que indica que el acero forjado y posteriormente nitrurado adquirió excelentes propiedades de resistencia a la corrosión, incluso mejores que las del acero que sólo fue nitrurado¹⁴. Li menciona la importancia del diseño teniendo en cuenta la corrosión a altas temperaturas y la plasticidad del acero inoxidable austenítico¹⁵.

CONCLUSIONES

El acero 18Cr-18Mn forjado nitrurado es el que presenta la más alta resistencia a la corrosión, en comparación con los otros tres aceros estudiados, el acero que solo fue forjado presenta el menor valor de resistencia a la corrosión, esto debido a que existe una depleción de cromo en el material (el carbono toma cromo de la matriz para formar carburos de cromo, dejando zonas de la matriz con menor cantidad del 10.5 % de cromo; estas zonas dejan por lo tanto su característica de no oxidarse, volviéndose menos resistentes a la corrosión).

Los resultados obtenidos indican que la adición de nitrógeno favorece la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión del acero. Esto se pudo calcular mediante fórmulas y comprobar con un equipo experimental.

El acero forjado nitrurado presenta características de un acero dúplex, lo que lo hace un material adecuado para anillos de retención, ya que no es susceptible a la corrosión bajo esfuerzo (SCC) y presenta una muy alta resistencia a la corrosión en medios salinos.

REFERENCIAS

- ¹ L. W. Xu, H. B. Li, Z. H. Jiang, M. H. Cai, W. C. Jiao, H. Feng, and P. C. Lu, *Steel Res. Int.*, 2020, **91**, 2000035. DOI: 10.1002/srin.202000035.
- ² R. O. P. K. Erozi, *Mater. Technol.*, 2017, **51**, 933.
- ³ C. Zhang, Q. Hu, H. Fang, Z. Peng, and J. Liu, *J. Mater. Res. Technol.*, 2024, **31**, 2531. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.07.012.
- ⁴ S. Patra, J. Nayak, L. Singhal, and S. Pal, *Steel Res. Int.*, 2017, **88**, 1600271. DOI: 10.1002/srin.201600271.
- ⁵ E. Romanczuk, K. Nowik, and B. Sztorch, *Crystals*, 2022, **12**, 1233. DOI: 10.3390/cryst12091233.
- ⁶ R. R. Hernandez, A. Torres-Islas, S. Serna, A. Bedolla, A. Molina, J. Colin, and H. Martinez, *J. Adv. Electrochem.*, 2016, **2**, 117. <https://www.jacsdirectory.com/journal-of-advanced-electrochemistry/articleview.php?id=29>
- ⁷ J. C. Lippold and D. J. Kotecki, *Weld. Metall. Weld. of S. S.*, 2nd ed.; Wiley, Hoboken, NJ, 2021. DOI: 10.1002/9781118960334.
- ⁸ R. Reyes-Hernández, A. Torres-Islas, S. Serna, A. Molina-Ocampo, J. Coli, and A. Bedolla, *S. Afr. J. Chem.*, 2017, **70**, 108. DOI: 10.17159/0379-4350/2017/v70a15.
- ⁹ A. G. Hartline, *Metall. Trans.*, 1974, **5**, 2271-2276. DOI: 10.1007/BF02644006.
- ¹⁰ N. Siredey-Schwaller, P. Charbonnier, Y. Zhang, J. Guyon, O. Perroud, and P. Laheurte, *Materials*, 2022, **15**, 7505. DOI: 10.3390/ma15217505.
- ¹¹ M. Cheng, P. He, L. Lei, X. Tan, X. Wang, Y. Sun, and Y. Jiang, *Corros. Sci.*, 2021, **183**, 109338. DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109338.
- ¹² P. Saravanan and V. Raja, *Int. J. Mater. Chem. Phys.*, 2015. <http://aiscience.org/journal/ijmcp>
- ¹³ Y. S. Lim, J. S. Kim, S. J. Ahn, H. S. Kwon, and Y. Katada, *Corros. Sci.*, 2001, **43**, 53. DOI: 10.1016/S0010-938X(00)00074-3.
- ¹⁴ G. Balachandran, M. L. Bathia, N. B. Ballal, and P. K. Rao, *ISIJ Int.*, 2000, **40**, 501. https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/40/5/40_5_501/_pdf
- ¹⁵ D. Li, Q. Dai, and X. Cheng, *High Temp. Mater. Process.*, 2013, **32**, 1. DOI: 10.1515/htmp-2012-0105.