

CORROSION BEHAVIOR OF SINTERED FERRITIC STAINLESS STEELS WITH BORON ADDITIONS

<u>J. A. Cabral Miramontes¹</u>, J. D. O. Barceinas Sánchez², F. Almeraya Calderón³, A. Martínez Villafañe³, J. G. Chacón Nava³

¹Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I. P. N. Unidad Querétaro. Libramiento Norponiente 2000, C.P. 76117, Fracc. Real de Juriquilla, Querétaro, Qro., México.

² Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada I.P.N., Cerro Blanco 141, C.P. 76090, Colinas del Cimatario, Querétaro, Qro., México.

³Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados S. C. Departamento de Física de Materiales/Grupo Corrosión. Miguel de Cervantes 120, C. P. 31109, Complejo Industrial Chihuahua. Chihuahua, Chih., México. E-mail: jcabral@qro.cinvestav.mx

ABSTRACT

Nowadays, industries producing steel parts by powder metallurgy (PM) have expanded faster than those using the conventional process. This is due to the PM oustanding advantages such as the fabrication of high quality parts with almost any geometry, strict dimensional tolerances, energy savings and lower production costs. However, despite these advantages, their applications could be limited under corrosive environments i. e. special care shoul be taken against corrosion. Better properties of the sintered products can be obtained when the sintering process is carried out in liquid phase, which can lead to higher densification, and this can be achieved by boron addition to the stainless steel powders. The aim of this work was to evaluate the corrosion behavior of a sintered 409Nb stainless steel with different boron contents (0.8%wt, 1.0%wt, and 1.2 %wt), exposed to two test solutions i.e. 0.5M H₂SO₄ and 0.5M NaCl. Thus, various electrochemical techniques such as linear polarization resistance (LPR), potentiodynamic polarization curves (PPC) and electrochemical noise (EN), were used. The results gave evidence that the samples without boron additions exposed to the NaCl solution disclosed similar behavior as compared with that of samples produced by conventional casting. However, the samples with boron additions had higher corrosion rates irrespective of the solution used. On the whole, an at least for the conditions of the present work, the addition of boron is harmful to corrosion resistance of a 409Nb stainless steel produced by powder metallurgy.

Key words: boron, corrosion, liquid phase, powder metallurgy, sintering.

RESUMEN

En la producción de piezas de acero, actualmente las industrias relacionadas con la pulvimetalurgia (PM) han crecido con mayor rapidez que las industrias



empleando procesos convencionales. Lo anterior se debe a las grandes ventajas del proceso de PM, tales como la fabricación de piezas de alta calidad y prácticamente de cualquier geometría, así como piezas con tolerancias dimensionales estrictas, ahorro de energía y costos de producción más bajos. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, sus aplicaciones podrían ser limitadas cuando estos materiales son expuestos a medio ambientes corrosivos, es decir, se deben considerar cuidadosamente los aspectos sobre la corrosión. Las propiedades de los productos sinterizados pueden ser superiores cuando la sinterización se realiza en fase líquida, lo cual permite alcanzar una densificación alta, y esto puede conseguirse adicionando boro a los polvos de acero inoxidable. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento a la corrosión de piezas sinterizadas de acero inoxidable 409Nb con diferentes contenido de boro (0.8, 1.0 y 12% en peso), en dos soluciones de prueba 0.5M H₂SO₄ v 0.5M NaCl. Con este propósito, se emplearon varias técnicas electroquímicas tales como resistencia a la polarización lineal (RPL), curvas de polarización potenciodinámicas (CPP) y ruido electroquímico (RE). Los resultados dieron evidencia que las muestras sin adiciones de boro expuestas en la solución de NACI tienen un comportamiento similar a las muestras fabricadas por fundición convencional. Sin embargo, las muestras con velocidades adiciones de boro presentan mayores de corrosión independientemente de la solución de prueba. En general, este trabajo demuestra que, para las condiciones de prueba dadas, la adición de boro es perjudicial para la resistencia a la corrosión de un acero 409Nb inoxidable fabricados por metalurgia de polvos.

Palabras clave: boro, corrosión, fase líquida, pulvimetalúrgia, sinterización.

INTRODUCCIÓN

La pulvimetalúrgia (PM) es una tecnología conveniente para fabricar partes complejas, con forma de la pieza casi final, alta precisión dimensional y una gran productividad. Las piezas producidas por PM tienen un gran valor agregado debido a las propiedades que presentan, como: aceptable resistencia a la corrosión, buena apariencia física, buenas propiedades mecánicas. Comparando los costos de fabricación mediante procesos de PM contra uno de maquinado de piezas fundidas, pueden obtenerse ahorros de entre 40 y 60 % en materiales y de entre 30 y 50 % en energía [1,2]. Además presenta algunas otras ventajas como son: bajas temperaturas de procesamiento, excelente utilización del material (> 95%) y microestructuras más refinadas [2,3].

La sinterización de aceros inoxidables es más compleja debido a que existe una capa delgada de óxido de cromo en la superficie de las partículas, que impide un buen contacto entre éstas, evitando así una buena densificación de las piezas [1]. Con el propósito de disminuir la temperatura de sinterización puede adicionarse boro a los polvos de aceros inoxidables [4,5]. Esto promueve la formación de una fase líquida (eutéctico). El diagrama de fases binario Fe-B muestra la existencia de un intermetálico Fe₂B, el cual forma un compuesto eutéctico con el hierro a 1174 °C y un contenido aproximado de 4% en peso de boro [6].

Sin embargo, las aplicaciones de los productos de PM son limitadas debido a las características mecánicas y de resistencia a la corrosión relativamente bajas de estos componentes cuando se comparan con productos labrados y forjados [3, 4]. En la PM la



menor resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables sinterizados se debe a numerosos factores tales como: la densidad de sinterizado, la penetración del electrolito por la porosidad abierta e interconectada, que a su vez aumenta dramáticamente la superficie activa del material, contenidos intersticiales y compuestos secundarios formados durante la sinterización (3, 4, 7, 8).

En los aceros inoxidables sinterizados austeníticos, duplex y ferríticos de alto contenido de cromo se observan bajas resistencias a la corrosión comparados con materiales labrados y forjados (4, 9). Así, el presente estudio evaluó en solución 0.5M de NaCl el comportamiento de corrosión del acero inoxidable ferrítico 409Nb fabricado por PM y se estudia también su comportamiento frente a la corrosión al adicionarle diferentes cantidades de boro para conseguir la formación de fase líquida. Las técnicas electroquímicas que se emplearon fueron resistencia a la polarización lineal (RPL) [10] para determinar la velocidad de corrosión, curvas de polarización potenciodinámicas (CPP) [11], para observar el comportamiento activo-pasivo del material y ruido electroquímico (RE) [12] para conocer el tipo de corrosión que se está presentando en este tipo de materiales.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la obtención de las piezas sinterizadas se empleo como polvo base acero inoxidable 409Nb (Coldstream), polvos de ferrocromo (Fe-Cr) y ferroboro (Fe-B) (F. W. Winter & Co). La composición química de los polvos utilizados se muestra en la Tabla 1. Se prepararon tres mezclas, en las que se varió el contenido de boro de 0.8, 1.0 y 1.2% en peso. También se adicionó 2.6% en peso adicional de cromo (Fe-Cr) dejando una muestra del acero inoxidable sin adiciones de boro (referencia). La composición química de las mezclas después de las adiciones de boro, así como su nomenclatura se presenta en la Tabla 2. Las muestras se prepararon en un mezclador de doble cono, girando a una velocidad de 20 rpm durante 30 min. A todas las mezclas se les adicionó 1% en peso de estearato de zinc (Blachford) como lubricante. Las muestras fueron compactadas a una presión de 700 MPa, la sinterización se realizó en un horno tubular horizontal a 1150 °C por 60 minutos en una atmósfera de hidrógeno, a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min.

Para realizar las pruebas electroquímicas a todas las muestras se les colocó un conductor eléctrico de cobre, posteriormente se encapsularon en resina y se pulieron con papel abrasivo hasta el grado 1200. Las pruebas electroquímicas se realizaron con un potenciostato/galvanostato/ZRA Gill-8 AC, empleando como soluciones de prueba 0.5M H₂SO₄ y 0.5M NaCl.

A los especimenes pulidos se les realizaron pruebas de ruido electroquímico en potencial y en corriente los cuales se basaron en la norma ASTM G199-09 [12]. Para esta prueba se utilizo un arreglo de electrodos de trabajo idénticos y electrodo de referencia de calomel saturado (ECS). Las mediciones de corriente y potencial de ruido se monitorearon simultáneamente con un intervalo de 1 s/dato, obteniendo 1024 puntos. Las mediciones de resistencia a la polarización lineal se realizaron utilizando un arreglo de tres electrodos, empleando un electrodo de calomel saturado (ECS) como referencia, electrodo de trabajo (muestras de PM y Fe409) y alambre de platino como contra electrodo. La resistencia a la polarización lineal (RPL) se midió conforme a la norma ASTM G59 [10], con parámetros de operación de \pm 20 mV con respecto al potencial de corrosión (E_{corr}), a una velocidad de barrido de 10mV/min. De los datos RPL se determinó la velocidad de corrosión en términos de la densidad de corriente de



corrosión (I_{corr}) usando la ecuación de Stern and Geary [13], el cual se presenta a continuación:

$$I_{corr} = \frac{26}{R_P} \tag{1}$$

Donde 26 es el valor de la constante de Tafel dado por el software utilizado y R_P es la resistencia a la polarización. La velocidad de corrosión, presentada en milímetros por año, se calculo de acuerdo a la norma ASTM G102-89 [14] dicho procedimiento se muestra en la ecuación 2:

$$Velocidad \ de \ corrosión = \frac{C\omega I_{corr}}{\rho}$$
(2)

Donde C es un factor de conversión (3.27 mm g/ mA cm año); ω es el peso equivalente (g); ρ es la densidad del material (g/cm³); e j_{corr} es la densidad de corriente de corrosión (mA/cm²).

Las curvas de polarización potenciodinámica se realizaron utilizando un arreglo de tres electrodos, empleando un electrodo de calomel saturado (ECS) como referencia, electrodo de trabajo (muestras de PM y 409Nb fundido) y alambre de Platino como contra electrodo. Las curvas de polarización potenciodinámicas se iniciaron con un potencial de -500 mV con respecto al potencial de corrosión, una velocidad de barrido de 60 mV/min y potencial final de 1500 mV, de acuerdo a la norma ASTM G5 [11].

RESULTADOS Y DISCUSION

Ruido electroquímico

El ruido electroquímico se caracteriza por fluctuaciones estocásticas del potencial y corriente sin perturbación del material de trabajo [15]. Las series de tiempo en potencial y corriente sin la eliminación de la tendencia de las muestras que se sumergieron en la solución 0.5M de NaCl se presentan en la Grafica 1. Todas las muestras que se analizaron en esta solución, presentan potenciales activos, presentando potenciales más activos las muestras de PM. Las muestras Fe409 y Fe0.0B presentan una menor demanda de corriente que las muestras con boro. La influencia de los poros en los materiales de PM es predominante en el comportamiento de corrosión, con lo que se compensa cualquier efecto debido a diferencias microestructurales entre el material fundido y el de PM. El comportamiento de la muestra Fe409 sugiere corrosión localizada. Este tipo de ataque es la consecuencia de la falla en la capa pasiva provocada por los iones cloruro; se forman regiones activo-pasivas con un cátodo muy amplio y áreas anódicas pequeñas [16].

En las muestras fabricadas por PM el mecanismo de corrosión es diferente; la porosidad es estos materiales actúa como una hendidura o grieta y permite que ocurra la concentración de iones cloruro. Un factor que contribuye con la corrosión localizada mucho más vigorosa en el límite de partícula-poro es la fricción que se provoca en la partícula durante la sinterización. El roce o frotamiento en las áreas de contacto entre las partículas pueden erosionar o aflojar la película superficial pasiva. Esta película tal vez no sea capaz de regenerarse debido a la baja presión parcial de oxigeno en estas áreas. Consecuentemente, si la fusión entre ciertas partículas no se termina durante el ciclo de sinterización, las zonas activo-pasivas se establecerán con un ataque localizado, que



ocurre en las áreas anódicas (la zona de contacto entre partículas sin película pasiva). Este ataque causa una concentración de esfuerzos en las áreas consolidadas y lleva a la desintegración parcial de la estructura sinterizada. Esta pérdida de masa del espécimen se debe a diversas fases del proceso electroquímico de corrosión. Las micrografías de los especímenes ensayados en solución 0.5M NaCl mostraron corrosión mixta para todas las muestras, esto se presenta en la Figura 1.

La Grafica 2 presenta las series de tiempo en potencial y corriente sin la remoción de tendencia para las muestras que se estudiaron en la solución 0.5M de H₂SO₄. Para ruido en potencial, todas las muestras tienden a potenciales más activos conforme se incrementa el contenido de boro, no siendo el caso para las muestras Fe409 y Fe0.0B. Por otra parte, la muestra Fe0.0B presenta una demanda de corriente similar a la muestra Fe409, en todas las muestras con contenidos de boro se observa una mayor demanda de corriente. Este comportamiento en las muestras de PM pueden atribuirse a la penetración del electrolito por la red de poros o al flujo de gas atrapado en el interior de los mismos [16]. También, pueden deberse al crecimiento y desprendimiento de burbujas de hidrógeno durante la disolución activa en soluciones ácidas [17].

Para el análisis estadístico de la señal de ruido en corriente y potencial se elimino la tendencia utilizando un ajuste a una recta y empleando el residuo como medida de ruido. La división de la desviación estándar del potencial (σ_E) multiplicado por el área de la muestra (A), entre la desviación estándar de la corriente (σ_i) se utiliza para obtener un parámetro con unidades de resistencia por área, el cual se conoce como la resistencia al ruido electroquímico (Rn) [12] y esta dada en la ecuación 3.

$$R_n = \sigma_E A / \sigma_I \tag{3}$$

Rn es comparable a la resistencia a la polarización lineal (RPL), por lo que el cálculo de la velocidad de corrosión de las mediciones electroquímicas con Rn se puede realizar con las ecuaciones 1 y 2. Una relación utilizada comúnmente como índice o grado de corrosión localizada es el coeficiente de variabilidad, que determina el índice de localización (IL), dado por la ecuación 4:

$$IL = \sigma i / i_{rms} \tag{4}$$

Donde σi es la desviación estándar de la corriente, e i_{rms} es la raíz cuadrada o valor medio de la corriente. Un valor de este índice de localización (IL) entre 0.1 y 1 indica corrosión localizada, mientras valores que se encuentran entre 0.001 y 0.01 indican corrosión generalizada, y valores entre 0.01 y 0.1 indican corrosión mixta [18].

En la Tabla 3 se presentan los resultados de la técnica de ruido electroquímico para las diferentes muestras sometidas a las dos soluciones de prueba. La totalidad de las muestras sumergidas en la solución de NaCl presenta corrosión mixta, esto debidos a que los materiales de PM el fenómeno de corrosión esta presente en muchos sitios, debido al pequeño tamaño de las partículas que forman el producto de PM, y producen un generalizado y severo ataque del material. De las pruebas que se realizaron en la solución de H₂SO₄ la muestra que presenta corrosión localizada es la Fe0.0B, mientras que las muestras sinterizadas con contenidos de boro y la muestra fundida presentan corrosión mixta. El comportamiento de las muestras tanto fundida como de metalurgia de polvos en esta solución se puede explicar en términos de que existe un proceso de disolución en la superficie del metal compitiendo con la formación de una película de óxidos. Podemos asumir que las picaduras ocurren solo bajo las condiciones donde los

productos de corrosión formados en la sección activa de la superficie del metal hacen más difícil su pasivación [18]. También hay que hacer notar que existe una acidificación de la solución, probablemente debida a la siguiente reacción: $H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$ [16, 19].

Resistencia a la polarización lineal

En la Grafica 3 se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de RPL y densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) en las dos soluciones de estudio. En esta podemos observar que la RPL disminuye drásticamente para las muestras de PM en ambas soluciones. La densidad de corriente de corrosión aumenta de la misma manera para las muestras de PM y esta a su vez se incrementa conforme el contenido de boro se incrementa. La formación de corrosión por picadura en metales pasivados se facilita por la existencia de sitios débiles (como defectos y poros) en la película de oxido. Para casos de aceros inoxidables duplex y martensíticos las picaduras se forman en la porosidad abierta y tienden a propagarse hacia el interior del poro [2]. Este mecanismo puede ser valido para las diversas muestras sinterizadas y analizadas en el presente trabajo.

Es apreciable el efecto del contenido de boro sobre la resistencia a la corrosión, ya que al aumentar el contenido de boro, aumenta la densidad de corriente de corrosión en ambas soluciones (grafica 3). Este comportamiento puede ser atribuido a la precipitación de carburos de cromo en estas muestras ya que como puede verse en la Tabla 2 el contenido de carbono de las muestras Fe0.8B a Fe1.2B es mayor al 0.18%, lo cual pudo provocar la precipitación de carburos durante el proceso de sinterización.

Los resultados experimentales muestran que la corrosión es más severa en los materiales de PM que en el material fundido (Fe409) y este efecto se ve mas acentuado en los materiales de PM con contenidos de boro; esto se debe principalmente a que los aceros de PM sufren ataque localizado en las hendiduras (poros), el cual aparece macroscópicamente algunas veces como un ataque mixto o generalizado en las superficies de estos materiales; y si además sumamos a esto la precipitación de carburos obtenemos altas velocidades de corrosión.

Curvas de polarización potenciodinámicas

La Grafica 4 muestra las curvas de polarización potenciodinámicas en las soluciones 0.5M de NaCl y 0.5M de H₂SO₄. Para las pruebas electroquímicas en la solución 0.5M de NaCl, es interesante hacer notar que las ramas anódicas no presentan un comportamiento activo-pasivo para las muestras con boro, además de que la muestra fundida se comporta de manera similar. La muestra Fe0.0B si presenta cierta tendencia a la pasivación y una densidad de corriente de corrosión mayor, y que todas muestran disolución del metal. Para casos de aceros inoxidables duplex y martensiticos las picaduras se forman en la porosidad abierta y tienden a propagarse hacia el interior del poro [2]. Este mecanismo puede ser valido para las diversas muestras sinterizadas y analizadas en el presente trabajo. En estos materiales la corrosión por hendidura puede resultar del consumo del oxigeno disuelto en el poro. La deficiencia de oxígeno deteriora la pasividad y resulta en una acumulación de cationes de metal dentro del poro. Un incremento en la concentración de cationes resulta en una afluencia de iones



cloruro hacia el poro. Altas concentraciones de cloruros y reacciones de hidrólisis ácidas dentro del poro puede conducir a una disolución localizada del metal [9].

En las muestras sinterizadas con diferentes contenidos de boro y la muestra fundida (Grafica 4), se observa una transición activo-pasiva típica de los aceros inoxidables [7, 18], para los especimenes sinterizados y fundido expuestos a la solución de H_2SO_4 . También puede observarse en estas curvas la existencia de un segundo máximo de densidad de corriente anódica en potenciales mayores a los -200 mV vs ECS. Las causas de este segundo máximo están relacionadas con: oxidación de hidrogeno atómico absorbido por el metal; la presencia de Fe^{2+} en la solución ácida, y; presencia de regiones empobrecidas en cromo en la muestra. Puede decir que en este caso la presencia del segundo máximo de corriente anódica es la presencia de regiones empobrecidas de cromo. Se observa que la densidad de corriente de pasivación (I_{pass}) es menor para el material fundido, y que ésta aumenta conforme el contenido de boro se incrementa en las piezas sinterizadas, esto debido a la precipitación de carburos provenientes del polvo de ferroboro, y a la falta de continuidad de la película pasiva debido a la presencia de poros [20, 21].

CONCLUSIONES

- ✓ Las muestras sin adiciones de boro expuestas en la solución de NACl tienen un comportamiento similar a las muestras fabricadas por fundición convencional.
- ✓ Las muestras de metalurgia de polvos y con adiciones de boro presentan mayores velocidades de corrosión independientemente de la solución de prueba.
- ✓ Los materiales de PM muestran un mecanismo de ataque por corrosión por hendiduras el cual se ve favorecido en los poros y entre algunas áreas de contacto entre las partículas de polvo. Estas circunstancias explican las altas velocidades de corrosión observadas en los materiales de PM.
- ✓ La adición de boro es perjudicial para la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 409Nb fabricado por PM, ya que muestras sin adiciones de boro presentan mejor resistencia a la corrosión.

REFERENCIAS

- 1) Schatt W., Wieters K. P., *Powder Metallurgy*.; EPMA; (1997).
- 2) L. A. Dobrzański, Z. Brytan, M. Actis Grande, M. Rosso. *J Mater Process Tech*. Vol. 191, pp 161-164, (2007).
- 3) M. Sarasola, T. Gomez-Acebo and F. Castro. *Powder Metall.* Vol. 48. No.1. pp 59-67 (2005).
- A. Bautista, F. Velasco, J. Abenojar. Corrosion Science. Vol. 45, pp. 1343– 1354 (2003).
- 5) E. Otero, A. Pardo, M. V. Utrilla, E. Sáenz, J. F. Álvarez. Corrosion Science. Vol. 40, pp 1421-1434 (1998).
- 6) T. B. Massalski, Binary Phase Diagrams, ASM Internacional, second edition, Vol. 1, Materials Park, OH. (USA), 1986. pp. 482.
- 7) C. Padmavathi, A. Upadhyaya, and D. Agrawal. *Scripta Materiali.* Vol. 57, pp 651-654, (2007).
- 8) E. Otero, A. Pardo, M. V. Utrilla, F. J. Pérez and C. Merino. *Corrosion Science*.Vol. 39, pp 453-463, (1997).



- 9) A. John Sedriks "Corrosion of stainless steels" Second edition. The electrochemical society, INC. Princeton, New Jersey. (1996).
- 10) ASTM G59-97 "Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements" 1997.
- 11) ASTM G5-94 "Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurements" (1999).
- 12) ASTM G199-09 "Standard guide for electrochemical noise measurement" (2009).
- 13) M. Stern, A. L. Geary. J. Electrochem. Soc. Vol. 104 (1), pp 56-63, (1957).
- ASTM G102-89 "Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements" 1999.R. A. Cottis. Interpretation of electrochemical noise data. *Corrosion*, Vol. 57, pp 265-285, (2001).
- 15) E. Otero, A. Pardo, M. V. Utrilla, E. Sáenz and F. J. Perez. *Materials Characterization*, Vol. 35, pp 145-151, (1995).
- 16) S. Balaji, G. Joshi and A. Upadhyaya. *Scripta Materialia*. Vol. 56. pp 149-151, (2007).
- 17) Dawson J. L. Electrochemical noise measurement for corrosion applications. Ed. ASTM., West Conshohocken, EE.UU. pp. 3-35. (1996).
- 18) Kelly, R. G., Inman, M. E., and Hudson, J. L., "Analysis of electrochemical noise for type 410 stainless steel in chloride solutions", Electrochemical noise measurements for corrosion applications, Jeffery R. Kearns, john R. Scully, Pierre R. Roberge, David L. Reichert, and John L. Dawson, Eds., American Society for Testing and Materials, pp 101-113, (1996).
- J. A Cabral, O. Barceinas, F. Almeraya, J. Chacón, A. Martínez. Articulo 13. XXX Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales. Instituto Tecnológico de Saltillo. (2008).
- 20) M.C. Li, C.L. Zeng, S.Z. Luo, J.N. Shen, H.C. Lin, C.N. Cao. Electrochimica Acta 48 (2003) 1735-1741.
- 21) K. H. W. Seah, R. Thampuran and S. H. Teoh. Corrosion Science 40 (1998) 547-556.



Grafica 1. Series de tiempo en potencial y corriente para todas las muestras que se analizaron en la solución 0.5M NaCl con tendencia.





Grafica 2. Series de tiempo en potencial y corriente para todas las muestras que se analizaron en la solución $0.5M H_2SO_4$ con tendencia.









Figura 1.- Micrografías de las muestras después de la prueba de ruido electroquímico en las dos soluciones de prueba.



Grafica 3.- Resistencia a la polarización lineal (RPL) y densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) de las muestras que se sometieron a las dos soluciones: a)0.5M NaCl y b) 0.5M de H₂SO₄.



Grafica 4.- Curvas de polarización potenciodinámicas de las muestras con diferente contenido de boro y la muestra fundida en las soluciones. a) 0.5M de NaCl y b) 0.5M de H₂SO₄.



TABLA 1Composición química y propiedades de los polvos (% peso).

	Composición (% peso)						Densidad aparente	Flujo	
	Fe	Cr	В	С	S	Nb	Si	(g/cm^3)	s/50g
409Nb	87.52	10.9		0.01	0.01	0.53	0.9	3.06	26.2
Fe-Cr	24.93	74.0		0.03	0.02		1.0	4.11	
Fe-B	79.67		18.98	0.35	0.005		0.82	1.44	

TABLA 2

Composición química final y nomenclatura de las mezclas.

	Composición química (% en peso)						
Muestra	Fe	Cr	B	С	Nb	Si	
Fe409 (fudido)	Bal	12.5	0.0	0.08	0.01	0.48	
Fe0.0B	Bal	13.5	0.0	0.02	0.50	0.89	
Fe0.8B	Bal	13.5	0.8	0.184	0.47	0.89	
Fe1.0B	Bal	13.5	1.0	0.230	0.46	0.89	
Fe1.2B	Bal	13.5	1.2	0.275	0.46	0.89	

TABLA 3.

Resultados de las pruebas de ruido electroquímico en ambas soluciones.

Muestra	Solución	σ_{v}	σ_{I}	Rn, Ω -cm ²	I_{corr} mA/cm ²	IL	Tipo de corrosión
Fe409		15.7611	0.0075	2099.049	0.0123	0.0445	Mixta
Fe0.0B		9.7719	0.0041	2357.354	0.0110	0.0473	Mixta
Fe0.8B	NaCl	17.4613	0.0195	893.642	0.0290	0.0642	Mixta
Fe1.0B		11.5790	0.0173	666.910	0.0389	0.0569	Mixta
Fe1.2B		12.7092	0.0210	604.432	0.0430	0.0517	Mixta
Fe409		0.3184	0.0022	144.5269	0.1798	0.015	Mixta
Fe0.0B		4.2896	0.0554	77.3926	0.3359	0.119	Localizada
Fe0.8B	H_2SO_4	0.8243	0.9178	0.8981	28.9473	0.040	Mixta
Fe1.0B		0.9973	0.9981	0.9992	26.0203	0.035	Mixta
Fe1.2B		0.5261	0.4806	1.0946	23.7512	0.013	Mixta