

Comportamiento electroquímico de dos aceros de refuerzo embebidos en morteros con y sin cloruros

Electrochemical behavior of two reinforced steels embedded in mortars with and without chlorides

Carlos. R. Arganis-Juárez ^{a,b,*}, Andrea Ramírez-González ^{b,c}, Javier Ávila-Mendoza ^{d,b}, Rafael Colás-Ortiz ^e

^a Departamento de Sistemas Nucleares, Laboratorio de Técnicas de Materiales, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. 52750 Estado de México. México.

^b Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 Ciudad de México. México.

^c Escuela Nacional Preparatoria, Plantel 2, Universidad Nacional Autónoma de México. 08040 Ciudad de México. México.

^d Outokumpu Mexinox. 78395 San Luis Potosí, San Luis Potosí. México.

^e Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León. 66455 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Resumen

En este estudio se comparan un acero de la normativa NMX-B-506, contra un acero microaleado de la normativa NMX-B457, en morteros con y sin cloruros. Los resultados de densidad de corriente de corrosión i_{corr} y Potencial Electroquímico de corrosión E_{corr} por 80 días, muestran que el acero microaleado tiene un comportamiento electroquímico similar, que el acero al carbono y que ambos son susceptibles a la corrosión por cloruros. Debido a su mayor ductilidad, el uso de los aceros microaleados serían recomendables en zonas de alto riesgo sísmico.

Palabras Clave: aceros de refuerzo, morteros, aceros microaleados, técnicas electroquímicas, corrosión.

Abstract

In this study, a steel from the NMX-B-506 standard is compared against a microalloyed steel from the NMX-B457 standard, in mortars with and without chlorides. The results of corrosion current density i_{corr} and Electrochemical Corrosion Potential E_{corr} for 80 days show that microalloyed steel has a similar electrochemical behavior to carbon steel and that both are susceptible to corrosion by chlorides. Due to their greater ductility, the use of microalloyed steels would be recommended in areas of high seismic risk

Keywords: Reinforced Steels, mortairs, microalloyed steels, electrochemical techniques, corrosion

1. Introducción

En México, en la mitad del siglo 20, se requirió aumentar la resistencia de las varillas de refuerzo. Algunos fabricantes lo hicieron aumentando el contenido de carbono de los aceros y otros produciendo varilla torcida en frío. En ambos casos se comprometió la soldabilidad de estos aceros de alta resistencia (Martínez et al., 1987)

Después de los sismos de septiembre de 1985, se encontró que la falla del concreto armado fue debido al uso de acero con propiedades o composición inadecuadas para ser usado con

soldadura y al uso de esta sin procedimientos adecuados (Martínez et al., 1987).

Posterior a esto, se emitieron dos normativas para aceros de construcción, para evitar los problemas de soldaduras, una para aceros al carbono no soldables NMX-B-506 y otra para aceros al carbono soldables NMX-B457, ambas para aceros con 412 MPa. de límite de cedencia. (42 kg/mm²)

Los productores de acero modificaron sus procesos para mejorar la soldabilidad de las varillas de refuerzo que incluyeron la reducción del contenido de carbono, el aumento de la velocidad de enfriamiento después de laminación y/o adiciones de microaleantes.

*Autor para la correspondencia: carlos.arganis@inin.gob.mx

Correo electrónico: carlos.arganis@inin.gob.mx (Carlos R. Arganis-Juárez), andrea.ramirez@enp.unam.mx (Andrea Ramírez-González), javier.avila@outokumpu.com (Javier Ávila-Mendoza), rafael.colas@uanl.edu.mx (Rafael Colás-Ortiz).

Sin embargo, después del sismo de septiembre de 2017, resurge la preocupación del comportamiento de los aceros microaleados y su respuesta electroquímica a los cloruros. ya que, en el pacífico, se tiene un clima tropical marino y es una zona de alto riesgo sísmico, por lo cual evaluar el comportamiento electroquímico de estos aceros en presencia de cloruros es sumamente importante, ya que serían adecuados para su uso en zonas sísmicas, mecánicamente hablando por su mayor ductilidad.

La creencia general de que no deberían permitir la realización de soldaduras en varillas de refuerzo en obras, viene precisamente de las experiencias del sismo de 1985 (Martínez et al., 1987), pero la recomendación de usar varillas del estándar MNX-B457 por (Rodríguez et al., 2006) por su soldabilidad, alienta la producción y uso de ese tipo de acero en la construcción. Los resultados obtenidos por Terán et al., 2022 mencionan que los microconstituyentes presentes en este grado de acero son: perlita fina más ferrita, sin la presencia de fases perjudiciales. Las normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto con comentarios de 2017 y su actualización de 2023 en la gaceta de la ciudad de México, no prohíbe el uso de soldaduras de varillas, pero si bien las normas sufrieron algunos cambios, no modifican el uso de la soldadura para la unión de acero de refuerzo, solo la encuadran en un supervisión minuciosa de la calidad de la soldadura y del procedimiento de elaboración de la junta, como se indica en el punto 6.6. De hecho, también se propone el uso de conectores tipo 1 y tipo 2.

En este estudio se comparan un acero de la normativa NMX-B506, contra un acero microaleado de la normativa NMX-B457 en morteros con y sin 2% en peso con respecto al cemento, de cloruros con el objetivo de verificar que el acero NMX-B457 no presentará una velocidad de corrosión mayor al acero NMX-B506 al cual se propone sustituya en zonas de alto riesgo sísmico.

2. Procedimiento experimental

A continuación, se presenta el procedimiento experimental realizado.

2.1. Aceros utilizados.

Las varillas de refuerzo de acero microaleado NMX-B457 se fabricaron en un alto horno, posteriormente en un convertidor de oxígeno. En este proceso, el ajuste de la aleación es realizado en parte en el convertidor de oxígeno y completado en la olla.

La colada continua se obtiene en palanquillas de 125 mm x 125 mm de sección transversal y son enfriadas al aire. Estas palanquillas son recalentadas a 1200°C y laminadas para formar las varillas de refuerzo., en este caso de 38.1mm de diámetro. La temperatura de las varillas a la salida. del laminador es de aproximadamente 1080°C. Posteriormente, la varilla de refuerzo se enfría al aire.

Las varillas de acero al carbono, se fabricó utilizando pellets de hierro esponja, reducidos directamente y posteriormente procesadas en un horno de arco eléctrico. La colada también es continua en palanquillas cuadradas de 125 mm por lado. Las

palanquillas son recalentados y laminadas en caliente para formar las varillas de 19 mm de diámetro.

La tabla 1 muestra la composición de ambas varillas.

Tabla 1: Composición Química y Propiedades de los aceros y la composición por la normativa NMX (% en peso).

	Acero Microaleado	Acero al carbono	NMX-B457	NMX-B506
C	0.24	0.51	< 0.33	-
Mn	1.50	1.80	< 1.56	-
Si	0.50	0.31	< 0.55	-
P	0.035	0.014	< 0.04	< 0.06
S	0.045	0.03	< 0.053	-
V	0.040	-	-	-
Nb	0.040	-	-	-
CE	0.49	0.81	< 0.5	-
Límite de cedencia	415	415	412	412
Resistencia a la Tracción	595	826	540	618
Ductilidad	10	10	10-14	9
Dureza	99	99	-	-
Rockwell B				

Resistencia en MPA, ductilidad en %.

$$CE = \text{Carbono Equivalente} \quad CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Co)/15$$

2.2. Probetas de aceros embebidos en morteros.

Las probetas de mortero fueron coladas en tubos de PVC de 3.6 cm de diámetro, por 6 cm de largo en morteros fabricados con cemento Portland tipo 1, mezclado con arena de cuarzo y agua bidestilada, con una relación agua-cemento (a/c) de 0.5 y una relación cemento-arena (c/s) de 3.0. Se añadió NaCl al agua de amasado con una relación de cloruro a cemento (Cl/c) del 2 %. Se embebieron los dos cilindros de los diferentes tipos de acero y un electrodo de grafito de 6.1 mm de diámetro y 50 mm de largo como contraelectrodo. La figura 1a) muestran los diagramas utilizados con la distribución y medidas respectivas de estas probetas en centímetros, en este caso CS es Acero al carbono, MS es acero microaleado y G es grafito. Esta configuración permitió una distribución simétrica de los cilindros de acero y un espesor de cobertura del mortero de 0.75 cm.

La evaluación se realizó con morteros en una cámara de curado con 100% de humedad relativa y temperatura ambiente, después de 28 días.

2.3. Evaluación electroquímica.

Las probetas de acero embebidas en mortero, fueron evaluadas utilizando un potencióstato, usando un electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre saturado SCE como electrodo de referencia y una esponja húmeda, para mantener el contacto iónico durante la prueba, como recomienda la norma ASTM C876. Se obtuvieron la densidad de corriente de corrosión i_{corr} utilizando la ecuación de Stern M. and Geary A. L, (1957) y

lo recomendado por la norma ASTM G5 (2015) de acuerdo a la ecuación 1, donde R_p es la resistencia a la polarización y B es la constante de Stern Geary (Stern M. and Geary A. L, 1957), que se tomó de 0.06V.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (1)$$

El intervalo de potencial utilizado fue de ± 10 mV. vs el Potencial Electroquímico de Corrosión E_{corr} y se determinaron las densidades de corriente anódicas (i_{an}) y catódicas (i_{ca}), para obtener la resistencia a la polarización mediante la ecuación (2).

$$R_p = \frac{\Delta E}{i_{an} - i_{ca}} \quad (2)$$

La figura 1b) muestra la fotografía de una de las probetas durante su medición.

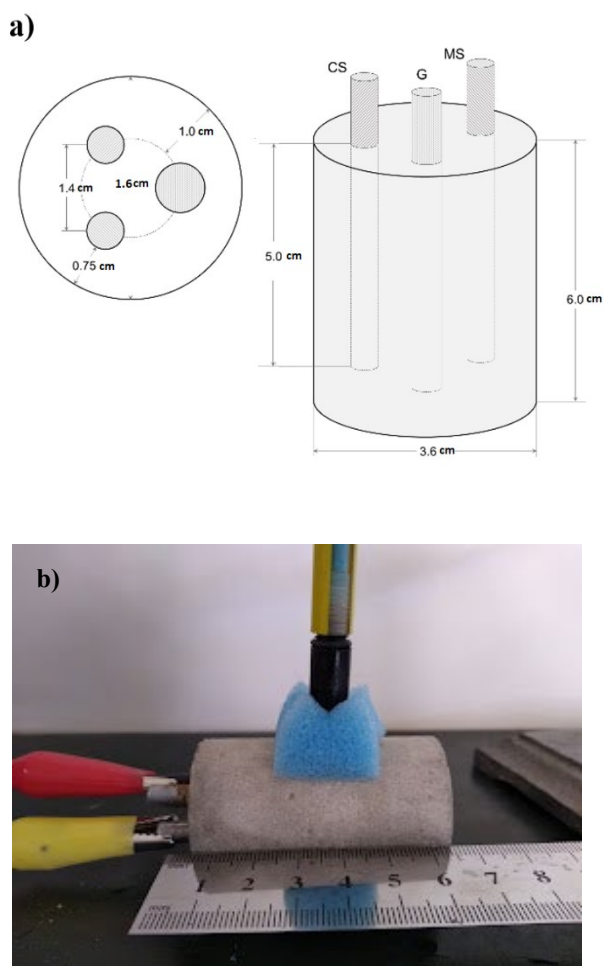


Figura 1: a) Diagrama de las probetas de cilindros de acero embebidos en mortero. b) Ejemplo de una probeta durante la medición.

3. Resultados y Discusión.

3.1. Microestructura de los aceros.

La figura 2 muestra la microestructura de los aceros. El acero microaleado NMX-B457 presenta una estructura constituida por la fase y microconstituyente ferrita de color blanco y el microconstituyente perlita, de color oscuro (Conformado por las fases ferrita +cementita), con un contenido de carbono de 0.24% y un CE de 0.49. Por su parte el acero al carbono NMX-B-506 presenta casi en su mayoría el microconstituyente perlita, con un contenido de carbono de 0.51% y un CE de 0.81%

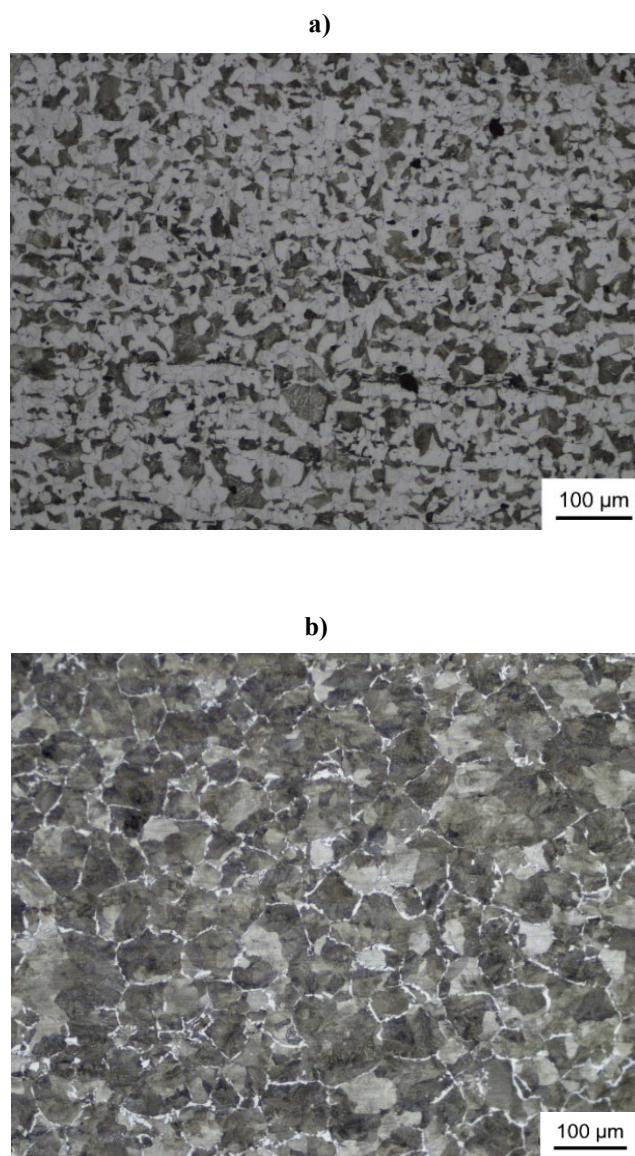


Figura 2: Microestructura de los aceros a) Acero microaleado NMX-B457 b) Acero al carbono NMX-B-506

Tabla 3: Criterios de evaluación del E_{corr} y su significado en ASTM C876.

E_{corr} (V vs $ECu/CuSO_4$)	Significado.
Más alto que 0.20	Probabilidad mayor del 90% de que no está ocurriendo la corrosión en el acero de refuerzo.
Entre -0.20 y 0.35	La actividad de corrosión es incierta
Menor que -0.35	Probabilidad mayor al 90% que la corrosión está ocurriendo en el acero de refuerzo.

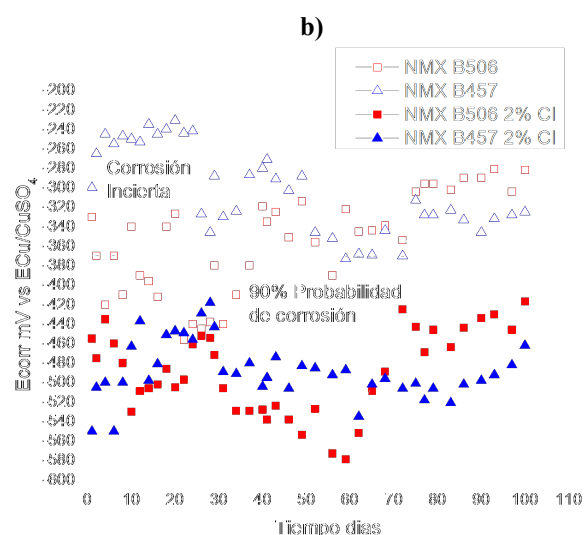
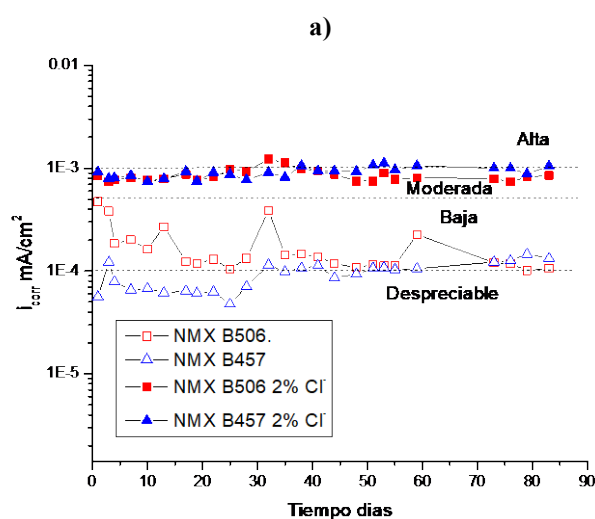


Figura 3: a) Densidad de corriente de corrosión en función del tiempo de ambos aceros en mortero con y sin 2% de Cloruros b) Potencial Electroquímico de Corrosión E_{corr} . Contra el tiempo.

La figura 3a) muestra los resultados de densidad de corriente de corrosión, y la tabla 2 muestra los criterios propuestos por Andrade et al. (2004) para esta evaluación.

La figura 3b) presenta los resultados del E_{corr} y en la tabla 3 están contenidos los criterios de evaluación de acuerdo con la norma ASTM C876.

Tabla 2: Criterios de evaluación de la i_{corr} y su significado en nivel de corrosión. (Andrade et al. , 2004)

i_{corr} ($\mu A/cm^2$)	V_{corr} (mm/año)	Nivel de Corrosión
≤ 0.1	≤ 0.001	Despreciable
0.1-0.5	0.001-0.005	baja
0.5-1	0.005-0.010	Moderada
> 1	> 0.010	Alta

Se debe recordar que un potencial electroquímico de corrosión más positivo equivale al comportamiento de un metal más noble y un potencial electroquímico de corrosión menor o más negativo, corresponde a un metal más electroactivo o menos noble y con tendencia a corroerse más.

En la figura 3a) el acero microaleado NMX-B457 en un inicio tiene una i_{corr} en la zona donde la corrosión es despreciable, mientras que el acero al carbono NMX-B506, inicia en la zona de corrosión baja. Después de los 40 días, ambos aceros permanecen en la zona de corrosión baja, hasta los 80 días.

En el mortero con 2% en peso de Cloruros con respecto al cemento, ambos aceros están en la zona de corrosión moderada y en algunos días, cruzan el umbral a la zona de corrosión alta, pero regresan a la zona de corrosión moderada. La diferencia en comportamiento a la corrosión de ambos aceros es muy similar

La figura 3b) muestra que en un inicio el acero microaleado inicia con un potencial electroquímico de corrosión en la zona de corrosión incierta, mientras que el acero al carbono incursiona en la zona del 90% de probabilidad de corrosión. A partir del día 30, ambos aceros están en la zona de probabilidad de corrosión incierta, con pequeñas incursiones a la zona de 90% de probabilidad de corrosión. Estos resultados concuerdan con los resultados obtenidos en la i_{corr} .

En los morteros con cloruros, el acero al carbono en los primeros días tiene un potencial electroquímico de corrosión ligeramente más positivos, pero ambos están en la zona con 90% de probabilidad de corrosión. Al día 10 alcanza valores más activos que el acero microaleado. Después ambos aceros se igualan y al final el acero microaleado parece tener un potencial menor que el acero al carbono, pero siempre se mantienen ambos aceros en la zona de 90% de probabilidad de corrosión y su comportamiento es similar y concuerda con los resultados obtenidos en la i_{corr} .

Cabe mencionar que los valores de E_{corr} tienen mayor dispersión y finalmente sólo proporcionan datos de probabilidades de corrosión, mientras que los datos de i_{corr} velocidad de pérdida de espesor de la varilla (V_{corr}) y por lo tanto ser útiles en cálculos de integridad estructural y vida remanente de la estructura.

En el acero al carbono la fase cementita actúa como cátodo y la fase ferrita como ánodo en condiciones electrolíticas (Hao et al., 2016). La relación entre cátodos (cementita en la perlita) y ánodos (ferrita) es más alta en el acero al carbono, es decir muy cercana al 100% de perlita (50% de cementita y 50% de perlita), lo que favorece a la corrosión, mientras que en el acero microaleado, que tienen una relación menor de cátodos

(cementita en la perlita), y una microestructura más ferrítica (ánodos), por lo cual la corrosión no se vería tan favorecida.

(Hegazy et al., 1996) y (Liu et al., 2020) encontraron que la resistencia de los aceros microaleados es mejor que la de los aceros al carbono, debido al refinado del grano y la formación de una película pasiva más estable, sin embargo, en este trabajo sólo al inicio de las pruebas parece haber una pequeña diferencia. El tamaño de grano es más fino en el acero microaleado NMX-B457 que el acero al carbono MNX-B506.

Los resultados de este estudio no contradicen los hallazgos de Balma et al. (2002), quienes probaron la resistencia a la corrosión de tres aceros microaleados con cromo y encontraron que tenían un comportamiento similar a dos aceros al carbono.

El uso de aceros microaleados elimina varias deficiencias que se han observado cuando se utilizan aceros al carbono como barras de refuerzo, ya que tiene mejores propiedades mecánicas y se puede soldar siguiendo procedimientos y supervisión, por su más bajo carbono equivalente, lo que se podría aprovechar para aplicar la técnica de protección catódica para proteger las estructuras contra la corrosión más fácilmente, que el acero al carbono, el cual es aconsejable no soldar. Al parecer el uso de conectores tipo 1 y 2, facilitan la unión de la varilla de refuerzo y garantizarían la continuidad mecánica y eléctrica, pero este es un tema que requiere investigación.

En las condiciones estudiadas, al inicio, el acero microaleado tiene un comportamiento a la corrosión ligeramente mejor, tal vez por su relación cátodos/ánodos más bajo, pero posteriormente el acero microaleado demostró tener un comportamiento similar al acero al carbono, tal vez porque la velocidad de corrosión esté controlada por la formación de capas pasivas. El acero microaleado, podría utilizarse para zonas de alto riesgo sísmico, en zonas costeras ya que tiene mejores propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión es similar al acero al carbono.

4. Conclusiones.

Los resultados de densidad de corriente de corrosión i_{corr} y Potencial Electroquímico de corrosión E_{corr} por 80 días, muestran que el acero microaleado tiene un comportamiento similar que el acero al carbono, embebidos en mortero y que ambos son susceptibles a la corrosión por cloruros.

La i_{corr} tiene menor dispersión en los datos y puede usarse para la realización de cálculos de vida residual de las estructuras, mientras que el E_{corr} presenta sólo probabilidades de corrosión.

Los aceros microaleados, que cumplen con la norma MNX B457 pueden sustituir a los aceros al carbono, en zonas de alto riesgo sísmico, teniendo la ventaja de que son soldables.

Agradecimientos

Los autores quieren dedicar este trabajo a la memoria del fallecido profesor Enrique Martínez, quien dedicó su vida a mitigar los daños causados por la corrosión y a transmitir sus conocimientos en este campo a las nuevas generaciones de

estudiantes. Se agradece al laboratorio de corrosión de la facultad de química de la UNAM, por el uso de sus equipos e instalaciones, al Ing. Julio C. Zenteno S., por su apoyo en las metalografías y al proyecto SN-003 2023 del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

Referencias

- Andrade C., Alonso M., Gulikers J., Polder R., Cigna R., Vennesland O., Salta M., Raharinaivo A., Elsener B. (2004) Corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Mat. Struct./Mater. Construc.*, 37 623-643.
- ASTM C876-15 (2015), Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA. www.astm.org.
- ASTM G5 (2015) Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements ASTM Int., West Conshohocken, PA, USA. www.astm.org
- Balma J., Darwin D., Browning J. P., Locke Jr C.E. (2002) Evaluation of corrosion resistance of microalloyed reinforcing steel. Report No. FHWA-KS.02-09, Kansas Department of Transportation, USA.
- Hegazy M.M., Eissa M.M. (1996): Influence of microalloying on the corrosion resistance of steel in saturated calcium hydroxide. *Metall. Mat. Trans.*, 27A 1701-1707. <https://doi.org/10.1007/BF02649828>
- Hao X, Dong J., Nabuk-Etim I. L., Wee J, Ke W. (2016) Sustained effect of remaining cementite on the corrosion behavior of ferrite-pearlite steel under the simulated bottom plate environment of cargo oil tank. *Corr. Sc.*, 110 296-304. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.04.042>
- Liu S., Gao C., Yan P. (2020): Effect of niobium micro-alloying addition on electrochemical corrosion behavior of mild steel in a highly alkaline environment. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 15 5333-5341. <https://doi.org/10.20964/2020.06.42>
- Martinez L., Albarran, J. L., Fuentes L. (1987). Lesson in welding from the 1985 Mexico City earthquake. *Weld. J.* (66) 23-30.
- NMX-B-506-2019. (2019) Industria Siderúrgica-Varilla corrugada de acero para refuerzo de concreto-especificaciones y métodos de prueba. CANACERO. onn@canacero.mx
- NMX-B-457-2019. (2019) Industria Siderúrgica-Varilla corrugada de acero baja aleación para refuerzo de concreto-especificaciones y métodos de prueba. CANACERO. onn@canacero.mx
- Rodríguez M. E. y Rodríguez A. J. (2006) Se debe evitar la soldadura de barras de refuerzo en estructuras de concreto reforzado en zonas sísmicas de México. *Revista de Ingeniería Sísmica* No. 75 69-94
- Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto con comentarios (2023). *Gaceta de la ciudad de México*. México.
- Stern M and Geary A. L. Electrochemical Polarization: I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves *J. of the Electrochemical Society*, Vol. 104, No. 1, 56-63, 1957 <https://doi.org/10.1149/1.2428496>
- Terán Guillén J , Arroyo Olvera M. , Mauricio Zea M. T. , Rendón Belmonte M. , López Miguel A. (2022) Efecto de la soldadura en las propiedades mecánicas de dos tipos de acero de refuerzo. memorias del XXVIII congreso internacional anual de la SOMIM Bogotá, Colombia.