

# Propiedades de resistencia a la corrosión de aceros aleados al Si embebidos en mortero

Octavio Covarrubias Alvarado\*, Patricia Rodríguez López\*

Uno de los principales problemas de la industria de la construcción es el deterioro de las estructuras de concreto reforzado.<sup>1,2</sup>

Este deterioro es resultado de fenómenos de corrosión que se presentan en la varilla de refuerzo de dichas estructuras. El deterioro del concreto reforzado tiende a agravarse en áreas geográficas en las que las bajas temperaturas obligan el uso de sal (NaCl) para derretir el hielo que llegue a acumularse, principalmente en construcciones para uso vial. Otro lugar donde se presentan problemas de corrosión similares es en zonas costeras.

Aún y cuando el concreto es capaz de actuar como una protección física y química para la varilla de refuerzo, bajo ciertas condiciones el metal tiende a desarrollar fenómenos de corrosión.<sup>3,4</sup> Estas condiciones pueden ser:

- Disminución de la basicidad o alcalinidad del concreto cuando los constituyentes de éste reaccionan con sustancias ácidas o con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del medio ambiente, fenómeno que se conoce como "carbonatación del concreto".
- Presencia de cloruros en el concreto, añadidos durante la mezcla del cemento y sus adiciones.
- Penetración de los cloruros desde el exterior una vez que la estructura ha sido construida.

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto tiene dos principales consecuencias que afectan la vida útil de las estructuras de concreto reforzado:

- 1) Por efecto de la corrosión se pierde metal base de las varillas de acero, causando un detrimento en las propiedades mecánicas de la estructura en su conjunto.

- 2) El metal perdido se convierte en productos de corrosión, cuyo volumen es superior al del metal base que le da origen. Este aumento no puede ser absorbido por el concreto, generándose esfuerzos internos que lo agrietan e incluso lo desprenden totalmente del resto de la estructura (ver figura 1).

Este tipo de fenómenos de corrosión disminuye dramáticamente la vida útil de las estructuras de concreto, por lo que se buscan soluciones a este problema que representa costos millonarios de mantenimiento y reparación a nivel mundial para dichas estructuras.<sup>5</sup>

Una línea de investigación que se ha seguido es el desarrollo de aceros que resistan los fenómenos de corrosión, cuando son embebidos en concreto, entre los cuales se tienen a los aceros duales (DFMS, Dual Ferritic-Martensitic Steels).

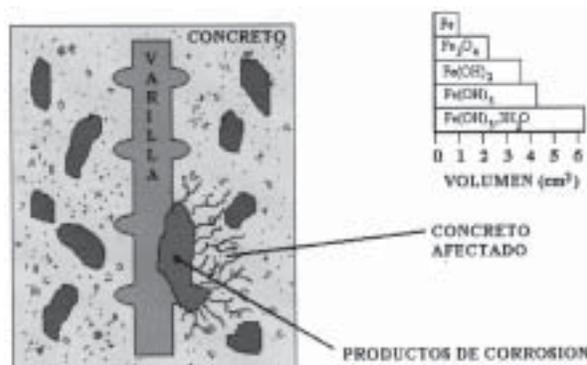


Fig. 1. Efectos de la corrosión del acero en el concreto armado.

\* Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Doctorado en Ingeniería de Materiales.

El objetivo para el desarrollo de estos aceros es el de incrementar la vida útil de las estructuras de concreto armado, sujetas a condiciones atmosféricas y de operación que incrementan la posibilidad del desarrollo de fenómenos de corrosión en el acero utilizado como refuerzo.<sup>6</sup>

Estos aceros tienen la particularidad de presentar una doble fase en su estructura metalúrgica, constituida por la fase ferrita en un 80% y la fase martensita en un 20% restante. En la figura 2 se muestra una micrografía de un acero con tales características.

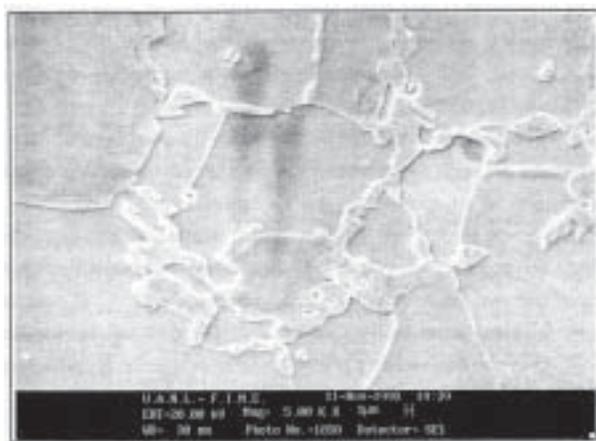


Fig. 2. Imagen de un acero doble-fase.

Estos aceros han demostrado que son capaces de resistir fenómenos de corrosión de acuerdo a la composición química de la aleación, por ejemplo, la presencia de carbono, de acuerdo a su contenido, aumenta o disminuye el grado de corrosión, si hay baja concentración evita la formación de carburos y esto es benéfico, ya que éstos fomentan la formación de pares galvánicos con otras fases, presentes en el acero; también esta propiedad de resistencia se puede deber a la distribución de fases ya que la microestructura obtenida después del tratamiento térmico de temple permite la formación de una matriz ferrita que rodea a las islas de martensita, permitiendo mejorar las propiedades de resistencia a la corrosión, o el alto contenido de silicio permite la formación de una capa pasiva superficial en el acero, la cual está compuesta de  $\text{SiO}_2$  evitando el desarrollo de algún fenómeno de corrosión.

## Experimentación

La División Tecnología de HYL S.A de C.V., produjo una familia de aceros con bajo contenido de carbono

(0.1%) y aleados al silicio (de 0.007 a un 2.02%) que fueron sujetos a tratamientos térmicos intercríticos. Los distintos contenidos de silicio y los tratamientos térmicos intercríticos efectuados a estos aceros tuvieron por objeto generar la doble fase ferrita – martensita descrita anteriormente. Los aceros se clasificaron de acuerdo al contenido de Si y tratamiento térmico realizado, teniendo así a las familias de aceros 1, 3, 4, B3, C3, A1, D1, A4, y D4.

Investigaciones efectuadas con anterioridad<sup>7</sup> han reportado que los aceros doble fase presentan mejores propiedades de resistencia a la corrosión y, que el incremento del contenido de silicio en el acero, también mejora sus características de resistencia a la corrosión en ambientes agresivos determinados.

## Familia de aceros sumergidos en soluciones acuosas

Una primer etapa, para evaluar las propiedades de resistencia a la corrosión de estos aceros, consistió en obtener especímenes de cada familia de aceros y sumergirlos en soluciones acuosas para realizar pruebas de corrosión acelerada.

Antes de sumergir los aceros en las soluciones acuosas, cada una de ellos fueron preparados y pesados para conocer su peso inicial. Se prepararon dos soluciones, a) hidróxido de calcio a saturación ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y b) hidróxido de calcio y cloruro de sodio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ ). Los contenidos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en las dos soluciones aseguraron que el pH estuviese entre 12 y 14, mientras que en la segunda solución el NaCl se adicionó para obtener un contenido de un 3% de iones cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) para simular condiciones marinas.

Después de 90 días de exposición, las muestras fueron vueltas a pesar para determinar la cantidad de material perdido por los fenómenos de corrosión que se presentaron. Mediante este tipo de ensayos es posible inferir las velocidades de corrosión de un material ante un ambiente determinado.

El material perdido se transforma en productos de corrosión del metal, y mediante la siguiente ecuación es posible encontrar una relación de este material perdido con una corriente eléctrica,<sup>8</sup> y a su vez calcular una velocidad de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ).

$$\Delta w = \frac{(I)(t)(M)}{(n)(F)} \quad (1)$$

donde:

$\Delta w$	Pérdida en peso del metal corroído
$I$	Flujo de corriente
$M$	Masa atómica del metal corroído
$n$	Número de electrones / átomo producidos en el proceso de corrosión
$F$	Constante de Faraday
$t$	Tiempo de exposición

La velocidad de corrosión de los fenómenos de corrosión se expresa en términos de densidad de corriente  $i$  (A/cm<sup>2</sup>), por lo que es necesario tomar en cuenta el área superficial expuesta del elemento que se está corroyendo y la ecuación 1 cambia a la siguiente forma:

$$i_{corr} = \frac{(\Delta w)(n)(F)}{(t)(M)(A)} \quad (2)$$

donde:

$i_{corr}$	Densidad de corriente o velocidad de corrosión.
$A$	Área superficial del elemento expuesto al medio agresivo

Por otra parte, prácticamente todas las técnicas electroquímicas destinadas a la investigación de fenómenos de corrosión se basan en la utilización del potencióstato, el cual es un instrumento electrónico que permite medir a una muestra metálica que esté expuesta a un medio conductor (electrolito), un potencial constante o variable, positivo o negativo con respecto a un electrodo de referencia.<sup>9</sup>

Por medio de este tipo de equipos, es posible determinar el comportamiento electroquímico de corrosión de un sistema determinado de dos maneras: de manera cualitativa a través de detectar un potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) de un metal que está siendo corroído y cuantitativamente existen técnicas electroquímicas que permiten conocer la velocidad de corrosión con la que un metal desarrolla los procesos de corrosión.<sup>10,11,12,13,14,15</sup>

La principal justificación que permite el uso de estas técnicas, es que son no destructivas, el concreto envuelve a la varilla de refuerzo en las estructuras de concreto reforzado, por lo que no es posible destruir una sección de la estructura para efectuar los análisis y evaluaciones a la varilla de refuerzo embebida en la estructura de concreto.

Las reacciones de corrosión en la varilla de refuerzo de una estructura de concreto armado ocu-

ren espontáneamente bajo ciertas condiciones. Esto indica que se libera energía en estas reacciones, la cual puede definirse como energía libre de Gibbs (DG), la cual se representa mediante la siguiente ecuación:

$$- \Delta G = W \quad (3)$$

donde  $-DG$  es el cambio de energía libre de una reacción espontánea y  $W$  es el trabajo efectuado. Cuando ocurre un proceso de corrosión en el hierro, ocurren intercambios de carga eléctrica debido a las diferencias de potencial que se presentan en las zonas anódicas y catódicas del sistema. Estas diferencias de potencial se conocen como potenciales de celda.<sup>16</sup>

Para que estos intercambios de carga en las reacciones de corrosión se realicen es necesario efectuar un trabajo, el cual se denomina trabajo eléctrico, cuya ecuación es:

$$\text{Trabajo eléctrico} = (n)(F)(DE) \quad (4)$$

donde:

$n$	Número de electrones transportados en la reacción
$F$	Constante de Faraday
$\Delta E$	Diferencia de potencial del sistema

Al no existir otro tipo de trabajo en el sistema, la ecuación 4 puede escribirse como:

$$-DG = (n)(F)(DE) \quad (5)$$

Esta ecuación es una relación básica entre el potencial de una celda electroquímica y el cambio en la energía libre que acompaña a la reacción de corrosión. Así, mediante la medición de los potenciales de celda, es posible determinar la tendencia termodinámica de un metal cuando se corroe en un sistema dado.

En la ecuación 5 se observa que el producto de la diferencia de potencial de la celda por el número de electrones transferidos, es proporcional a la disminución de la energía libre de la reacción de la celda. De esta manera, la diferencia de potencial de una celda de corrosión será una propiedad intensiva del sistema, por lo tanto, la diferencia de potencial no depende del tamaño de la celda, sino

de la reacción electroquímica que se genere, la cual indica el número de electrones que están siendo transferidos.

Al presentarse una reacción de corrosión en un sistema, se estará llevando a cabo un cambio de la energía libre, la cual es una medida directa del potencial eléctrico del sistema. Así, si el cambio de energía que acompaña la transición de un sistema de un estado de mayor energía a otro estado de menor energía es negativo, indica una pérdida de su nivel de energía y, por lo tanto, una reacción espontánea (como la reacción de corrosión del hierro), por lo que si no existen fuerzas externas que actúen sobre el sistema, éste tenderá a un estado de mínima energía (formando herrumbre en el caso del hierro).

### Familia de aceros embebidos en mortero

Con objeto de determinar los potenciales de corrosión de los aceros estudiados y evaluar el grado de corrosión, se fabricaron probetas de mortero. La familia de aceros seleccionadas presentan alguna característica importante, como el contenido de silicio o tratamiento térmico intercrítico efectuado en particular, que se consideró importante para evaluar.

La preparación de las probetas se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C 188-72, el diagrama de la figura 3 se representa la disposición de los aceros. Para simular las condiciones presentes en las zonas marítimas, que es donde los fenómenos de corrosión en el acero de refuerzo de las estructu-

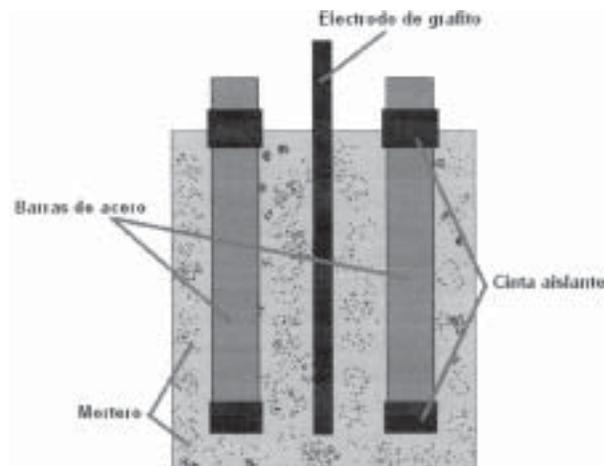


Fig. 3. Elementos de las probetas construidas.

ras de concreto reforzado son más drásticos, se agregó sal común (NaCl) a la mezcla de mortero constituida de las siguientes proporciones:

Arena / Cemento	3 / 1
Agua / Cemento	0.5
Ion Cloruro (Cl <sup>-</sup> )/Cemento	3% masa de Cemento

Una vez que las probetas fueron coladas, se dio un tiempo de curado de 24 horas y posteriormente las probetas fueron parcialmente sumergidas en agua (ver figura 4).



Fig. 4. Disposición de probetas de mortero.

El potencióstato utilizado para medir el E<sub>corr</sub> fue un potencióstato-galvanostato VIMAR modelo PG-5RV, realizándose las mediciones en los laboratorios del Doctorado en Ingeniería de Materiales de la FIME. La disposición del equipo de medición y de las probetas se ilustra en la figura 5.



Fig. 5. Potencióstato-galvanostato.

Para efectuar las mediciones se utilizó como electrodo de referencia un electrodo de calomel saturado, siendo su potencial estándar  $E^\circ = 0.240 \text{ V}$ ,<sup>18</sup> este  $E^\circ$  permaneció constante durante todas las mediciones y, como su nombre lo indica, es el valor del potencial con el cual se refiere la medición del potencial del electrodo de trabajo, en este caso de los aceros al Si embebidos en el mortero.

Las mediciones de potencial de corrosión se efectuaron diariamente durante 260 días, para conocer su comportamiento e inferir los mecanismos de corrosión que se desarrollaron. La punta de la barra de acero embebida en la probeta de mortero se conecta a una entrada del potencióstato (ánodo) y la otra entrada se conecta al contraelectrodo o electrodo auxiliar, en este caso electrodo de grafito (cátodo), el electrodo de referencia se conecta a la punta electrométrica del potencióstato, estas conexiones permitirán la lectura del  $E_{\text{corr}}$  (ver figura 5).

Con este dato es posible determinar el grado de corrosión del acero cuando está embebido en una estructura de concreto. Así, los fenómenos de corrosión de las estructuras pueden clasificarse de acuerdo al valor numérico del  $E_{\text{corr}}$ :

- Corrosión incipiente, de 0.0 a  $-0.150 \text{ V}$ .
- Corrosión moderada, de  $-0.150$  a  $-0.350 \text{ V}$ .
- Corrosión severa, de  $-0.350$  a  $-0.750 \text{ V}$ .

Cuando se presenta corrosión incipiente, los daños a la estructura serán de poca o ninguna consideración; en procesos de corrosión moderados la estructura comienza a presentar problemas estructurales; y para procesos de corrosión severos, las propiedades mecánicas y de servicio de la estructura en su conjunto están en peligro, pues entre más negativo sea el  $E_{\text{corr}}$  la estructura presenta un proceso de corrosión más fuerte. La figura 6 ayudará a comprender esta situación.

## Resultados

### *Familia de aceros sumergidas en soluciones acuosas. Ensayos de corrosión acelerada*

Al hacer una comparación general del comportamiento de los aceros expuestos a las soluciones 1 y 2, se observó que los aceros que presentaron menores velocidades de corrosión y, por lo tanto menor tendencia al deterioro, son los aceros con un



Fig. 6. Probabilidad de que en un sistema acero convencional-concreto se presenten fenómenos de corrosión.

contenido de silicio de 0.38%, mientras que los aceros con mayores velocidades de corrosión contienen 1.23 y 2.02% de silicio.

Considerando que una de las teorías sobre los aceros doble fase ferrita-martensita y su resistencia a presentar fenómenos de corrosión cuando son embebidos en concreto se relaciona con un incremento en el contenido de silicio en el acero, esta situación no se presentó en los aceros evaluados, ya que los aceros con mayores contenidos de silicio fueron los aceros que mayores velocidades de corrosión presentaron.

Esto se puede explicar diciendo que cada familia de aceros presentó en su microestructura una serie de inclusiones no metálicas, las cuales se integran a un comportamiento cinético y se convierten en heterogeneidades en el material, creándose sitios activos que son zonas sumamente susceptibles a desarrollar fácilmente fenómenos de corrosión.

Al graficar las pérdidas en peso de las muestras expuestas a la solución 1 y a la solución 2 en una escala vertical y los valores de  $i_{\text{corr}}$  correspondientes a estos valores en una escala horizontal, se obtienen los gráficos de las figuras 7 y 8.

Si se comparan estos dos gráficos, se observa que los valores de pérdida en peso y velocidad de corrosión presentan una relación lineal, ver figura 9.

Esta relación lineal indica que todos los aceros presentan una misma cinética de corrosión, aún y

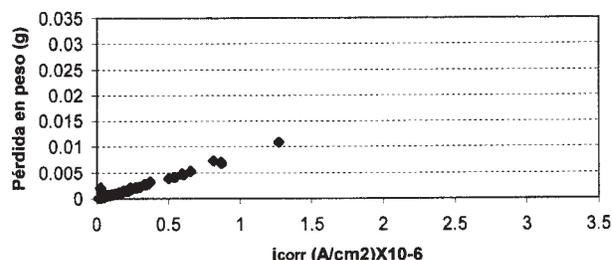


Fig. 7. Relación pérdida en peso-velocidad de corrosión para muestras de aceros en solución 1 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

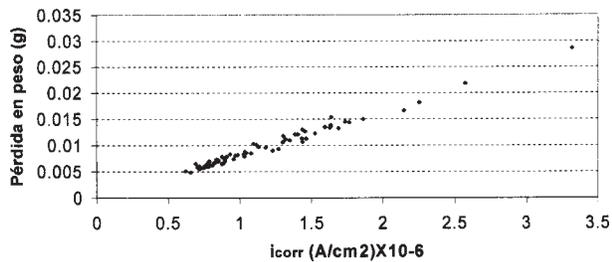


Fig. 8. Relación pérdida en peso-velocidad de corrosión para muestras de aceros en solución 2 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ ).

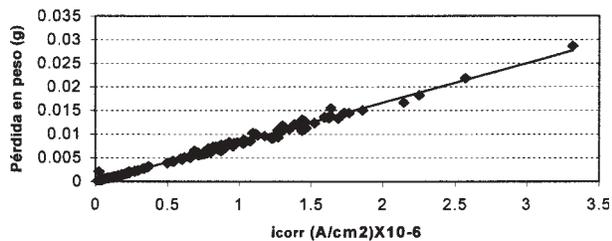


Fig. 9. Relación pérdida en peso-velocidad de corrosión para muestras de aceros en soluciones 1 y 2.

cuando las muestras de los aceros presentan distintos contenidos de silicio y que fueron sometidas a dos condiciones de agresividad diferentes, es decir, los aceros evaluados presentan un mismo mecanismo de corrosión.

Por lo tanto, es posible hablar de una sola constante de Faraday para esta serie de aceros, la importancia de esta constante radica en el hecho de que significa la cantidad de corriente eléctrica que se genera debido a la oxidación de los aceros e inferir la vida útil de éstos bajo condiciones alcalinas y presencia de iones cloruro  $\text{Cl}^-$ .

Los aceros aleados al silicio que fueron sometidos a las pruebas de corrosión acelerada, presentaron picaduras, lo cual indica que el mecanismo de corrosión que se presenta en estos aceros al ser utilizados como varilla de refuerzo en estructuras de concreto, es el de corrosión localizada por picadura.

Un material con tales características no debe ser utilizado para la fabricación de varilla de refuerzo, ya que el desarrollo de este tipo de fenómenos de corrosión es difícil de detectar y de reparar.

Se observó que las picaduras presentes en los aceros no siguen un patrón preferencial de ataque a alguna de las fases de la microestructura.

### *Familia de aceros embebidos en mortero. Mediciones de potenciales de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ )*

Después de 8 meses de exposición de las probetas de mortero al medio acuoso, se construyeron gráficas de potencial vs. tiempo (figuras 10 -18), que sirvieron para describir el comportamiento de los aceros involucrados frente a condiciones de estructuras de concreto.

Como se puede observar, en los gráficos presentados, todos los aceros que fueron embebidos en mortero desarrollan potenciales de corrosión que se encuentran en el intervalo comprendido entre los  $-0.300$  y los  $-0.600$  V, lo cual indica que se han desarrollado fenómenos de deterioro en los distintos aceros y que se considera como grave de acuerdo a lo que se presenta en la figura 6.

Se observan caídas de potencial repentinas, este comportamiento se puede interpretar como picaduras en la superficie del acero, debido a que al formarse una de éstas se genera una zona anódica muy pequeña, en la cual se presenta una diferencia de potencial considerable, ya que el área que está siendo corroída es menor con respecto al resto del material creándose zonas activo-pasivas de ahí estas caídas y recuperación del  $E_{\text{corr}}$ , los fenómenos de corrosión sólo se realizan en esta zona y el resultado es un deterioro localizado del metal.

Con objeto de comprobar estas consideraciones, las probetas de mortero fueron fracturadas para observar el grado de deterioro que presentaron los aceros después de 12 meses de estar embebidas en el mortero.

Al extraer las barras de acero de las probetas de mortero, efectivamente se observaron picaduras de corrosión en distintas zonas superficiales, descartando fenómenos de corrosión generalizada, como se hubiera esperado de un acero convencional (ver figura 19).

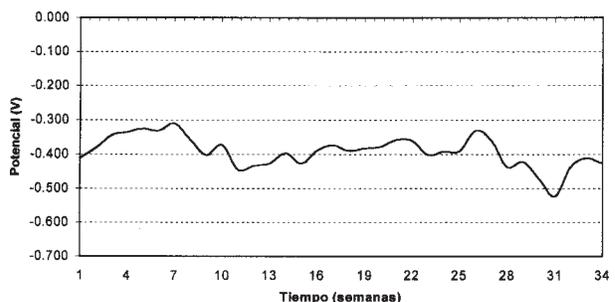


Fig. 10. Comportamiento de potencial para el acero 1.

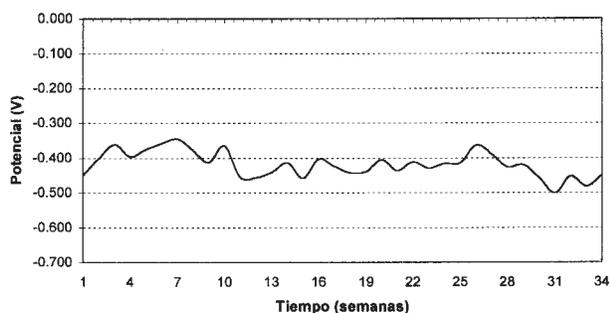


Fig. 11. Comportamiento de potencial para el acero 3.

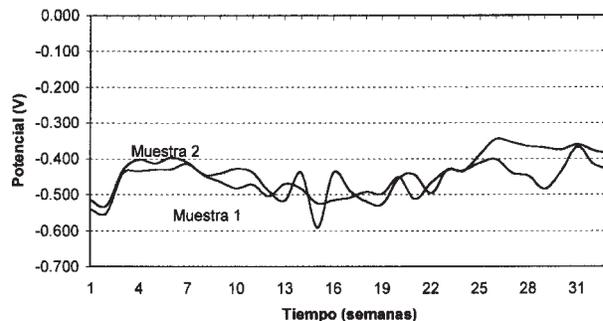


Fig. 15. Comportamiento de potencial para el acero A1.

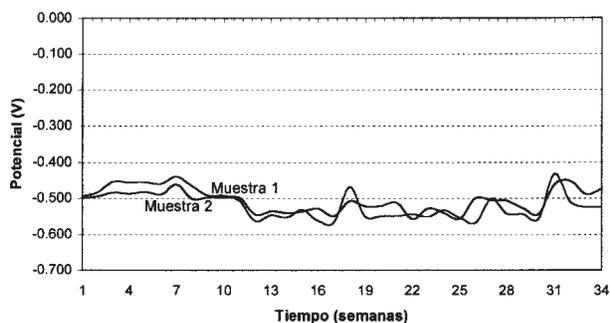


Fig. 12. Comportamiento de potencial para el acero 4.

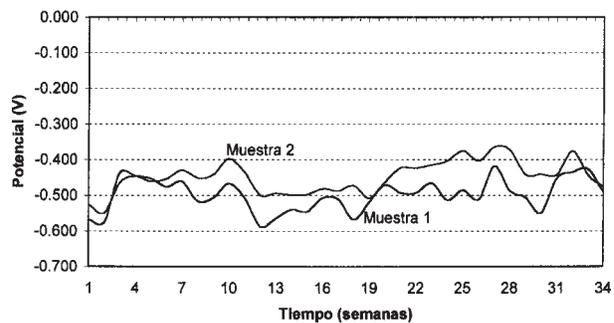


Fig. 16. Comportamiento de potencial para el acero A4.

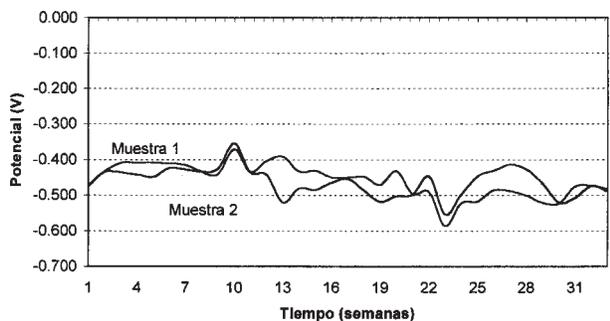


Fig. 13. Comportamiento de potencial para el acero B3.

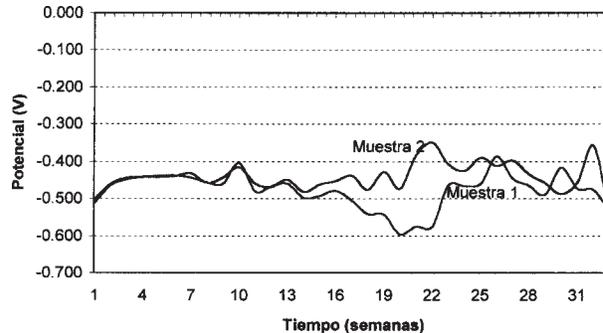


Fig. 17. Comportamiento de potencial para el acero D1.

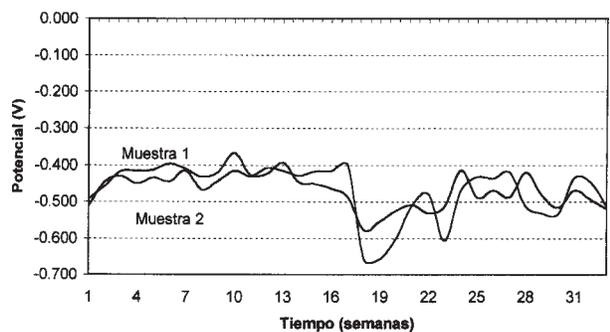


Fig. 14. Comportamiento de potencial para el acero C3.

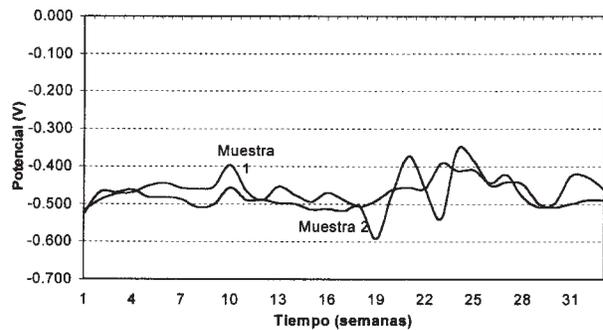


Fig. 17. Comportamiento de potencial para el acero D4.

Estas picaduras comprobaron el comportamiento de potencial de corrosión que se detectó mediante el potencióstato, y además, se validó el comportamiento de los aceros cuando fueron sometidos a las pruebas de corrosión acelerada en la solución 2 ( $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ ).

Por lo tanto, estos resultados arrojan que los aceros DFMS fabricados no cumplen las exigencias para ser utilizados dentro de la industria de la construcción.

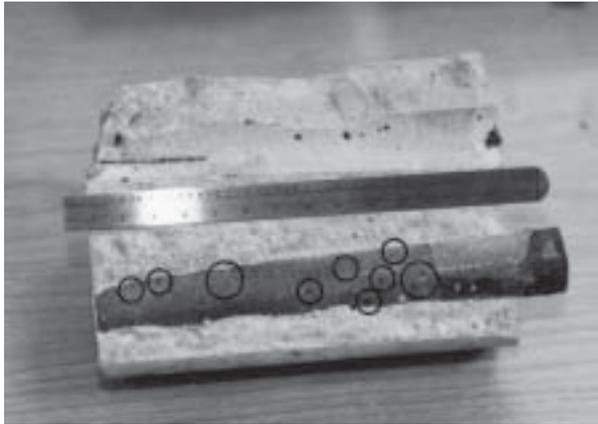


Fig. 19. Imagen que muestra algunas picaduras encontradas en la familia de aceros D4, después de 12 meses de experimentación al fracturar la probeta.

## Conclusiones

Es posible generar aceros doble fase ferrítico martensíticos (DFMS), mediante una composición química del acero y un tratamiento térmico intercrítico adecuados.

Bajo las condiciones de experimentación efectuadas, el mecanismo de corrosión que se presenta para esta familia específica de aceros es el de corrosión localizada por picadura.

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante la experimentación llevada a cabo, los aceros evaluados no son viables para la fabricación de varilla de refuerzo en estructuras de concreto armado.

## Resumen

Se presentan los resultados obtenidos al realizar evaluaciones de carácter metalúrgico y electroquímico a una serie de aceros aleados al silicio. Se

realizaron distintos tratamientos térmicos a estos aceros para generar una microestructura, compuesta de una matriz de ferrita y una segunda fase de martensita, cuya fracción volumétrica fuera equivalente a un 20% del total de la microestructura. Los aceros sujetos a tratamiento térmico fueron embebidos en mortero con el objetivo de construir probetas, que pudieran ser utilizadas para realizar mediciones electroquímicas de potencial de corrosión. Se efectuaron pruebas de corrosión acelerada, a fin de complementar la información obtenida mediante las pruebas electroquímicas.

*Palabras clave:* corrosión, concreto reforzado, aceros doble fase, potencial de corrosión, velocidad de corrosión.

## Abstract

Results obtained by metallurgic and electrochemical evaluations of silicon alloy steels are presented. In order to obtain dual-phase ferritic martensitic steels, heat treatments were performed on these silicon alloy steels to produce a ferrite matrix and martensite as a second phase. The steels obtained in this way, were embeded in a cement, sand and salt mix to built electrochemical cells that were used to measure corrosion potentials in the embeded steels. To complement the corrosion potential measurement, steel samples were exposed to accelerate corrosion testing.

*Keywords:* corrosion, reinforced concrete, dual-phase steels, corrosion potentials, corrosion rate.

## Referencias

1. Waddell y Dobrodolwski, Manual de la construcción con concreto, capítulo 3, McGraw Hill, México 1996.
2. Castro P., Corrosión en estructuras de concreto armado, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México 1998.
3. Biczok I., Corrosión y protección del hormigón, Urmo S.A. de Ediciones, España 1981.
4. Andrade C., Corrosión localizada del acero en contacto con hormigón, Revista Iberoamericana de Corrosión y Protección, Vol. XV – núm. 4, 1984.
5. Fontana M.G., Corrosion Engineering, McGraw

- Hill International Editions, Singapore 1987.
6. Trejo D., Monteiro P., Thomas G. and Wang X., Mechanical properties and corrosion susceptibility of dual-phase steel in concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 7, pp. 1245-1254, 1994.
  7. Trejo D., Monteiro P. and Thomas G., Dual-Phase ferritic martensitic steel for concrete reinforcement, *Proceedings of the fifth (1995) International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 177-182, The Netherlands 1995.
  8. Smith W.F., *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, McGraw Hill, México 1994.
  9. Avila y Genescá, *Más allá de la herrumbre*, Fondo de Cultura Económica S.A., México 1986.
  10. Rodríguez P., Ramírez E. and González J.A., Methods for studying corrosion in reinforced concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 167, June 1994.
  11. Alonso C. y Andrade C., Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en hormigón, *Materiales de construcción*, Vol. 37, No. 207, julio/agosto/septiembre 1987.
  12. Rodríguez P. and González J.A., Use of the coulometric method for measuring corrosion rates of embedded metal in concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 46, No. 167, June 1994.
  13. González J.A., López W. and Rodríguez P., Effects of moisture availability on corrosion kinetics of steel embedded in concrete, *Corrosion*, Vol. 49, No. 12, December 1992.
  14. González J.A., Feliú S., Rodríguez P., Ramírez E., Alonso C. and Andrade C., Some questions on the corrosion of steel in concrete (part I): when, how and how much steel corrodes, *Materials and Structures*, Vol. 29, January-February 1996.
  15. González J.A., Feliú S., Rodríguez P., Ramírez E., Alonso C. and Andrade C., Some questions on the corrosion of steel in concrete (part II): Corrosion mechanism and monitoring, service life prediction and protection methods, *Materials and Structures*, Vol. 29, January-February 1996.
  16. Castelan W.G., *Fisicoquímica*, Addison-Wesley Iberoamericana S.A., E.U.A. 1987.
  17. *Annual Book of ASTM Standards*, part 13, 1977.
  18. Rodríguez P., *Curso: Introducción a la corrosión*, Doctorado en Ingeniería de Materiales de FIME, UANL, 1998.