

Use of Stainless Steel as a Reinforced Material in Concrete Structures

M. Sádaba, G. Martínez, M. Sánchez*

*Centro de Estudios de Corrosión. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Av. Guajira,
Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela*

Received 13 April 2004; accepted in revised form 6 July 2004

Abstract

For stainless steel 316 evaluation, reinforced concrete samples (12x12x25 cm), using four carbon steel bars and/or 316 stainless steel and two graphite reference electrodes were carried out. The concrete has resistance of 200 Kg/cm² and a water/cement ratio of 0.65. The samples were exposed to an artificial environment of 5% of saline concentration and carbon dioxide, evaluating periodically the state of the samples in each environment. Electrochemical evaluations, such as potential measurement vs. Cu/CuSO₄ electrode and polarization resistance were carried out. In addition, the cyclical polarization of stainless steel samples in pore solution (pH = 13.40) with different chloride concentration (0%, 0.5% and 5% chloride concentration) were evaluated. Stainless steel exposed for 6477 hours in saline environments showed very low corrosion rate for stainless steel, while carbon steel showed corrosion rate from moderate to high. Galvanic couples (stainless steel-carbon steel) showed intermediate corrosion rate. In carbonation environments low corrosion rate were detected for both materials. With cyclical polarization with 5% NaCl, corrosion products and pitting were observed.

Keywords: 316 stainless steel, corrosion, NaCl, carbonation, pore solution, pitting.

Introducción

Hoy en día, en todos los países el número de estructuras de concreto dañado es muy grande. El problema del deterioro progresivo de las estructuras de concreto armado en ambientes agresivos es preocupante y de actualidad. De manera tal

* Corresponding author. E-mail address: miguelcvc@yahoo.com

que cada vez y con mayor frecuencia se observan en autopistas y puentes u otras estructuras significativas de interés social, la realización de un mantenimiento necesario y bastante costoso, principalmente en lugares fríos o templados donde las nevadas son algo común y es preciso el uso de sales de deshielo, o ambientes marinos donde la concentración de estas sales también resulta elevada, por no mencionar otra clase de iones a los que estas estructuras están frecuentemente expuestas. Este tipo de construcciones que en un principio fueron diseñadas para tener una duración de varias décadas, son objeto de sucesivas reparaciones o incluso son reemplazados completamente a los pocos años de servicio.

Es por esto que se ve planteada la necesidad del uso de métodos adicionales de protección contra la corrosión, tales como galvanizado, uso de acero inoxidable, cubiertas epóxicas, materiales compuestos, inhibidores de corrosión o protección catódica, entre otros, pero cada uno de estos presenta limitaciones en su aplicación.

Estos aspectos han generado diversos cuestionamientos acerca de la calidad de los materiales y el diseño empleado para dichas estructuras. Varias investigaciones [1-3] se han llevado al cabo en las cuales se plantea el uso del acero inoxidable 316 a determinadas concentraciones aportando resultados favorables. Por ende, se ha considerado como objetivo principal de esta investigación estudiar el uso del acero inoxidable 316 (SS) como reemplazo del acero al carbono (CS) en zonas donde el concreto se encuentre más expuesto a ambientes agresivos. El estudio planteado ayudará entre otros aspectos a determinar la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 316, después de exponer las probetas a un medio salino simulado y a un ambiente con presencia de dióxido de carbono, estudiando además, los posibles problemas de corrosión galvánica que se pudieran presentar en el acoplamiento del acero inoxidable y el acero al carbono.

Procedimiento experimental

Para el desarrollo de esta investigación [4] se elaboraron 16 probetas rectangulares con dimensiones de 12x12x25 cm, las cuales contenían en su

interior cuatro barras de acero inoxidable y/o acero al carbono (electrodo de trabajo/electrodo auxiliar) y dos electrodos de grafito (electrodo de referencia). El arreglo geométrico se señala en la Fig. 1, y nueve celdas de acero inoxidable 316 (barras de 2 cm de largo) en solución de agua de poro con diferentes concentraciones de NaCl. La composición química del acero inoxidable 316 utilizado en esta investigación se muestra en la Tabla 1. Las probetas fueron clasificadas de acuerdo a la configuración interior, como se muestra en la Tabla 2; por ejemplo, codificación *2SID* se refiere a la barra en la posición inferior derecha (*D*) de la probeta número 1(*I*) del grupo conformado por 4 barras de acero inoxidable 316 (*2*) expuesta a medio de cloruros (*S*). Los electrodos de trabajo se cortaron a 20 cm de longitud, se perforaron por una de los extremos soldando un cable para efectuar las conexiones a la hora de realizar las medidas electroquímicas, y se acondicionaron las barras para que el área expuesta fuese de 30 cm². Los electrodos de grafito se prepararon de acuerdo al procedimiento utilizado en el Centro de Estudios de Corrosión – LUZ [5].

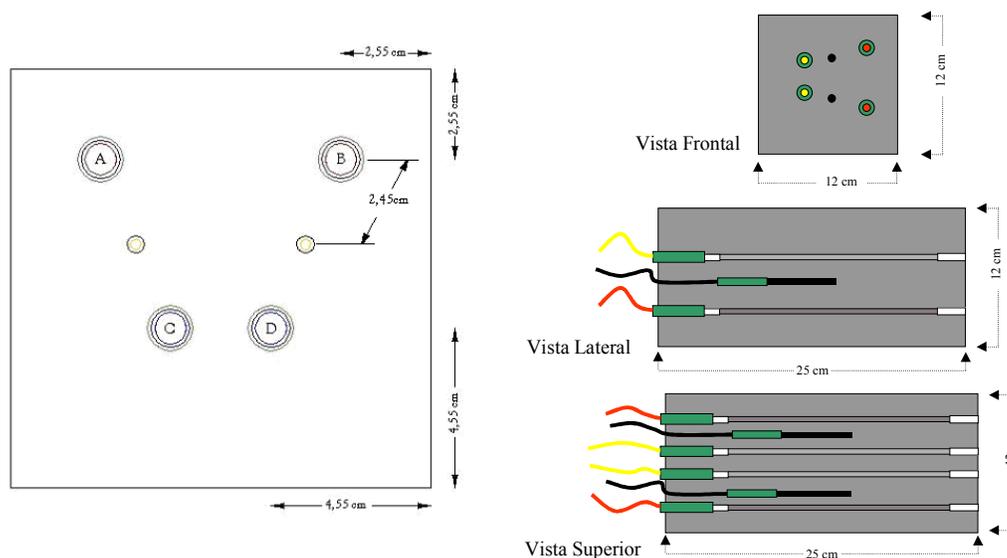


Figura 1. Localización e identificación de las barras de acero inoxidable/acero al carbono en las probetas de concreto armado.

Tabla 1. Composición del acero inoxidable AISI tipo 316.

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
0.03	2	0.045	0.3	10	16-18	10-14	2-3	0.1-0.16

Tabla 2. Codificación de las barras de las probetas de concreto armado.

CARACTER	VALOR	DESCRIPCIÓN
Primero	1	Conformada por 4 barras de CS (acero al carbono)
	2	Conformada por 4 barras de SS (acero inoxidable)
	3	Conformada por 2 barras de CS y 2 barras de SS
Segundo	S	Expuestas a medio de cloruros
	C	Expuesta a CO ₂
Tercero	1	Probeta N° 1
	2	Probeta N° 2
	3	Probeta N° 3
Cuarto	A	Barra superior izquierda
	B	Barra superior derecha
	C	Barra inferior izquierda
	D	Barra inferior derecha

El diseño de mezcla se realizó para una resistencia a la compresión de 200 kg/cm² y una relación agua/cemento 0.65 considerando un factor de asentamiento de 5 cm. Se realizaron varios ensayos físicoquímicos al concreto para determinar sus características (resistencia a la compresión, absorción capilar, perfil de cloruros, profundidad de carbonatación) obteniendo un concreto de baja calidad: muy poroso y de baja resistencia.

Las probetas de concreto fueron expuestas en ambientes de concentración salina al 5% (8 probetas) y bajo concentraciones de CO₂ (8 probetas). Todas las probetas fueron evaluadas electroquímicamente, realizando medidas de potenciales tomando como electrodo de referencia un electrodo de Cu/CuSO₄ saturado, según la Norma ASTM C876-95 [6]. Estas mediciones se efectuaron periódicamente utilizando un multímetro digital de 10 MΩ de impedancia interna y al finalizar el periodo evaluado se determinaron los potenciales de cada electrodo mediante al método de polarización lineal. La densidad de corriente de corrosión se determinó mediante el método de resistencia a la polarización lineal, utilizando el GECOR6. Las celdas de acero inoxidable en solución de agua de poro (pH = 13.40) fueron evaluadas mediante polarización lineal y cíclica a

través del potencióstato/galvanostato PAR 273A utilizando como electrodo de referencia el electrodo de Ag/AgCl y electrodos auxiliares de titanio platinizado. Mediante la primera se efectuó un barrido sencillo en un rango de potencial pequeño, ± 10 mV del potencial de reposo. Mediante la polarización cíclica se obtuvo la curva de polarización completa. Las siguientes condiciones fueron fijadas: potencial límite inferior: -300 mV; potencial límite superior: 800 mV; velocidad de barrido de potencial: 0.28 mV/s; modo de operación: barrido continuo.

Resultados y discusión de resultados

Medidas de potenciales

Los resultados de las mediciones de potenciales fueron analizados según el criterio de valoración de potenciales del acero al carbono en hormigón vs. Cu/CuSO₄ establecido en el manual Durar [7]. Para el acero inoxidable, estos criterios están basados en otras investigaciones [8].

Las probetas de concreto fueron expuestas a ambientes de CO₂ y a ambientes de NaCl.

Medio de exposición: CO₂

Se controló un medio inicial de 0.044 %M (concentración atmosférica) con temperatura de 27 °C y humedad relativa entre 65% – 70%. Luego se sometieron a un medio acelerado de CO₂ (4.313 %M) (manteniendo las condiciones de temperatura y humedad relativa) para promover la carbonatación total de cada probeta. El periodo total evaluado bajo concentraciones de CO₂ fue de 6224 h. Los resultados de las mediciones de potenciales durante este periodo se resumen en las Fig. 2 y 3. Mediante estas gráficas se puede observar que para todas las barras, independientemente de la posición que ocupan en la configuración interior de las probetas, los potenciales con respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ oscilan entre 0 y -200 mV mostrando un riesgo de daño por corrosión despreciable.

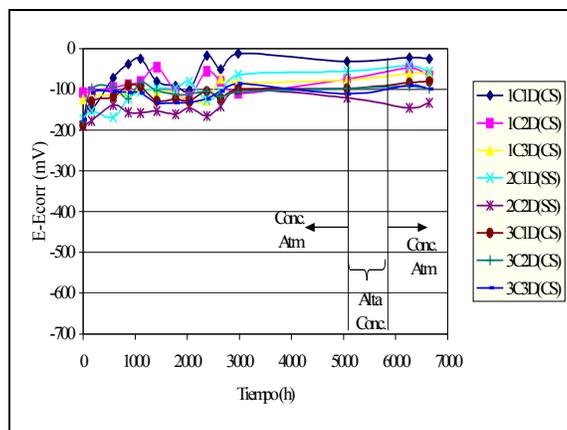


Figura 2. Potencial vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración de CO₂ para la posición A (2.55 cm).

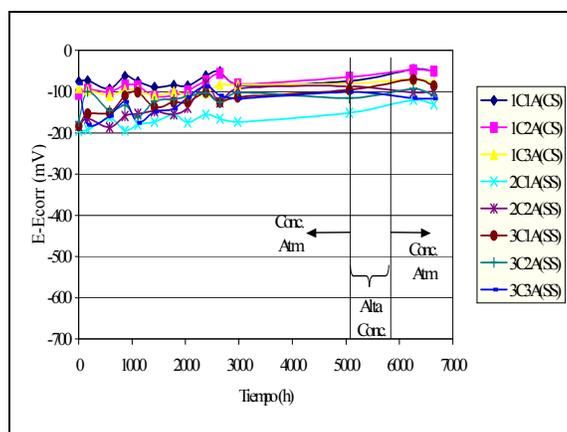


Figura 3. Potencial vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración de CO₂ para la posición D (4.55 cm).

Medio de exposición: NaCl

En ambientes de NaCl, las probetas fueron evaluadas por un lapso de 6477 h, en el cual se mantuvieron durante las primeras 1413 h de exposición bajo un medio artificial de cloruros con un rango de temperatura entre 25 – 36 °C y 100% HR a 5% NaCl, y luego fueron sometidas a rociado con solución salina de la misma concentración, conservando el rango de temperatura y con 80% HR.

En la Fig. 4 se muestran los perfiles de cloruros efectuados para diferentes tiempos durante el periodo de evaluación y se indica la profundidad de las barras. Se midieron potenciales para todos los electrodos y en el caso de las probetas que contenían barras de acero inoxidable y acero al carbono, se determinó la diferencia de potenciales de cada par galvánico, como se muestra en la Fig. 5.

Inicialmente, los potenciales de los acoplamientos tienen un comportamiento regular con potenciales que oscilan entre -100 y -200 mV, manteniéndose en el rango de pasividad hasta las 1150 horas de exposición aproximadamente. Luego, a mayor tiempo de exposición, se observa la tendencia de estos valores a decrecer hasta llegar a potenciales entre -500 y -600 mV vs. Cu/CuSO₄.

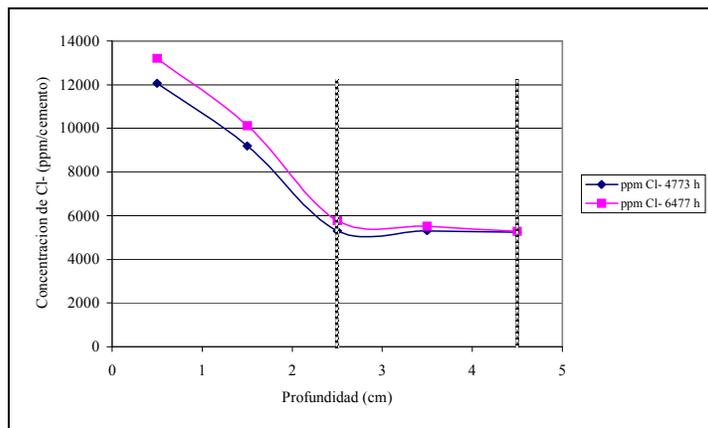


Figura 4. Perfil de cloruros realizado a las 4773 y 6477 horas de exposición.

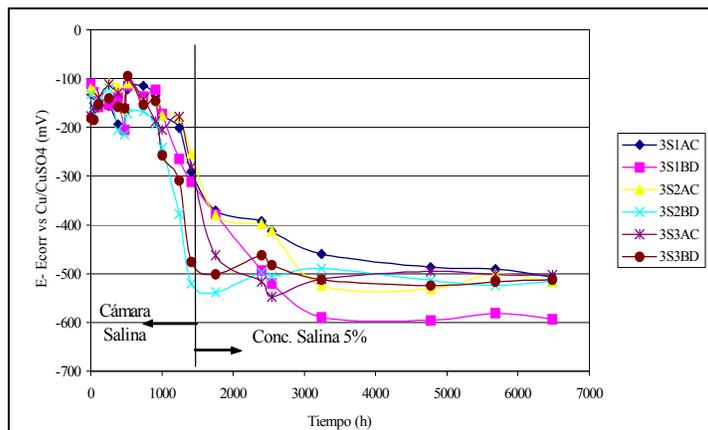


Figura 5. Potencial vs. tiempo para los acoplamientos AC y BD de las probetas tipo III (acero al carbono y acero inoxidable 316) expuestas a ambientes de 5.0% NaCl.

Este comportamiento resulta predecible, debido a que mientras el refuerzo de acero al carbono se encuentre en estado pasivo no ocurrirá unión galvánica. La pérdida de la pasivación o activación del acero, da lugar a la formación de los pares galvánicos, lo que se observa con la tendencia de la disminución de los potenciales en el tiempo. Todos los acoplamientos mostrados presentan un comportamiento similar, pues continúan con la misma tendencia de sus

potenciales dirigidos hacia valores más electronegativos a mayor tiempo de exposición, aunque el par galvánico 3S1BD se ve afectado un poco más por la pérdida de la pasividad que las demás, arrojando valores de hasta -600 mV al final del periodo de exposición evaluado en este trabajo.

Los valores de las mediciones de potenciales vs. Cu/CuSO_4 para los electrodos de acero al carbono y acero inoxidable 316, graficados en función de tiempo, son presentados en las Fig. 6 y 7.

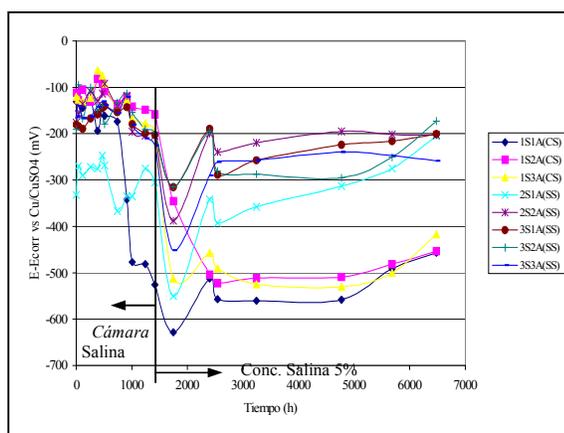


Figura 6. Potencial vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración de NaCl para la posición A (2.55 cm).

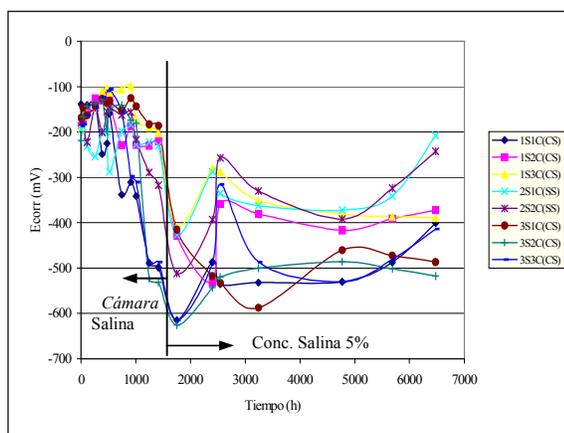


Figura 7. Potencial vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración de NaCl para la posición C (4.55 cm).

En la Fig. 6 se muestra la evolución de las mediciones de potenciales durante el periodo de tiempo evaluado para las barras de acero al carbono y acero

inoxidable ubicadas a 2.55 cm de profundidad (correspondientes a la posición A y B). Para las barras ubicadas en la posición A, se observa que en las primeras 1005 horas de exposición, tanto el acero inoxidable como el acero al carbono se encuentran entre un rango de potenciales de -50 y -200 mV vs. Cu/CuSO₄, por lo que se sabe que estas barras se encuentran electro-químicamente pasivas, a excepción de las ubicadas en las posiciones 1S1A(CS), la cual llega hasta casi -500 mV con tendencia hacia valores más negativos y 2S1A(SS), cuyos potenciales oscilan entre -250 y -350 mV, lo que indica que estas barras se encuentran más activas. Luego de este momento hasta las 1749 horas, estos electrodos muestran una inclinación hacia rangos más electronegativos, observándose que para este tiempo, el acero inoxidable revela potenciales entre -300 y -450 mV, excluyendo al electrodo 2S1A, el cual alcanza un valor alrededor de -550 mV, lo cual demuestra una condición de actividad mayor, y para el acero al carbono, los potenciales varían entre -515 y -630 mV, lo cual representa un alto riesgo de daño por corrosión, a excepción de la barra ubicada en la posición 1S2A, cuyo valor en este punto es próximo a -350 mV. Después de las 1749 horas y hasta completar el periodo de exposición, 6477 horas, se puede notar una tendencia común de estabilización para todos los electrodos, moviéndose hacia potenciales más electropositivos, donde para el acero inoxidable se tiene que los valores se ubican entre -170 y -260 mV vs. Cu/CuSO₄, demostrando un comportamiento inactivo electro-químicamente o bajo riesgo a daño por corrosión y el acero al carbono se ubica entre potenciales de -410 y -460 mV vs. Cu/CuSO₄ lo que es indicativo de alto riesgo a corrosión uniforme. Las barras ubicadas en la posición B reflejan un comportamiento análogo a este. Hay que mencionar que a las primeras 1413 horas de exposición, estas probetas se encontraban dentro de una cámara salina al 5% de NaCl y que a partir de este tiempo fueron rociadas con solución salina al 5%. Esta variación de medios de exposición se ve reflejada en la gráfica, ya que inicialmente se observa un tiempo de respuesta mas lento a los agentes corrosivos, pero luego se puede notar una tendencia brusca a la activación del refuerzo, donde al final del periodo de exposición se puede notar la propensión a cierta estabilización de los

potenciales, manteniéndose para el acero inoxidable por debajo de la actividad, mientras que para el acero al carbono se ubican entre valores de -400 y -500 mV, como se mencionó anteriormente.

En la Fig. 7 se muestra el comportamiento para las barras de acero inoxidable y acero al carbono a 4.55 cm de profundidad (posición C y D), específicamente para la posición C. Estos potenciales oscilan entre valores de -100 y -250 mV vs. Cu/CuSO₄ para las primeras 1005 horas de exposición, tanto para el acero inoxidable como para el acero al carbono, excluyendo a los electrodos de acero al carbono 1S1C y 3S3C, cuyos potenciales llegan hasta valores cercanos a -350 mV. Luego de este periodo y hasta las 1749 horas de exposición a los cloruros, sus potenciales tienden a valores más negativos hasta aproximadamente -600 mV para el acero al carbono y -520 mV para el acero inoxidable, aunque se aprecian barras con potenciales alrededor de los -430 mV, como es el caso de las barras 1S2C(CS), 1S3C(CS), 3S1C(CS), y 2S1C(SS). De aquí en adelante y hasta la culminación del periodo de exposición evaluado, se puede notar un comportamiento común de la búsqueda de valores de potenciales menos electronegativos, en donde solo las barras de acero inoxidable logran ubicarse dentro de un rango de potenciales de pasividad, entre -200 y -250 mV, mientras que las barras de acero al carbono aportan potenciales electronegativos alrededor de -370 y -520 mV. Las barras ubicadas en la posición D presentan un comportamiento bastante parecido.

Finalmente, si se compara el comportamiento de las barras según su ubicación dentro de la probeta (A, B, C o D), se sabe que a medida que el espesor de recubrimiento es mayor las barras deberían encontrarse más protegidas de los agentes causantes de la corrosión. Pero conociendo que se trata de un concreto de mala calidad, baja resistencia y alta porosidad, y de acuerdo a los resultados del perfil de cloruros, en donde se puede observar que estos sobrepasan el límite permisivo (tomado como referencia para este estudio el límite del acero al carbono ó 4000 ppm) para ambas profundidades de los electrodos y para los diferentes tiempos de ensayo, es de esperarse un comportamiento similar de las barras ubicadas en la posición A y B con las ubicadas en la posición C y D.

Medidas de velocidad de corrosión

Los resultados de velocidad de corrosión fueron analizados según los criterios planteados en el manual Durar [7].

Se determinó la velocidad de corrosión para cada una de las probetas evaluadas en los diferentes medios de exposición, tanto a concentración de cloruros al 5% como a CO₂ a concentración atmosférica y a alta concentración (4.313 %M).

Medio de exposición: CO₂

La determinación de la velocidad de corrosión para cada una de las barras de las probetas expuestas a CO₂, expuestas dentro de la cámara primeramente a baja concentración (concentración atmosférica 0.044 % M) y luego a alta concentración (carbonatación acelerada 4.313 % M), se llevó a cabo por medio del GECOR6, periódicamente hasta completar el tiempo de evaluación.

Tal y como lo demuestra la Fig. 8, para las barras ubicadas en la posición A (2.55 cm), las densidades de corrosión medidas están en un rango muy bajo, no mayor a 0.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que refleja muy poca probabilidad daños por corrosión. Este comportamiento se observa para todas las barras en las diferentes posiciones evaluadas y para todos los tiempos de medición, lo que corrobora los resultados obtenidos a partir de la medición de potenciales.

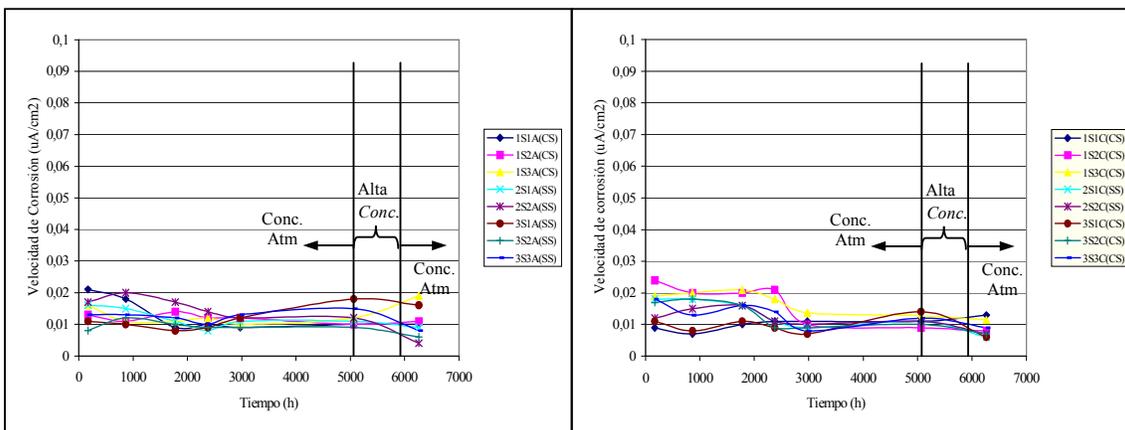


Figura 8. Velocidad de corrosión vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración CO₂ en la posición A (2.55 cm).

Figura 9. Velocidad de corrosión vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración de CO₂ en la posición C (4.55 cm).

En la Fig. 9 se representan los resultados de las mediciones de la densidad de corrosión en la posición C (4.55 cm), notándose la correspondencia con las mediciones para la posición A. Las medidas de velocidad de corrosión arrojaron valores similares para los electrodos ubicados en las posiciones B y D a sus correspondientes electrodos ubicados en las posiciones A y C, respectivamente.

Medio de exposición: NaCl

Para las barras de las probetas de concreto expuestas a cloruros al 5%, la determinación de la densidad de corriente se llevó a cabo para cada una de las mediante pruebas de polarización lineal (R_p), utilizando para este fin el GECOR6, obteniendo varios puntos durante todo el periodo de exposición evaluado, y a través del potencióstato/galvanostato PAR 273A, realizando una medición finalizado el tiempo de evaluación, para comparar los datos obtenidos mediante los dos métodos.

La densidad de corrosión para los pares galvánicos también fue evaluada por medio del GECOR6 a lo largo de todo el periodo de exposición en el ambiente con cloruros. En la Fig. 10 se muestra la variación de la velocidad de corrosión con respecto al tiempo para las barras acopladas de las probetas tipo III (barras de acero al carbono y acero inoxidable).

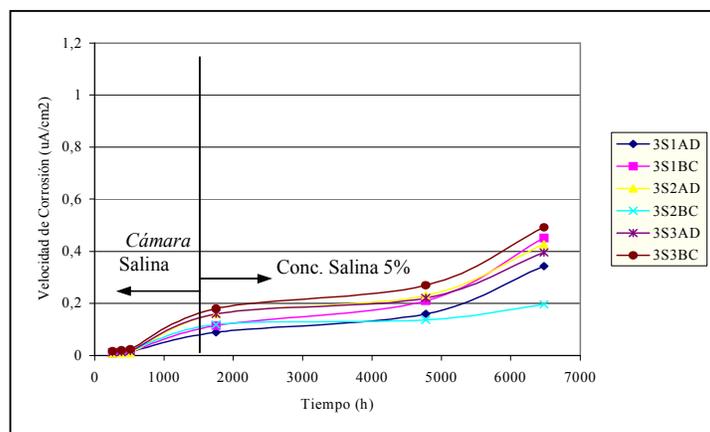


Figura 10. Velocidad de corrosión vs. tiempo para los acoplamientos AC y BD de las probetas tipo III (acero al carbono y acero inoxidable 316) expuestas a ambientes de 5.0% NaCl.

Como se observa en la Fig. 10, existe una tendencia marcada hacia el aumento de los valores de velocidad de corrosión a lo largo de todo el periodo de exposición,

alcanzando densidades de $0.492 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que indica niveles de corrosión moderada en los pares galvánicos. Si se observa la Fig. 3 se puede notar una correspondencia de la conducta de los potenciales vs. el tiempo con respecto a este comportamiento.

Para las barras ubicadas en la posición A (Fig. 11), se puede notar que la velocidad inicial de corrosión prácticamente parte de cero, pero a medida que el concreto es contaminado con cloruros, estos valores tienden a aumentar, como se observa a las 1749 horas de exposición. A partir de este momento, las barras de acero inoxidable muestran una disminución notable de velocidades de corrosión, entre 0.011 y $0.018 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, que representa un nivel de corrosión despreciable, mientras que las barras de acero al carbono arrojan valores de densidad de corrosión alrededor de 0.806 y $1.118 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, lo que es indicativo de niveles de corrosión de elevado a muy elevado. De forma análoga se comportan los electrodos ubicados en la posición B.

En la Fig. 12, se muestra la evolución de la velocidad de corrosión para las barras ubicados en la posición C. Aquí se observan valores de corrosión despreciables, entre 0.011 y $0.033 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, tanto para el acero inoxidable como para el acero al carbono, iniciando el periodo de exposición. Luego, a medida que aumenta la concentración de cloruros con el tiempo, se puede notar el aumento de la velocidad de corrosión. Para las 1749 horas, esta se ubica entre 0.018 y $0.047 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, para el acero inoxidable mostrando niveles muy bajos de corrosión, y entre 0.123 y $0.328 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ para el acero al carbono, lo que representa moderado riesgo a corrosión. Finalizado el periodo de evaluación de las probetas, se puede observar que el acero al carbono se reporto entre niveles de moderado a alto riesgo a daños por corrosión, con densidades en un rango de 0.282 y $0.609 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Entre tanto, el acero inoxidable mantuvo bajos niveles de corrosión, exhibiendo densidades alrededor de $0.011 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Las barras ubicadas en la posición D exhiben un comportamiento similar a este.

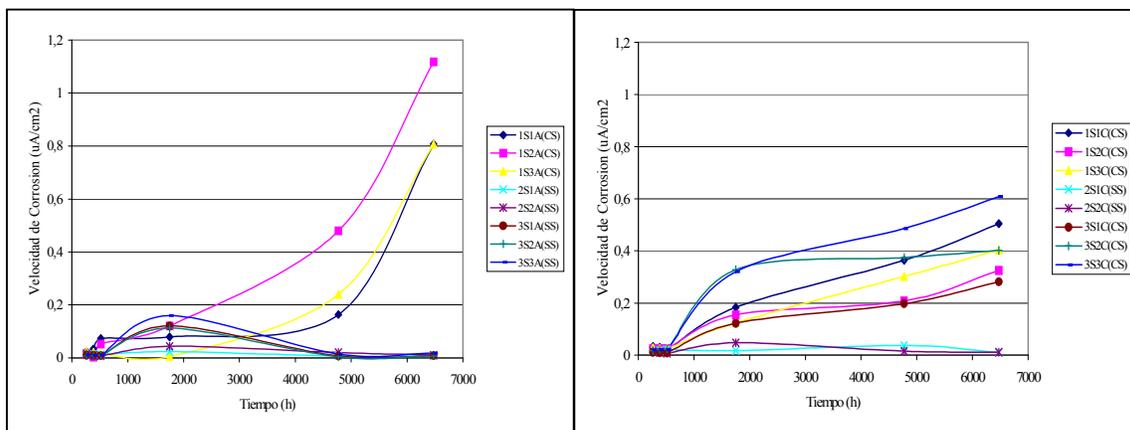


Figura 11. Velocidad de corrosión vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración NaCl en la posición A (2.55 cm).

Figura 12. Velocidad de corrosión vs. tiempo para acero al carbono y acero inoxidable 316 en ambientes de concentración de NaCl en la posición C (4.55 cm).

Si se comparan las velocidades de corrosión para las barras de acero al carbono ubicados en las posiciones A y B con respecto a los electrodos del mismo material en las posiciones C y D, se puede notar que para los primeros, cuyo espesor de recubrimiento es menor, las velocidades de corrosión son elevadas en un rango entre 0.78 y 1.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para las 6477 horas de exposición, mientras que para las barras encontradas en la posición C y D se aprecian densidades de corrosión menores, llegando hasta 0.70 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Para las barras de acero inoxidable ubicadas en las diferentes posiciones de las probetas y con diferentes espesores de recubrimiento, se observa que todas arrojan densidades de corrosión despreciables, no mayores que 0.018 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ indiferentemente de la ubicación de las mismas, lo que refleja condiciones de pasividad. Este comportamiento es sostenido con los resultados de las mediciones de potenciales de cada una de las barras, previamente discutido y presentado en las Fig. 6 y 7.

Una vez culminado el periodo de exposición evaluado, 6477 horas, se procedió a la determinación de la velocidad de corrosión por medio del potenciostato/galvanostato PAR 273A. Estas densidades de corrosión se compararon con las obtenidas por medio del GECOR6 para el mismo tiempo mostrando pequeñas desviaciones entre los valores de velocidad de corrosión

determinados por los dos métodos, aunque se reflejó un comportamiento similar para cada barra en ambos casos [4]. De manera general, se puede decir que las barras de acero inoxidable 316 se encuentran dentro de un rango de densidades que indican niveles de corrosión no significativos, no mayores a $0.015 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Mientras que las barras de acero al carbono, ubicadas en las posiciones más superficiales (A y B), presentan rangos de densidades de corrosión de elevadas a muy elevadas, según se reporta en el manual Durar [7], mayores de $0.50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ llegando hasta $1.582 \mu\text{A}/\text{cm}^2$; entre tanto, para las barras en las posiciones C y D se observan densidades que reflejan un riesgo de corrosión de moderado a alto, con densidades no mayores a $0.80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Polarización cíclica de acero inoxidable 316 en solución de agua de poro

Por medio de la polarización cíclica se procede a evaluar el comportamiento del acero inoxidable en agua de poro a diferentes concentraciones de cloruros. Para esto se prepararon celdas electroquímicas con muestras de acero inoxidable en solución de agua de poro a diferentes concentraciones de cloruro de sodio: 0 ppm (0 %), 5000 ppm (0.5 %) y 50000 ppm (5 %).

En la Fig. 13 se observa el comportamiento de las muestras de acero 316 en solución de agua de poro sin cloruro de sodio. En esta gráfica se puede notar que el potencial de repasivación es prácticamente igual al potencial de picadura, lo que indica una alta resistencia a la corrosión por picaduras, además se observa que tanto el potencial de picadura como el potencial de repasivación son significativamente más electropositivos que el potencial de corrosión. De esta manera: como $E_{pit} = 0.569 \text{ V} > E_{cor} = -0.17 \text{ V}$ existe resistencia a la picadura y es poco probable su aparición, y como $E_r = 0.538 \text{ V} > E_{cor}$ se sabe que el metal tiene la capacidad de regenerar la capa pasiva ante una eventual ruptura de la misma y es prácticamente inmune a la corrosión por picaduras.

A través de la Fig.14, se puede notar la inmunidad el acero ante los daños por corrosión sin la formación de productos de corrosión una vez realizado el barrido de la prueba de polarización cíclica a esta concentración de NaCl.

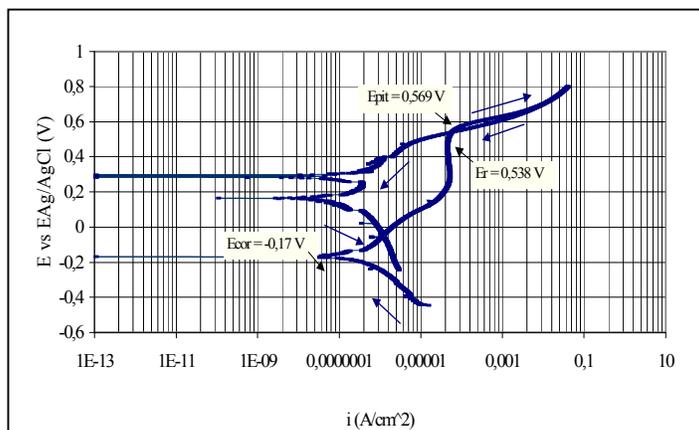


Figura 13. Curva de polarización cíclica del acero inoxidable 316 en solución de agua de poro sin cloruro de sodio (0 ppm de NaCl).



Figura 14. Barra de acero inoxidable 316 después de la polarización cíclica en solución de agua de poro al 0% de cloruro de sodio. (Vista: lupa estereoscópica).

Para las muestras de acero inoxidable 316 expuestas a 5000 ppm de cloruro de sodio en solución de agua de poro se observa en la Fig. 15, que el potencial de repasivación es menor al potencial de picadura ($E_{pit} = 0.530 \text{ V} > E_R = -0.069 \text{ V}$). Sin embargo estos potenciales permanecen mas positivos que el potencial de corrosión $E_{cor} = -0.282 \text{ V}$, hecho que indica que bajo estas condiciones el metal es capaz de regenerar la capa pasiva ante cualquier eventual ruptura de la misma y tiene una mayor resistencia a la picadura, siendo menos probable su aparición. Durante la polarización se efectuó la disolución del metal observando la presencia de pequeñas micropicaduras formadas sobre la superficie de las piezas en la zona de las estrías, ya que estas áreas presentan mayor estrés originado por el trabajo mecánico durante su fabricación. En la Fig. 16 se muestra una de las barras de acero inoxidable después de completada la prueba.

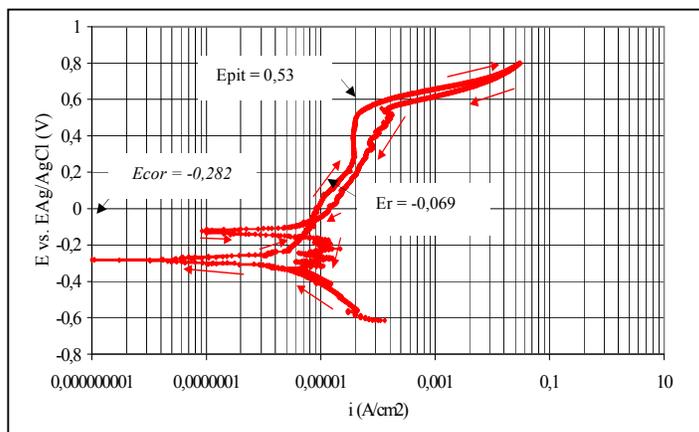


Figura 15. Curva de polarización cíclica del acero inoxidable 316 en solución de agua de poro con 0.5% de cloruro de sodio.

Figura 16. Barra de acero inoxidable 316 después de la polarización cíclica en solución de agua de poro al 0.5% de cloruro de sodio. (Vista: lupa estereoscópica).

Mediante la Fig. 17 se observa el comportamiento de las muestras de acero inoxidable en solución de agua de poro al 5% de concentración de cloruro de sodio, evidenciando una mayor susceptibilidad a la formación de picaduras con respecto a las concentraciones estudiadas anteriormente (0% y 0.5% de NaCl). El potencial de repasivación es más electronegativo que el potencial de picadura $E_{pit} = 0.443 \text{ V} > E_R = -0.33 \text{ V}$ y a su vez menor que el potencial de corrosión $E_{cor} = -0.242 \text{ V}$. Esta diferencia indica que para ésta concentración de iones cloruro, la barra es susceptible a la corrosión por picaduras y permanece en estado activo una vez destruida la pasividad, mientras se propicia el crecimiento de las picaduras sin interrupción.

Los productos de corrosión formados son de color pardo rojizo y marrón, y son bastante voluminosos, lográndose observar la presencia de picaduras más o menos profundas sobre la superficie de las muestras. En la Fig. 18 se muestra el aspecto de las barras luego de la polarización cíclica. En esta gráfica se observa como las picaduras se encuentran principalmente en las partes irregulares de la pieza, es decir, cercanas a las estrías ya que estos son puntos de acumulación de energía o puntos más activos.

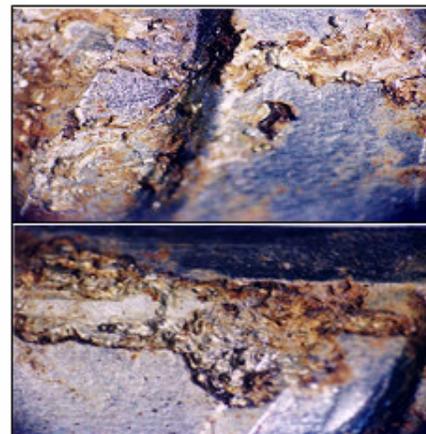
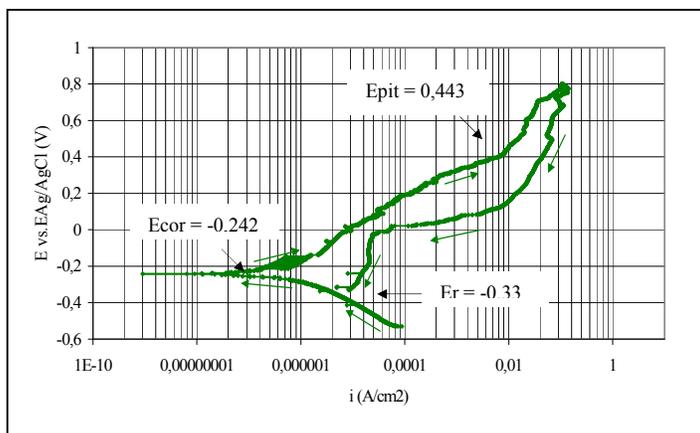


Figura 17. Curva de polarización cíclica del acero inoxidable 316 en solución de agua de poro con 5% de cloruro de sodio.

Figura 18. Barra de acero inoxidable 316 después de la polarización cíclica en solución de agua de poro al 5% de cloruro de sodio. (Vista: lupa estereoscópica).

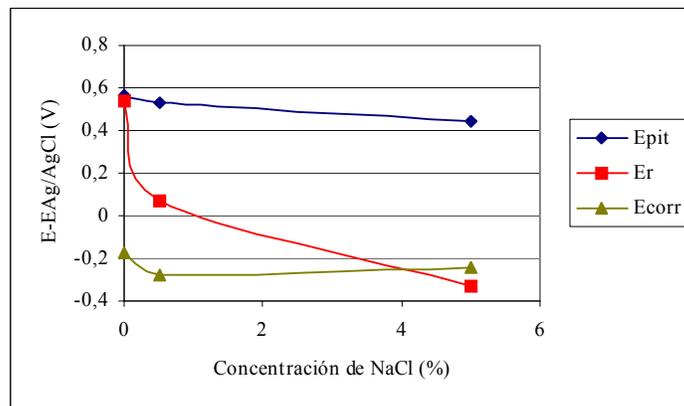


Figura 19. Variación de los potenciales de picadura, corrosión y repasivación para las muestras de acero inoxidable 316 obtenidos mediante la polarización cíclica para las diferentes concentraciones de cloruro de sodio en la solución de agua de poro.

Mediante la Fig. 19 se resumen los valores de potenciales de picadura, repasivación y corrosión para cada uno de las muestras de acero inoxidable en solución de agua de poro, a diferentes concentraciones, obtenidos gráficamente a partir de las curvas de polarización cíclica. Es evidente como para la concentración de NaCl de 5% el potencial de repasivación se encuentra más electronegativo que el potencial de corrosión, lo cual indica la formación de picaduras, mientras que a concentraciones menores el potencial de picadura es más electropositivo que el potencial de corrosión. El potencial de picadura es

muy cercano al potencial de repasivación para la solución sin cloruros, pero a medida que aumenta la concentración de cloruro aumenta la diferencia entre estos dos potenciales.

Conclusiones

1. Las barras de acero al carbono y acero inoxidable expuestas a la cámara de carbonatación a concentración atmosférica de CO₂ registraron velocidades de corrosión poco variables alrededor de a 0.025 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y una vez expuestas a ambientes de alta concentración de CO₂ (4.313 %) mantuvieron esta tendencia, durante el tiempo de exposición evaluado.
2. Para los pares galvánicos formados entre las barras de acero al carbono y acero inoxidable 316 expuestos a un medio salino al 5% de NaCl, se registraron potenciales electroquímicos entre -500 y -600 mV.
3. Para las barras de acero inoxidable 316 y acero al carbono embebidas en concreto, expuestas a un medio salino al 5% de NaCl, se registraron valores de potenciales eléctricos más activos para las barras de acero al carbono (entre -350 y -550 mV vs. Cu/CuSO₄) que para las barras de acero inoxidable 316 (cerca de -300 mV vs. Cu/CuSO₄).
4. Las probetas en las que el acero al carbono se encontraba a mayor profundidad que el acero inoxidable (probetas tipo III), registraron valores de potenciales más electronegativos para las barras de acero al carbono que para las barras de acero inoxidable.
5. Las velocidades de corrosión registradas para las barras de acero al carbono resultaron elevadas (1.089 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Una vez activadas las barras, se incrementaron las velocidades a medida que transcurría el tiempo de exposición en el medio salino.
6. Para las barras de acero inoxidable las velocidades de corrosión se mantuvieron entre 0.012 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ y 0.018 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$. De esta manera el acero inoxidable ofrece mayor pasividad y resistencia a la corrosión al medio salino de 5% de NaCl.

7. Para los pares galvánicos se registraron velocidades moderadas de corrosión cercanas a $0.4 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.
8. Al realizar las pruebas de polarización cíclica se observó que a mayor concentración de cloruro menor es el potencial de picadura mostrado. Para el acero inoxidable la solución de agua de poro al 0% y 0.5% de cloruro de sodio, se observó que $E_{\text{pit}} = 0.569 \text{ V} > E_{\text{R}} = 0.538 \text{ V} > E_{\text{cor}} = -0.17 \text{ V}$ y $E_{\text{pit}} = 0.530 \text{ V} > E_{\text{R}} = -0.069 > E_{\text{cor}} = -0.282 \text{ V}$, respectivamente. Para concentraciones de 5% de cloruro de sodio el potencial de repasivación resultó más electronegativo que el potencial de picadura $E_{\text{pit}} = 0.443 \text{ V} > E_{\text{R}} = -0.33 \text{ V}$ y a su vez que el potencial de corrosión $E_{\text{cor}} = -0.242 \text{ V}$.
9. Las barras de acero inoxidable sometidas a polarización cíclica en solución de agua de poro, reflejaron resistencia a la corrosión para concentraciones de NaCl de 0 ppm y 5000 ppm. Pero a 50000 ppm de concentración, fue evidente la formación de productos voluminosos de corrosión, mostrando un comportamiento poco atractivo en este medio.

Uso del Acero Inoxidable como Material de Refuerzo en Estructuras de Concreto Armado

Resumen

Para la evaluación del acero inoxidable 316, se llevó a cabo la elaboración de probetas de concreto armado de 12x12x25 cm conformadas por cuatro barras de acero al carbono (CS) y/o acero inoxidable 316 (SS) y dos electrodos de referencia de grafito. El concreto posee una resistencia de $200 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ y relación a/c 0,65. Se valoró periódicamente el estado de la armadura, expuesta a medios acelerados artificiales de concentración salina al 5% y de CO_2 . Se realizaron pruebas electroquímicas como la medición de potenciales vs. el electrodo Cu/CuSO_4 y polarización lineal. También se elaboraron celdas con acero inoxidable en solución de agua de poro ($\text{pH} = 13.40$) a diferentes concentraciones de NaCl (0%, 0.5% y 5%), las cuales fueron evaluadas mediante la polarización lineal y polarización cíclica. Para 6477 horas de exposición en ambientes salinos se aprecian bajas velocidades de corrosión para el acero inoxidable a diferencia del acero al carbono. Para los pares galvánicos (acero inoxidable-acero al carbono) se observaron velocidades de corrosión moderadas. En ambientes de carbonatación se obtuvieron velocidades muy bajas de corrosión, para todos los casos. Mediante la polarización cíclica se observó la formación de productos de corrosión y picaduras para 5% NaCl.

Palabras claves: acero inoxidable 316, corrosión, NaCl, carbonatación, agua de poro, picaduras.

Referencias

1. J.F. McGurn, “Stainless Steel Reinforcing Bars in Concrete”, Nickel Development Institute (NiDI), Canada, 1998.
2. L. Bertolini, M. Gastaldi, P. Pedferri, E. Redaelli, “Factors influencing the corrosion resistance of austenitic and duplex stainless steel bars in chloride bearing concrete”, Dipartimento di Chimica Fisica Applicata, Politecnico di Milano, Italia, 2002.
3. E. Sánchez, T. Villalobos, “Comportamiento de los aceros inoxidables 304 y 316 en concreto contaminado con cloruro”, Tesis de Grado, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela, 2003.
4. M. Sádaba, G. Martínez, “Uso del acero inoxidable como material de refuerzo en estructuras de concreto armado”, Trabajo Especial de Grado, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Maracaibo, Venezuela, 2004.
5. O. García, “Evaluación del Uso del Electrodo de Referencia de Grafito Embebido en Concreto”, Trabajo de Ascenso, Universidad del Zulia, Centro de Estudios de Corrosión.
6. Norma ASTM C876-95. Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. 1999.
7. O. Rincón y otros, “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”, CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Segunda Edición, Julio 1998.
8. P. Pedferri, L. Bertolini, F. Bolzoni, T. Pastore, “Behavior of Stainless Steel in Concrete”, Dipartimento di Chimica Fisica Applicata, Politecnico di Milano, Italy.