

COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADO EN PRESENCIA DE NaCl Y Na₂SO₄ AL 3.5 %

BEHAVIOR OF THE CORROSION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN PRESENCE OF NaCl AND Na₂SO₄ 3.5 %

Por / By **Demetrio Nieves Mendoza, Manuel Bustamante Vega, Facundo Almeraya Calderón, Jorge Uruchurtu Chavarin, Citlalli Gaona Tiburcio**

Resumen

En este trabajo de investigación se presentan los resultados obtenidos del comportamiento de corrosión de vigas de concreto reforzado, mediante la medición de Potenciales de Corrosión (ASTM C876) y Ruido Electroquímico. Estas vigas son expuestas a ciclos de humectado y secado con sulfato de sodio (Na₂SO₄) y cloruro de sodio (NaCl) al 3.5% ; con la finalidad de establecer una alternativa en la evaluación de las estructuras de concreto reforzado, ya que con la técnica de Ruido Electroquímico no se perturba al sistema en estudio y proporciona más información que la técnica de Resistencia a la Polarización, que es la que actualmente se aplica en la evaluación de estructuras de concreto reforzado a través de equipos comerciales. La evaluación se llevó a cabo en vigas de 20 x 20x 80 cm., reforzadas con varillas de 3/8" y estribos de 1/4" a cada 20 cm, las cuales se dividieron en cuatro zonas de 20 cm cada una, teniendo dos zonas protegidas, y dos zonas no protegidas, con la finalidad de tener bien definidas las zonas susceptibles de sufrir corrosión. Los potenciales de corrosión, en la mayoría de las vigas presentaron una incertidumbre del fenómeno de corrosión, para ambos medios, de acuerdo con el criterio de evaluación que establece ASTM C876 y la velocidad de corrosión de las vigas expuestas en cloruro de sodio presentaron un grado de corrosión despreciable, mientras que las vigas expuestas en sulfato de sodio tuvieron velocidades de corrosión más altas en algunos casos, pasando de un grado de corrosión moderado a una muy alta. Esta investigación permite establecer parámetros termodinámicos y cinéticos de corrosión sin alterar el sistema acero-concreto. Por lo anterior es factible realizar mediciones con las técnicas utilizadas en estructuras en servicio (puentes, muelles, edificios, etc.).

Palabras clave: *Corrosión, concreto armado, electroquímica, ruido electroquímico, potencial de corrosión, velocidad de corrosión.*

Abstract

This paper presents the results obtained for the behavior of corrosion in reinforced concrete beams, by resorting to measurements of corrosion potentials (ASTM C876) and Electrochemical Noise. These beams are exposed to moistened and drying cycles with 3.5 % sodium sulfate (Na₂SO₄) and sodium chloride (NaCl). The purpose was settle an alternative in the evaluation of the reinforced concrete structures, using the electrochemical noise technique that is not perturbative to the system in study, and it provides more information than Polarization Resistance technique that is the only that at the moment is applied in the evaluation of reinforced concrete structures using commercial instruments. The evaluation was affected in beams of 20 x 20x 80 cm., reinforced with bars of 3/8 and stirrups of 1/4" to each 20 cm, which were divided in four areas of 20 cm each one, having two protected areas and two naked areas, this with the purpose of having very defined the susceptible areas to suffer corrosion. The corrosion potential, in most of the beams presented an uncertainty of the phenomenon of corrosion, for both means, in accordance with the approach of evaluation that stable ASTM C876 and the rate corrosion of the exposed beams in sodium chloride presented a degree of moderate corrosion. While the exposed beams in sodium sulfate had rate corrosion more high in some cases, changing moderate to a very high corrosion degree. This investigation allows to establish thermodynamics and kinetic corrosion parameters without altering the system steel-concrete. It is feasible carry out mensurations with the techniques used in structures in service (bridges, jetties, buildings, etc.).

Keywords: *Corrosion, reinforced concrete, electrochemical noise, corrosion potential, corrosion rate.*



1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de corrosión que se presentan en estructuras de concreto reforzado, generalmente están asociados con defectos de construcción, por medios especialmente agresivos en que se encuentran ubicados (como puede ser el ambiente marino), o los cambios en las condiciones de servicio de las estructuras (González y Andrade, 1984). La corrosión del acero en concreto es considerado uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad de las obras civiles, como puentes, túneles, carreteras, muelles, edificios, etc., de un país. La preservación de la infraestructura es de vital importancia económica y social, puesto que brinda servicio y seguridad para el desarrollo de las sociedades. El deterioro anticipado del concreto, operando en condiciones ordinarias, puede ser propiciado por factores estructurales y no estructurales. Entre las diversas acciones de carácter no estructural que suelen ocasionar el deterioro prematuro del concreto, cabe destacar las siguientes por su frecuencia y por la importancia de sus efectos en la duración de las estructuras: ataque por sulfatos, corrosión del acero de refuerzo, congelación y deshielo, lixiviación de la cal, reacción álcali-agregado, intemperismo y envejecimiento, y ataque por sustancias ácidas (CFE e Instituto de Ingeniería UNAM, 1994).

Los sulfatos forman parte de las sales inorgánicas que normalmente están presentes en el terreno y en las aguas freáticas y superficiales, aunque su grado de concentración puede ser muy variable. Durante la hidratación del cemento se libera hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), de la reacción de los sulfatos con el hidróxido de calcio resulta sulfato de calcio (yeso), el volumen que ocupa el yeso es el doble que de los compuestos originales que los forman, de este modo, dicho aumento de volumen, que no puede acomodarse en el espacio original de los poros del concreto, genera esfuerzos internos de tensión en éste, que primero lo microfisuran y a continuación lo desintegran gradualmente.

Los cloruros, al igual que los sulfatos, son sales inorgánicas que abundan en la naturaleza, y por ello suelen hallarse presentes en los componentes del concreto y en las aguas y suelos que tienen contacto con las estructuras, e incluso en ciertos ambientes atmosféricos. La influencia del ión cloruro como agente impulsor de la corrosión del acero de refuerzo, deriva de dos efectos principales: a) al agregarse cloruros a la solución de poro del concreto que actúa como electrólito, se incrementa la conductividad de éste y se facilita el movimiento de los iones de hidroxilo (OH^-) entre el cátodo y el ánodo, b) Cuando la cantidad de cloruros alcanza un alto grado de concentración, se producen reacciones químicas que originan puntos de deterioro en la película de pasivación, los cuales al funcionar como ánodos dan lugar a la formación de celdas de corrosión electrolítica (Zhang et al., 1994).

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto tiene dos principales consecuencias que afectan la duración de las estructuras: a) por efecto de la corrosión se reduce la sección de las varillas de acero, merma su adherencia con el concreto y se degradan sus propiedades mecánicas, con lo cual se desmerita su capacidad de trabajo estructural, b) como resultado de la corrosión, se originan productos (herrumbre) cuyo volumen es varias veces superior al de los elementos que les dan origen, y este aumento de volumen trae como consecuencia tensiones internas que agrietan progresivamente el recubrimiento de concreto e incluso lo desprenden totalmente en situaciones de corrosión avanzada.

El objetivo principal de esta investigación consistió en la determinación del comportamiento electroquímico de vigas de concreto reforzado, empleando la técnica de electroquímica de ruido electroquímico, con la finalidad de poder realizar estudios en estructuras reales, una vez que el sistema de evaluación en laboratorio este bien caracterizado.

Ruido electroquímico se le denomina a las fluctuaciones aleatorias del potencial o de la corriente de un material sujeto a corrosión. Con esta técnica no se altera el estado del sistema en estudio, ya que no se aplica ninguna perturbación externa para realizar las mediciones. (Uruchurtu 1984).

Por lo anterior con la técnica de Ruido Electroquímico, se puede conocer con que velocidad se esta corroyendo el acero de refuerzo, se puede establecer si el material se encuentra en estado de pasivación o de activación, pudiéndose determinar si es corrosión uniforme o corrosión localizada por picaduras, además del mecanismo de corrosión.

Las técnicas electroquímicas que comúnmente se emplean para evaluar especímenes o estructuras de concreto reforzado, consisten en emplear señales que perturban el sistema en estudio como es el caso de Impedancia electroquímica o resistencia a la polarización. Con el empleo de la técnica de ruido electroquímico se tiene la ventaja de no perturbar el sistema y con ello tener una mejor caracterización del estudio.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para llevar acabo esta investigación, se elaboraron doce vigas de concreto con sección de 20 x 20 x 80 cm., con una $f'c = 300 \text{ Kg/cm}^2$, El ACI 318 (ACI 318), sugiere una relación agua/cemento máxima de 0.40 (equivalente a una resistencia a la compresión superior a los 400 Kg/cm^2), para proteger el acero de refuerzo contra la corrosión, por lo cual se escogió esta $f'c$. Cada viga tiene cuatro zonas de 20 cm, dos zonas del armado cuentan con un recubrimiento epóxico, con la finalidad de aislar esta parte de la armadura de la corrosión, las otras dos zonas no cuentan con ningún tipo de protección, con el propósito de conocer en qué parte de la viga se puede presentar la mayor velocidad de corrosión al efectuar las mediciones de ruido electroquímico, y establecer si las mediciones realizadas con el sensor son características de zonas en



estado activo de corrosión. El arreglo de zonas protegidas (P) y no protegidas (D) se observa en la Figura 1, por cuestiones de simplificación a cada una de estas zonas se le denominó ubicación “U”, en donde “U” puede ser 1, 2, 3 ó 4, empezando en el extremo donde sobresalen las varillas de refuerzo. Para identificar a que viga corresponde cada grafica tanto para potenciales, como para ruido electroquímico, la nomenclatura empleada fue la siguiente:

V3P4U2

En donde:

- V3, se refiere a la viga de que se esta hablando (para el ejemplo significa que es la viga 3),
- P4 es el número de prueba que equivale al número de semana (en este caso a la semana cuatro)
- U2 se refiere a una zona en particular de la viga (para el ejemplo corresponde a la zona dos la cual esta protegida).

En las graficas de isotopotenciales de corrosión aparecen del lado izquierdo la nomenclatura mostrada en lo que respecta a las distintas zonas de las vigas así como también cada cara de la viga, pudiéndose ver de forma rápida que zona y cara de la viga presenta los mayores potenciales de corrosión y lográndose establecer que zona cuenta mayor probabilidad de corrosión. Para mayor facilidad las graficas de velocidades de corrosión (i_{corr}) se dividieron por zonas de las vigas que van de 1 a 4 y anteponiéndole la letra U, en cuanto a las vigas se represento como se menciono anteriormente agregándose además la letra P ó D que corresponde a una zona protegida y no protegida respectivamente.

Los electrolitos que se emplearon fueron NaCl y Na₂SO₄ al 3.5%, y seis vigas estuvieron en cada medio. Para llevar acabo los ciclos de inmersión y secado se empleo un sistema de riego a través de mangueras y bombas de agua, para garantizar la inmersión uniforme de las vigas.

La evaluación electroquímica consistió en evaluar la termodinámica de la corrosión mediante la medición de Potenciales de Corrosión (ASTM C876), y la cinética a través de la técnica de Ruido Electroquímico, en las distintas zonas de las vigas.

2.1. Medición de Potenciales de Corrosión

La Medición de potenciales. Consistió en determinar el potencial de corrosión de cada una de las vigas, tomando como referencia al electrodo de (Cu/CuSO₄).

La medición de potenciales de corrosión se realizó de la siguiente manera:

- Se conectó el electrodo de referencia de Cu/CuSO₄ al polo negativo del voltímetro; en tanto el acero de refuerzo expuesto se conectó al polo positivo del voltímetro.
- En la Figura 2, se observa la forma en que se realizaron estas mediciones.
- Finalmente se elaboró un plano donde se trazaron líneas de isotopotenciales. Estas gráficas pueden ser observadas en la sección de resultados.

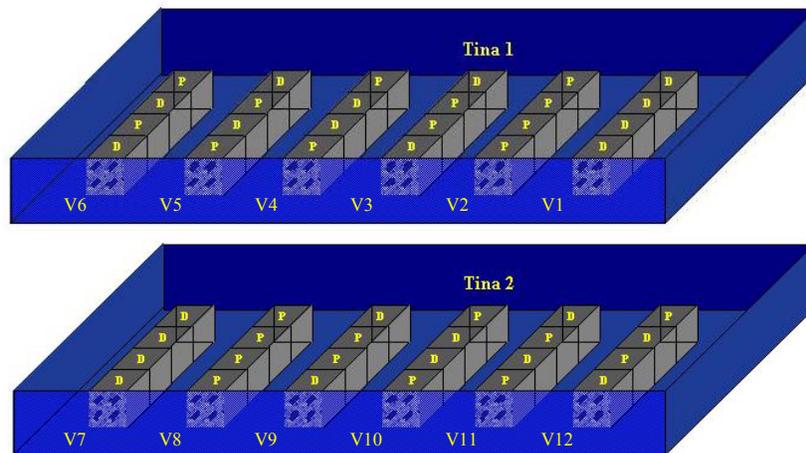


Figura 1. Vigas en el depósito de inmersión y secado



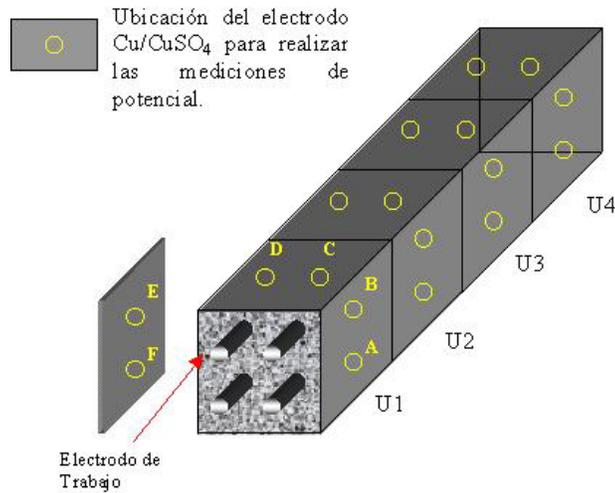


Figura 2. Zonas de Medición de potenciales (caras AB, CD, EF)

2.2. Medición de Velocidad de Corrosión

Las mediciones de velocidad de corrosión se realizaron en la parte central de cada una de las zonas de las vigas, como se muestra en la Figura 3. El equipo empleado durante la experimentación fue un Potenciostato / Galvanostato / ZRA de ACM Instruments, Computadora / Software, Esponjas, cables y electrodos (Figura 4).

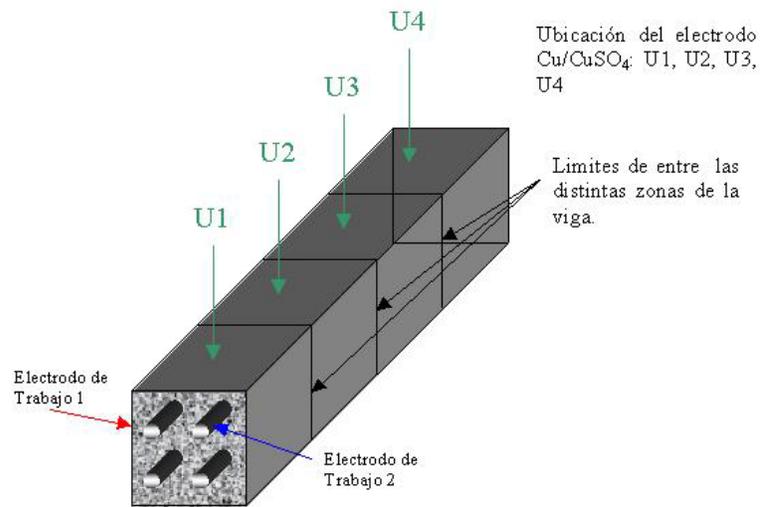


Figura 3. Medición de ruido electroquímico





Figura 4. Equipo de corrosión ACM Instruments

Para obtener la R_n , resistencia de ruido (equivalente de la R_p de Resistencia a la Polarización), hay que obtener la desviación estándar de las series de tiempo de potencial y corriente, ecuación 1, (Cottis, 2001), y a través de correlacionar la ecuación de *Stern y Geary* (Ecuación 2) se obtiene la i_{corr} que se relaciona con la intensidad de corrosión (Stern y Geary, 1957).

$$R_n = \frac{\sigma E}{\sigma i} \quad (1)$$

$$R_n = \frac{B}{i_{corr}} ; \quad i_{corr} = \frac{B}{R_n} \quad (2)$$

donde:

$B = \text{constante}^1$ (26 – 52 mV)

$R_n = \Omega - \text{cm}^2$

$i_{corr} = \mu\text{A} / \text{cm}^2$

Una vez obtenidos los valores de i_{corr} en $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ se pueden transformar en pérdida de espesor/tiempo mediante la *Ley de Faraday* (Ecuación 3).

$$\frac{\mu\text{m}}{\text{año}} = \left(\frac{M}{\delta n F} \right) i_{corr} \approx 11.6 i_{corr} \quad (3)$$

En donde:

$M = \text{masa atómica del metal}$

$n = \text{número de electrones transferidos}$

$F = \text{constante de Faraday (96,500 Coulombios)}$

$\delta = \text{densidad del metal}$

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados y el análisis de los mismos, después de haber realizado la evaluación electroquímica a las vigas de concreto reforzado por un periodo de 10 semanas, en presencia de NaCl y Na_2SO_4 .

3.1. Evaluación Termodinámica: Medición de Potenciales de Corrosión

El análisis de los potenciales de corrosión, se realizó con base a la norma ASTM C876, donde se establece los intervalos del potencial para determinar el grado de corrosión (ver Tabla 1), así mismo se empleó las graficas de isopotenciales de corrosión (ver Figuras 6-9) que se muestran las regiones susceptibles a que presenten corrosión.

¹ Para ensayos de campo se aconseja el valor de 26 mV, el cual corresponde a armaduras corroyéndose.



Tabla 1. Potenciales de corrosión con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄, Norma ASMT C876

Potenciales más positivos que -200 mV	Riesgo de que ocurra corrosión es del 10%;
Si esta entre -200 y -350 mV	se tiene una incertidumbre
Si son más negativos que -350 mV	se tendrá una probabilidad del 90% de que se esté corroyendo el acero

El análisis de resultados de los potenciales de corrosión se realizó de manera general para todas las vigas en estudio, estableciendo el intervalo donde caían los valores del potencial de acuerdo con los criterios de ASTM. Los valores más representativos del análisis termodinámico de corrosión se efectuó para las semanas tres y ocho respectivamente, considerando el incremento del valor de la i_{corr} , que es la variable que nos indica el comportamiento cinético del sistema.

En las primeras semanas de evaluación los potenciales de corrosión se encontraban alrededor de los -100 mV y llegando alcanzar valores de -250 mV para la tercer semana, lo cual reflejo un incremento en la i_{corr} de 0.4321 a 2.7004 mA/cm².

Analizando los resultados obtenidos de cada una de las vigas, se encontró que estas presentan potenciales de corrosión más negativos en la última semana (semana 10), por arriba de los -350 mV, lo que indica una probabilidad del 90% de que el acero de refuerzo se este corroyendo (de acuerdo con la Tabla 1). Sin embargo, la velocidad de corrosión (i_{corr}) obtenida en esta última semana oscila entre 0.0001 y 0.1054 mA/cm².

En esta investigación el sistema de zonas protegidas y no-protegidas en las vigas evaluadas, de acuerdo con los resultados de los potenciales de corrosión no tuvieron ninguna influencia en los resultados obtenidos.

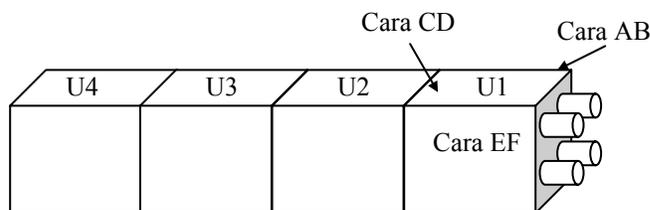
Con los resultados encontrados se puede ver que la termodinámica de corrosión proporciona resultados probalísticos (sin llegar a reflejar lo que realmente esta sucediendo en el sistema acero-concreto), por lo que es necesario tener en cuenta la cinética de corrosión para establecer el comportamiento de la velocidad de corrosión del sistema en estudio.

En las graficas de isopotenciales de corrosión de las vigas que presentaron los valores de potencial más elevados en ambos medios corrosivos (Figuras 6-9), yendo de un color amarillo (potenciales menos negativos) a un rojo intenso (potenciales más negativos). Los potenciales más negativos se presentan en las caras laterales de la viga puntos de medición y caras (AB y EF). En el eje "Y" se representa la longitud de la viga y en el eje "X" el ancho de la viga, además se analiza el criterio de valoración de potenciales del acero en concreto contra el electrodo de Cu/CuSO₄ (Andrade, 1996).

Como se puede observar en las graficas de isopotenciales de corrosión (Figuras 6-9), la parte central de la grafica corresponde a la cara superior de la viga, la cual presenta los valores de potencial más noble, esto se puede deber al escurrimiento del electrolito, concentrándose esté en la parte inferior de la viga, y debido a esto los potenciales obtenidos en las caras laterales (cara AB y EF) son menos nobles que en la cara superior.

Los valores obtenidos del potencial de corrosión de vigas expuestas a cloruro de sodio oscilan entre -115 y -290 mV, como se puede ver en las Figuras 6 y 7. Para apoyar al lector en la interpretación de las graficas de isopotenciales en sus distintas zonas representadas por la cuadrícula, en la Figura 5 se muestra el esquema de la viga con sus diferentes zonas así como también la cuadrícula de las graficas de isopotenciales.

De manera general los resultados de los potenciales de corrosión, presentaron una incertidumbre del fenómeno de corrosión, de acuerdo con el criterio de evaluación que estable ASTM C876.



U4		
U3		
U2		
U1		
Cara AB	Cara CD	Cara EF

Figura 5. Cuadrícula de las gráficas de isotenciales

Los valores de potencial de corrosión obtenidos en Na_2SO_4 oscilaron entre -175 y -450 mV, lo cual indica que el potencial se vuelve cada vez más activo o electronegativo (ver las Figuras 8 y 9).

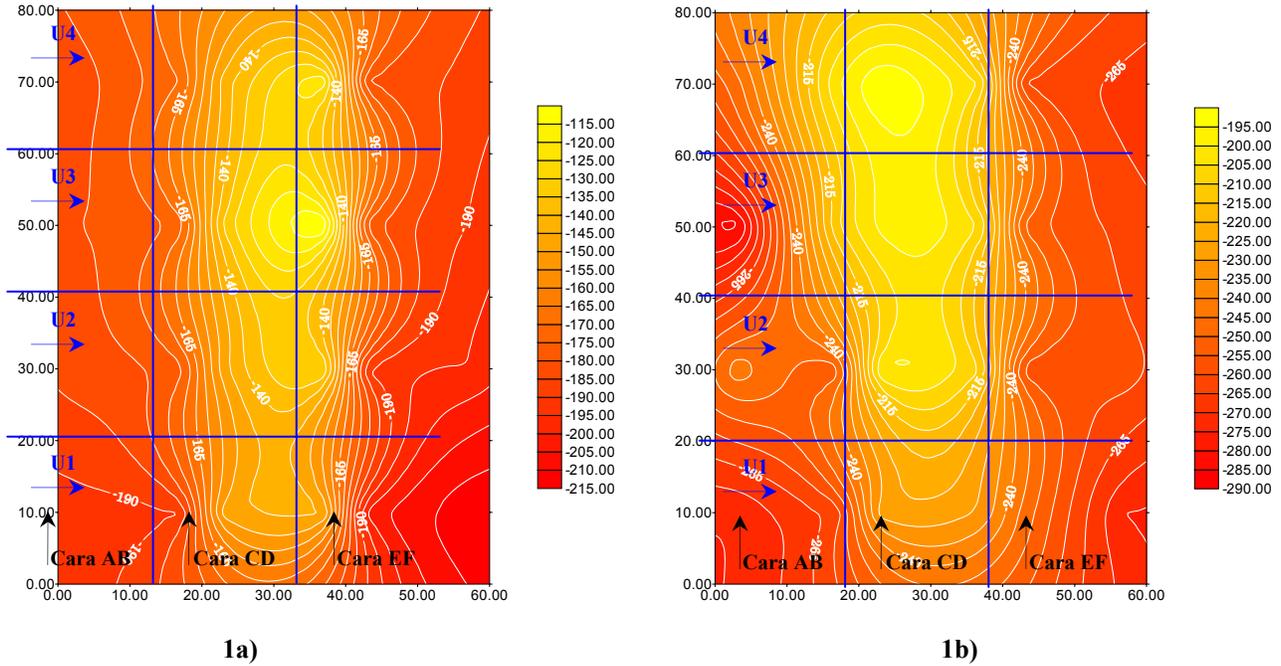


Figura 6. Líneas de isotenciales en vigas expuestas en NaCl, 1a) Viga 1 (DDDD), semana 3 ; 1b) Viga 2 (PPPP), semana 3

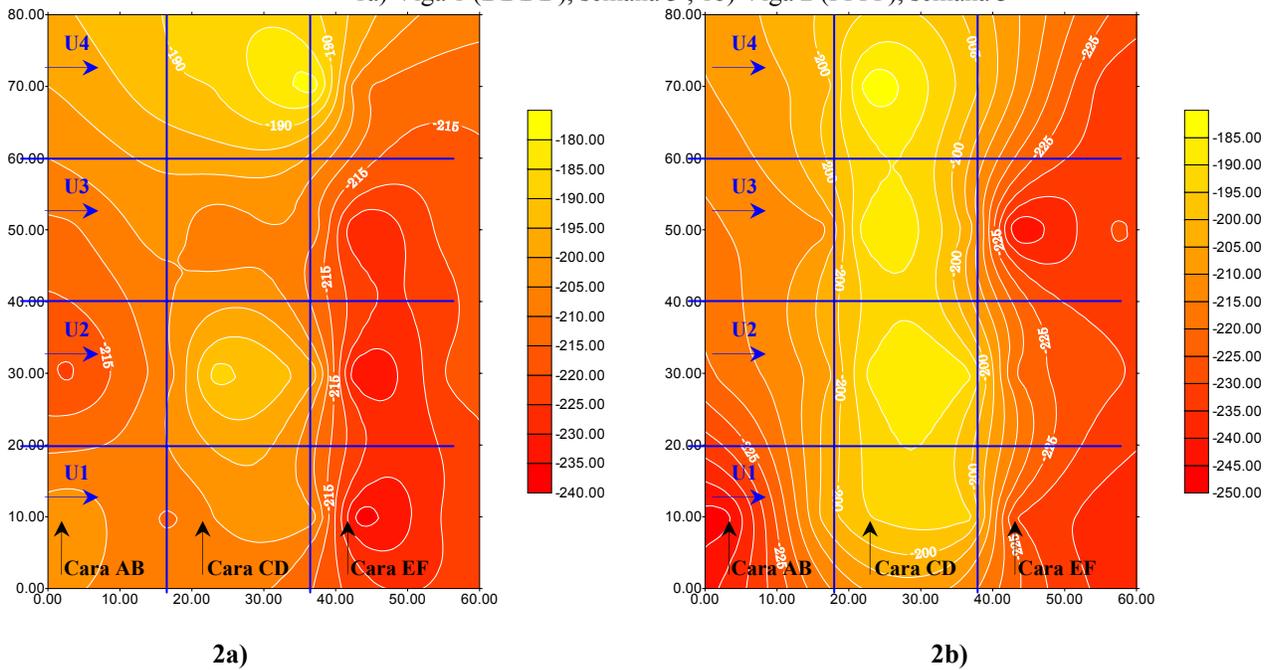


Figura 7. Líneas de isotenciales en vigas expuestas en NaCl



2a) Viga 4 (PDDP), semana 3 ; 2b) Viga 5 (PDDP), semana 3

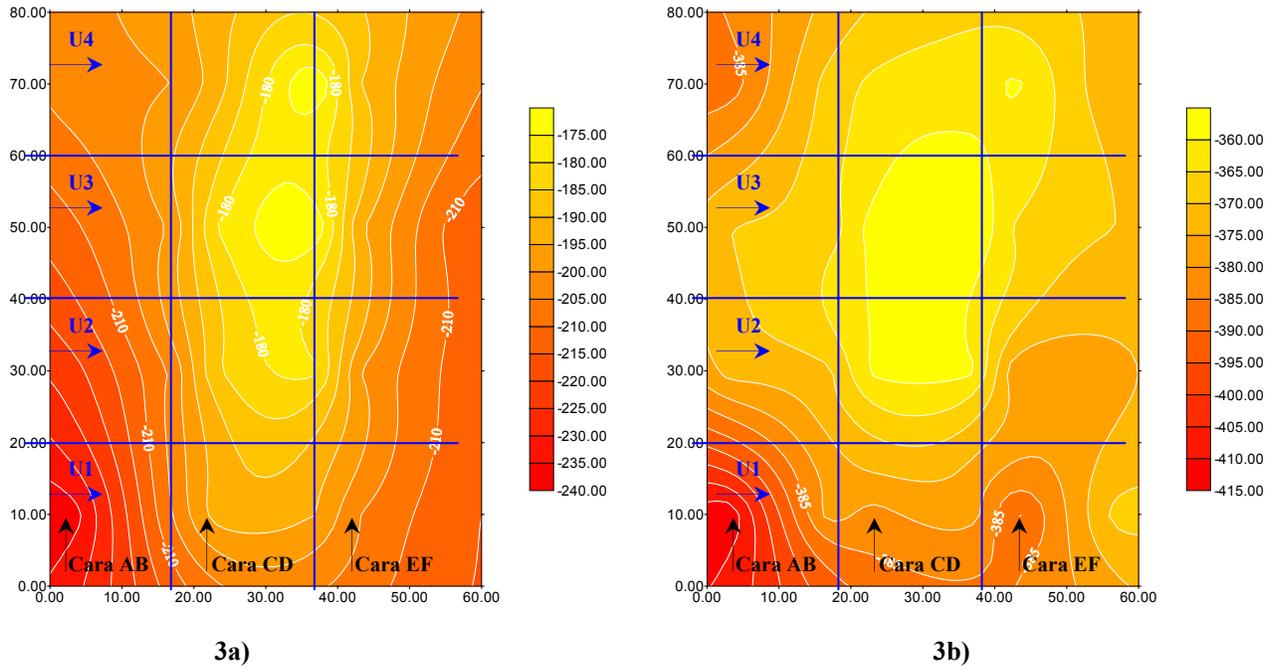


Figura 8. Líneas de isopotenciales en vigas expuestas en Na_2SO_4 ,
3a) Viga 7 (DDDD), semana 8 ; 3b) Viga 8 (PPPP), semana 8

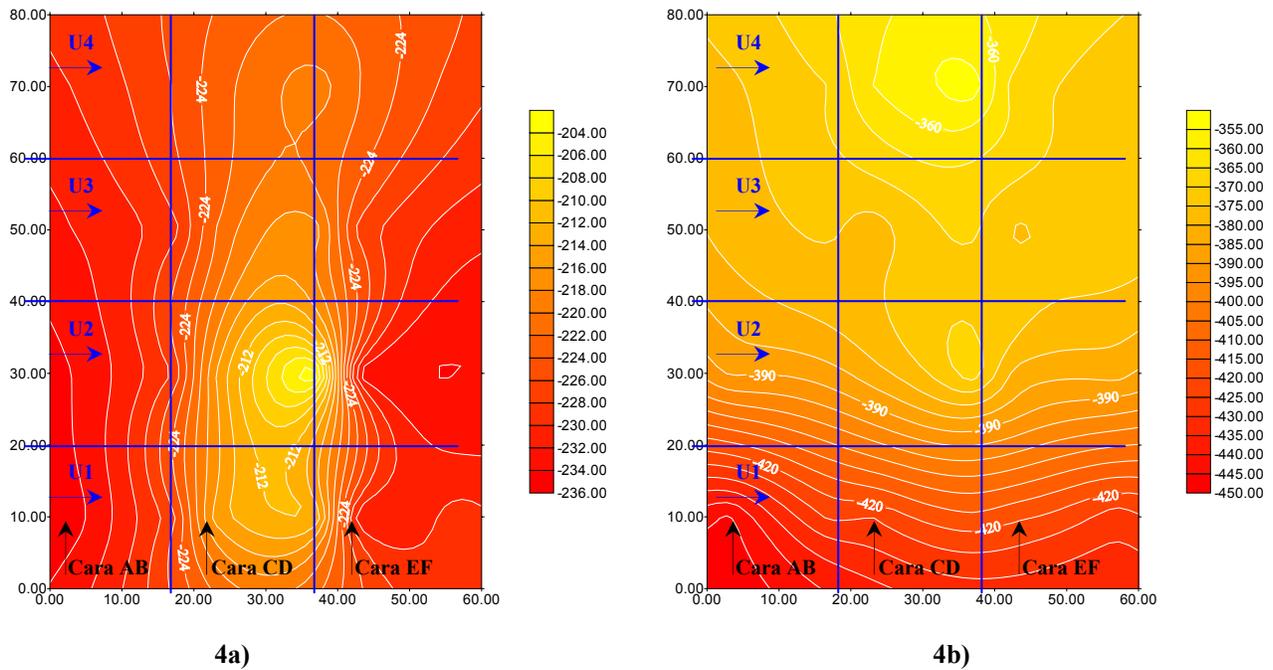


Figura 9. Líneas de isopotenciales en vigas expuestas en Na_2SO_4 ,
4a) Viga 10 (PDDP), semana 8 ; 4b) Viga 11 (PDDP), semana 8



Las mediciones de potenciales de corrosión se grafican de manera que se observen los niveles de probabilidad de que exista o no corrosión (Figura 10), marcando los rangos con líneas punteadas, esta grafica de potenciales corresponde a la viga 7 (con todas sus zonas no protegidas, DDDD)

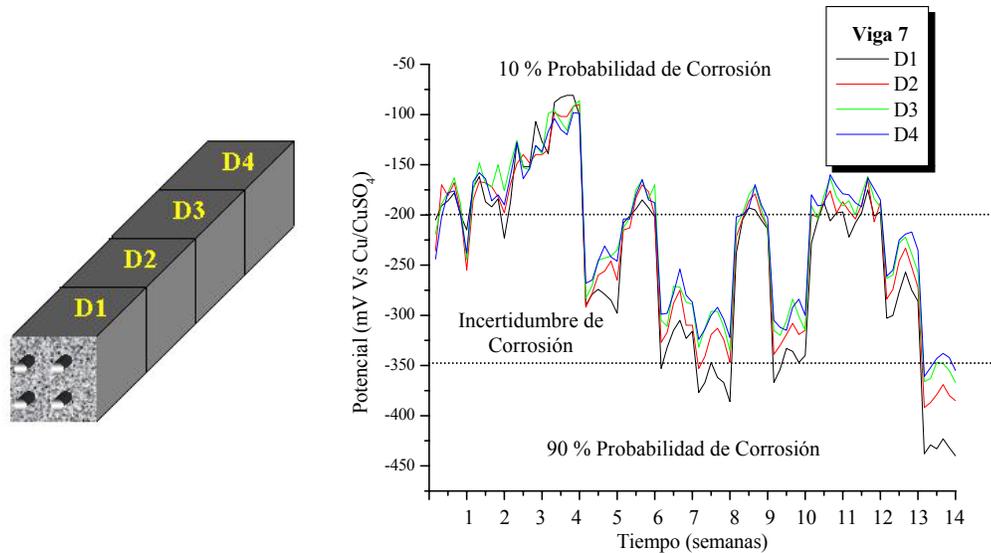
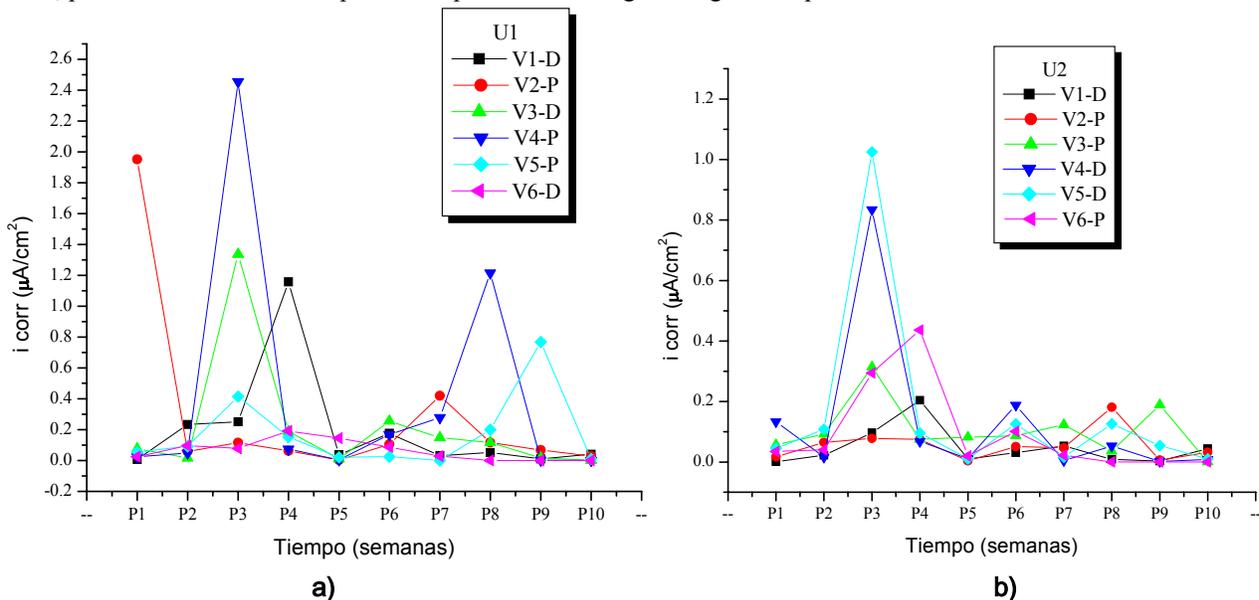


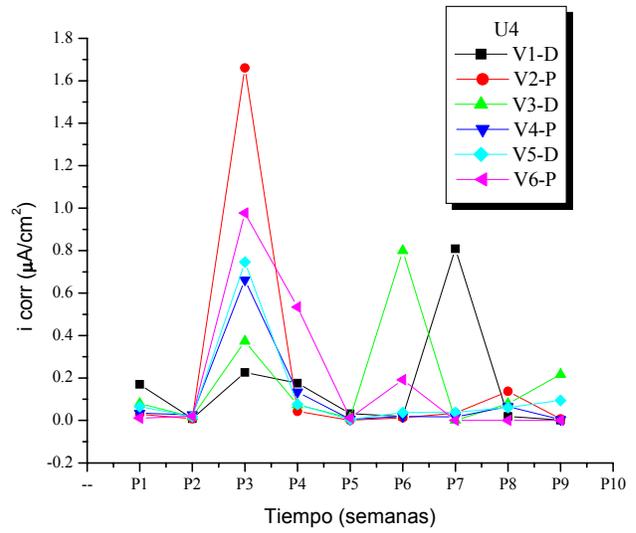
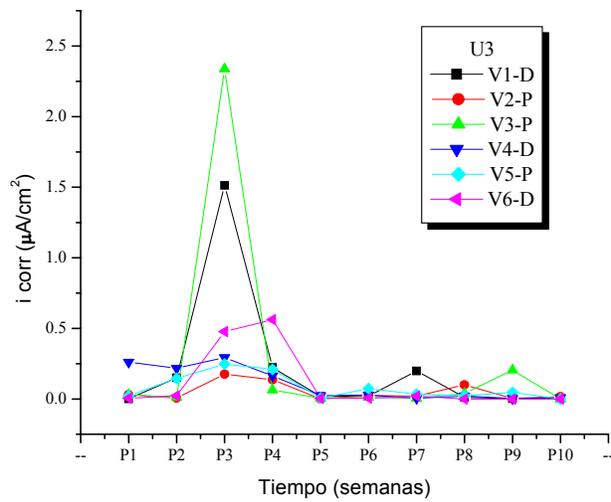
Figura 10 . Potenciales de corrosión, viga 7 (DDDD).

3.2. Evaluación Cinética: Medición de la Velocidad de Corrosión

La cinética de corrosión se realizó mediante las mediciones de la técnica de Ruido Electroquímico realizando los cálculos respectivos con la ecuación 1, para después obtener la i_{corr} por la ecuación de Stern-Geary (Ecuación 2).

El análisis de los datos de ruido electroquímico se presentan en forma condensada en las Figuras 11 y 12, donde se puede observar el comportamiento de la i_{corr} en función del tiempo de exposición de las vigas en estudio. En las gráficas ya mencionadas se puede ver que las vigas al entrar en contacto con el electrolito (semana 3), principalmente con NaCl, presentan un incremento la velocidad de corrosión en todas las vigas, disminuyendo esta a la siguiente semana, esto se puede deber a la formación de una película de óxido en la superficie de la varilla de refuerzo. Mientras que en Na_2SO_4 , el incremento de la velocidad de corrosión se presentó en diferentes semanas para cada viga. El sulfato ataca principalmente al concreto, provocando microfisuras por donde penetran otros agentes agresivos para el acero de refuerzo.

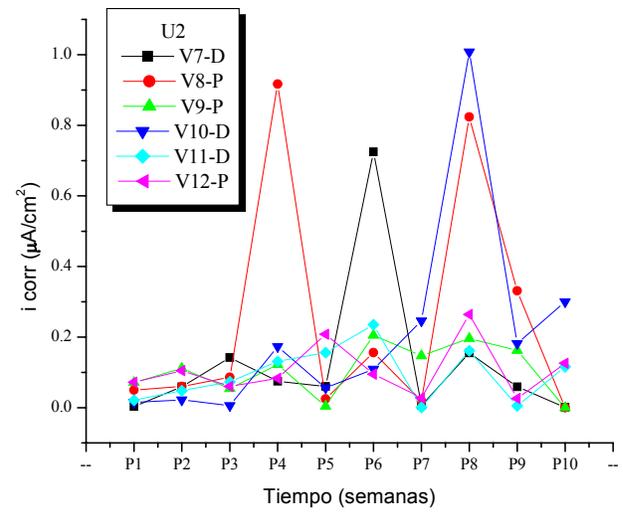
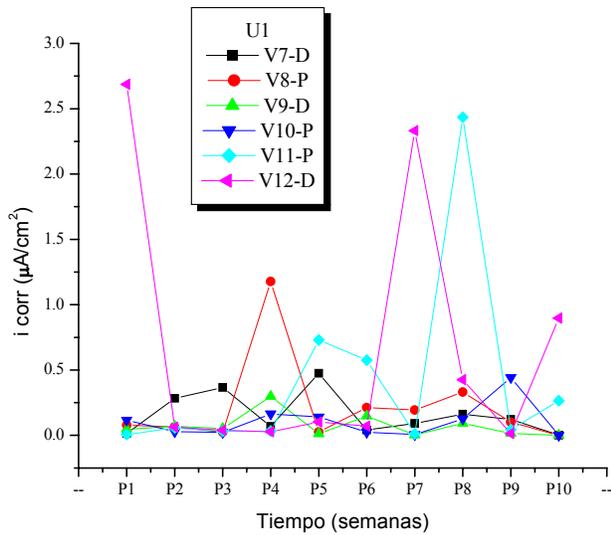




c)

d)

Figura 11. Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la zona de la viga, vigas expuestas en NaCl.



a)

b)



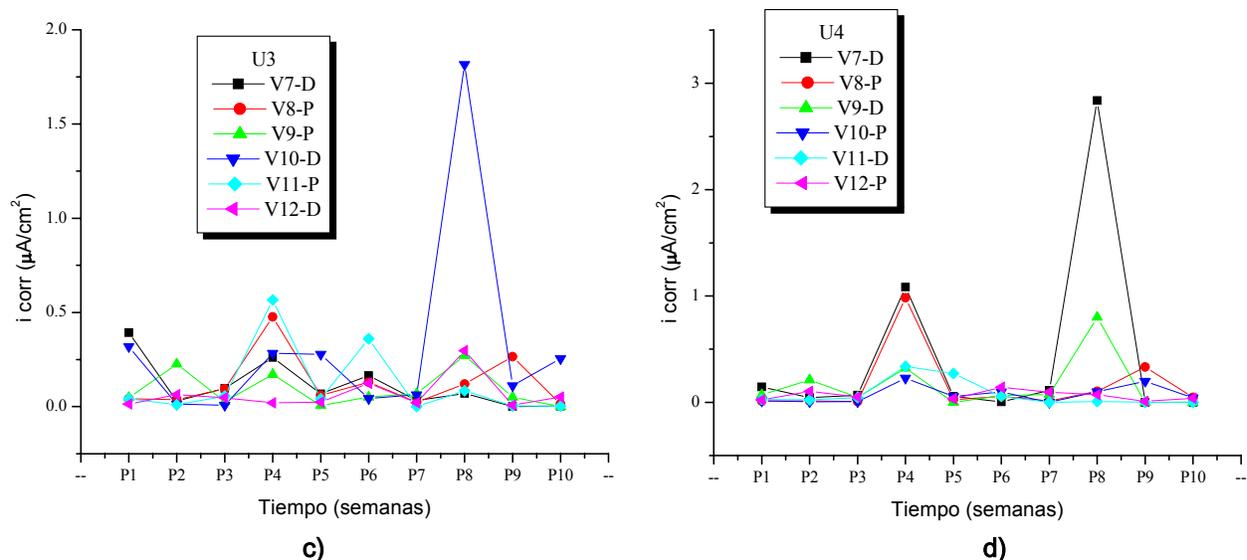


Figura 12. Comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la zona de la viga, vigas expuestas en Na_2SO_4 .

De acuerdo con la clasificación de la Tabla 2, en ambos medios se presentaron niveles de corrosión muy elevados, con velocidades de corrosión de hasta $2.454 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en NaCl y de $2.839 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ en Na_2SO_4 , correspondiendo a la viga 4 zona U1 (zona Protegida) semana 3, y viga 7 zona U4 (zona no protegida) semana 8, respectivamente. Así como también en ambos medios se obtuvieron velocidades de corrosión de nivel despreciable con valores de hasta $0.000001 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Tabla 2. Clasificación de los valores de i_{corr} en términos de vida útil (Trocónis, 1997)

i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	$i_{\text{corr}} \times 0.0116$ (mm/año)	Grado de Corrosión
< 0.1	< 0.00116	Despreciable
0.1–0.5	0.00116–0.0058	Moderado
0.5–1	0.0058–0.0116	Elevada
>1	>0.0116	Muy elevada

Las vigas expuestas a ciclos de inmersión y secado en NaCl (vigas 1-6), presentan en la semana 3 un incremento en la velocidad de corrosión en todas las zonas de las vigas, mientras que en la semana 10, la tendencia de la velocidad de corrosión en todas las vigas es la de disminuir, alcanzando valores de nivel de corrosión despreciable.

Las vigas que estuvieron en Na_2SO_4 , presentaron dos incrementos en la tendencia de la velocidad de corrosión en las semanas 4 y 8.

El comportamiento de las velocidades de corrosión obtenidas en todas las vigas, presenta una tendencia uniforme, esto es, oscilando los valores en un nivel de corrosión moderada durante el tiempo de estudio.

4. CONCLUSIONES

- El comportamiento electroquímico de las vigas de concreto reforzado, empleando la técnica de potenciales de corrosión y ruido electroquímico, permito establecer parámetros termodinámicos y cinéticos sin alterar el sistema de estudio. Por lo anterior es factible realizar mediciones con estas técnicas en estructuras en servicio (puentes, muelles, edificios, etc.).
- Los potenciales de corrosión de las vigas expuestas en cloruro de sodio, presentaron valores más negativos en la última semana de la etapa del estudio (por arriba de los -350 mV , lo que indica una probabilidad del 90% de que el acero de refuerzo se este corroyendo. Sin embargo, la velocidad de corrosión (i_{corr}) obtenida en esta semana oscila entre 0.0001 y



0.1054 mA/cm²) y las vigas expuestas en sulfato de sodio tienen los valores del potencial de corrosión más negativos en la semana 4 y 8 respectivamente.

- La velocidad de corrosión de las vigas expuestas en cloruro de sodio presentaron un grado de corrosión despreciable, mientras que las vigas expuestas en sulfato de sodio tuvieron velocidades de corrosión más altas en algunos casos, pasando de un grado de corrosión moderado a una muy alta.
- En esta investigación el sistema de zonas protegidas y no-protegidas en las vigas evaluadas, de acuerdo con los resultados de los potenciales de corrosión no tuvieron ninguna influencia en los resultados obtenidos.
- Con los resultados encontrados se puede ver que la termodinámica de corrosión proporciona resultados probalísticos (sin llegar a reflejar lo que realmente está sucediendo en el sistema acero-concreto), por lo que es necesario tener en cuenta la cinética de corrosión para establecer el comportamiento de la velocidad de corrosión del sistema en estudio

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado al CONACYT y al CIMAV, así como también al personal técnico del Grupo de Corrosión: M.C. Adán Borunda Terrazas y M.C. Víctor Orozco Carmona.

6. REFERENCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1968), ACI 318: *Durability of Concrete Construction*. ACI, Detroit, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991), *ASTM C 876-94: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. ASTM, Philadelphia, USA.
- ANDRADE, M. C. y ALONSO, C. (1996), *Corrosion Rate Monitoring in the Laboratory and On-Site*, Construction and Building Materials, Vol 10 No. 5. Pp. 315-328.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD E INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM (1994), *Manual de Tecnología del Concreto "Sección 3 Concreto en Estado Endurecido"*. México D.F., 382 págs.
- COTTIS, R. A. (2001), *Interpretation of Electrochemical Noise Data*, Corrosion V. 57, N. 3, 2001, pp. 265-285
- GONZÁLEZ, F. J. A. y ANDRADE, M. C. (1984). *Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión*. CENIM-CSIC. España.
- STERN, M. y GEARY, A.L. J. (1957) *Electrochem, Soc.* 104 (1) Pp. 56-61
- TROCÓNIS DE RINCÓN, O. (1997), *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, DURAR Red Temática XV.B. Durabilidad de la Armadura "DURAR", Río de Janeiro, 195 págs.
- URUCHURTU, CH. J. (1984), Ph. D. Thesis UMIST. Manchester England.
- ZHANG, T y ODD E. G. (1994), *Electrochemical Method for accelerated Testing of Chloride Diffusivity in Concrete*, Cement and Concrete Research, V. 24 N. 8, pp 1534-1548.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo brindado al CONACYT y al CIMAV, así como también al personal técnico del Grupo de Corrosión: M.C. Adán Borunda Terrazas y M.C. Víctor Orozco Carmona.

Demetrio Nieves Mendoza

Ingeniero Civil, M.I. en Vías Terrestres
Estudiante de Doctorado en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Grupo Corrosión
Chihuahua México

Civil Engineer, Master in Engineering Transport Systems
Doctorate Student in Material Science



*Advanced Materials Research Center
Corrosion group
Chihuahua México
demetrio.nieves@cimav.edu.mx*

Manuel Bustamante Vega

*Ingeniero Civil,
Estudiante de Maestría en Vías Terrestres
Universidad Autónoma de Chihuahua
Cd. Universitaria
Chihuahua, México*

*Civil Engineer
Master Student in Engineering Transport Systems
Chihuahua Autonomus University
Cd. Universitaria
Chihuahua, Chihuahua
manuel.bustamante@cimav.edu.mx*

Facundo Mauricio Almeraya Calderón

*Ingeniero en Metalurgia, Dr. en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Grupo Corrosión
Chihuahua, México*

*Metallurgy Engineer, Ph. D. Material Science
Advanced Materials Research Center
Corrosion group
Chihuahua, México
Facundo.almaraya@cimav.edu.mx*

Jorge Uruchurtu Chavarin

*Ingeniero Electrónico, Dr. En Ciencias de la Corrosión
Centro de investigaciones de ingeniería y ciencias aplicadas CIICAp
Cuernavaca, Mor. México
Electronic Engineer, Ph. D. In Corrosion Science
Research Center of Applied Engineering and Sciences. CIICAp
Cuernavaca, Mor. México
juch25@yahoo.com.mx*

Citlalli Gaona Tiburcio

*Ingeniero en Metalurgia, Dr. en Ciencia de Materiales
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Grupo Corrosión
Chihuahua, México*

*Metallurgy Engineer, Ph. D. Material Science
Advanced Materials Research Center
Corrosion group
Chihuahua, México
citlalli.gaona@cimav.edu.mx*

Alberto Martínez Villafañe

*Licenciado en Físico-Matemáticas, Dr. en Ciencias de la Corrosión
Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.
Chihuahua, México*



Chihuahua, México

Bachelor Science in Physics and Mathematics, Ph. D. In Corrosion Science

Advanced Materials Research Center

Corrosion group

[*martinez.villafane@cimav.edu.mx*](mailto:martinez.villafane@cimav.edu.mx)

