

An electrochemical study of $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ as steel corrosion inhibitor in chlorides-contaminated concrete

Orlando Pérez, Oleyda Morón y Oladis de Rincón

Centro de Estudios de Corrosión, Ciclo Básico Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería
Universidad del Zulia. Apartado postal 526, Maracaibo 4001-A, Venezuela
e-mail: operez@luz.ve

Abstract

The aim of this paper is to evaluate Hydroxy Pentacalcium Triphosphate [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] behavior as corrosion inhibitor in concrete by electrochemical techniques. Calcium Nitrite [$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$] is used to compare the inhibitors' action.

The experimental work was carried out with 40 cylindrical concrete probes made with natural water from Lake Maracaibo. Concentrations of inhibitors according to cement weight ranged from 1 to 4% Water/cement ratio was 0.64. Probes were built using two graphite bars serving as reference and auxiliary electrode respectively, and steel bars serving as work electrodes. Once cured, the probes were periodically immersed in a salt solution (3.5% NaCl), throughout the evaluation time. Control probes were made using tap water (TW). They were immersed in TW for as long as the experimental probes.

The same time the electrochemical techniques used in this work made it possible: a) to measure potentials and hence estimate probabilities of corrosive action vs. Cu/CuSO₄ electrode; b) to determine corrosion rate by the polarization resistance method. Anodic and cyclic polarization curves were used to evaluate the behavior of the inhibitor at a polarization rate of 0.28 mV/s. Evaluation time was 260 days.

$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ showed the same inhibiting effect as $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ - 3% up to 170 days. After 260 days none of these inhibitors showed effective protection. Probes prepared with tap water remained passive.

Key words: Corrosion inhibitor, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, concrete, calcium nitrite.

Estudio electroquímico del $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ como inhibidor de corrosión del acero en concreto contaminado con cloruros

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo evaluar electroquímicamente el Trifosfato Hidróxido Pentacálcico [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$] como inhibidor de corrosión del acero en concreto, utilizando al Nitrito de Calcio [$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$] para efectos comparativos de la acción inhibidora.

Se prepararon 40 probetas cilíndricas de concreto con Agua del Lago, usando concentraciones de inhibidor en el intervalo de 1-4%, basados en el peso del cemento. La relación agua/cemento fue de 0,64. Como electrodos de referencia y auxiliar se utilizaron barras de grafito y como electrodos de trabajo, cabillas de acero. Una vez curadas las probetas, fueron expuestas permanentemente a un medio salino al 3,5% de NaCl, durante el tiempo de evaluación, a excepción de los blancos preparados con agua potable que se expusieron a este mismo tipo de agua.

Para la evaluación electroquímica se realizaron mediciones de potenciales para estimar la probabilidad de actividad corrosiva, vs el electrodo de Cu/CuSO₄, y mediante el método de resistencia a la polarización determinar la velocidad de corrosión. Para evaluar el comportamiento del inhibidor se hizo uso de las Curvas de Polarización Cíclicas, trazadas potenciodinámicamente a 0,28 mV/s. El tiempo de evaluación fue de 260 días.

El Ca₅(PO₄)₃OH demostró un efecto inhibidor similar al Ca(NO₂)₂ - 3%, hasta los 170 días. Luego de 260 días, ninguno de los inhibidores dio una protección efectiva, manteniéndose pasivas las probetas preparadas con agua potable.

Palabras clave: Inhibidor, Ca₅(PO₄)₃OH, concreto, nitrito de calcio.

Introducción

El concreto contiene un conjunto de compuestos alcalinos que le confieren en su fase acuosa de poros, un elevado pH (12,6), el cual permite que el acero se recubra de una capa de óxido de hierro (Fe₂O₃ γ) la cual es responsable de su pasividad, produciendo un efecto barrera contra agentes agresivos.

Por esta razón, la velocidad de corrosión es despreciable a temperaturas y condiciones meteorológicas normales, siempre y cuando se exponga la estructura en aguas relativamente limpias. Si se prepara concreto con arena ó agua contaminada con cloruros (arena ó agua del Lago de Maracaibo), se alteran las propiedades de la película superficial protectora del acero, despasivándose y corroiéndose, agrietándose el concreto, pudiendo llegar a inutilizar la estructura. A nivel mundial, se han ensayado diferentes maneras de minimizar este problema [1-7], tales como el uso de revestimientos sobre la cabilla, la eliminación de iones cloruros, protección catódica, adición de inhibidores de corrosión al concreto, reducción de la permeabilidad del concreto mediante una relación agua cemento baja, y selladores.

Los inhibidores de corrosión afectan la velocidad de los procesos de corrosión al influenciar la cinética de las reacciones electroquímicas responsables de estos procesos, retardando, ya sea la reacción anódica, la catódica, o ambas, simultáneamente.

Los inhibidores se usan ampliamente en la tecnología de corrosión, pero, en el control de la corrosión del acero en concreto, su uso ha sido limitado, debido a la existencia de diferentes tipos de ambientes a los cuales se exponen las estructuras, a los efectos colaterales y a la efectividad en las propiedades mecánicas y físico-químicas producidas por el inhibidor [7,8]. El uso de inhibidores

de corrosión para prevenir la corrosión del acero en concreto, en presencia de iones cloruros, se encuentra todavía en proceso de investigación [9].

El uso de inhibidores podría ser la mejor solución en aquellos casos en los cuales el concreto se prepare con agua o arena contaminada con iones cloruros. En Venezuela, y específicamente en el Estado Zulia, el concreto era preparado con agua del Lago de Maracaibo. Esta práctica no se siguió realizando, ya que el agua ha aumentado su salinidad con el tiempo, debido a su comunicación con el mar. Así, el uso de inhibidores en este caso podría ser una solución adecuada, cuando se necesite usar esta agua para preparar concreto en edificaciones que se construyan lejos de la costa.

Actualmente el Nitrito de Calcio [Ca(NO₂)₂] es el inhibidor más comúnmente usado para prevenir la corrosión del acero, inducida por iones cloruros. Sobre su modo de acción existen algunos estudios: Rosemberg y Gaidis [10], proponen un mecanismo de la inhibición por el Ca(NO₂)₂; otros investigadores [11,12], afirman que el Ca(NO₂)₂ reduce ó detiene la corrosión sin afectar las propiedades del concreto, mejorando la resistencia del mismo; en otros trabajos [7,8] se ha encontrado que el Ca(NO₂)₂, disminuye la resistencia a la compresión, causando otros efectos como eflorescencia y aumenta su susceptibilidad a reaccionar con agregados alcalinos [12]. Su mayor desventaja es su costo y el hecho de que es un inhibidor anódico, que podría ser peligroso cuando se encuentra en concentraciones insuficientes, ya que no controlaría la corrosión localizada inducida por los cloruros.

Sobre esta base se ha venido estudiando el problema en el Centro de Estudios de Corrosión [12] de LUZ, para tratar de encontrar un inhibidor que sustituya al Ca(NO₂)₂, que pueda inhibir la corrosión del acero de refuerzo sin afectar las propiedades del concreto. También se han efectuado otros estudios que indican protección del acero,

cuando el inhibidor utilizado es a base de fosfato [13,14].

Los fosfatos se usan normalmente como inhibidores de corrosión en sistemas de suministro de agua, agua de enfriamiento, e instalaciones de potencia [15]. En estos sistemas, el Fosfato trisódico protege mejor al acero que el Fosfato de Sodio Monosustituido, posiblemente debido a que este último acidifica al medio, producto de su disociación. Es de esperar, entonces, que una sustancia como el $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, ejerza una acción protectora debido a la acción del PO_4^{3-} , y del grupo OH^- , los cuales no acidifican al medio, sino al contrario, lo alcalinizan más.

Se ha demostrado [15], que los inhibidores base fosfato, forman depósitos que provocan polarización catódica, pero, al mismo tiempo, en agua con concentraciones moderadas en cloruros y sulfatos pueden pasivar al acero en presencia de suficiente concentración de oxígeno, comportándose como inhibidores anódicos. En estas circunstancias y utilizados en cantidades insuficientes, podrían generar corrosión por picaduras en sistemas de agua de enfriamiento.

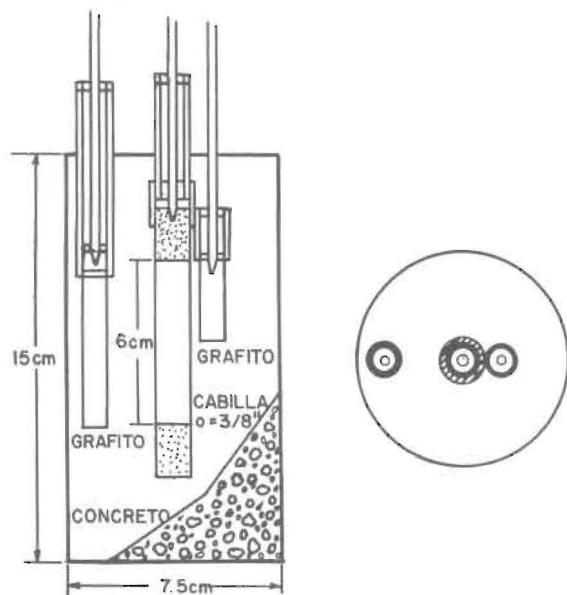


Figura 1. Detalles de probeta construida.

Así, el objetivo de este trabajo es evaluar electroquímicamente al $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ como inhibidor de corrosión del acero en concreto.

Procedimiento Experimental

La parte experimental de este proyecto de investigación se llevó a cabo siguiendo las etapas que se indican a continuación.

Confección de las probetas

Para la preparación de los electrodos de grafito se usaron barras cilíndricas de 4 y 6 cm de longitud, correspondientes al electrodo de referencia y auxiliar, respectivamente (Figura 1). Los electrodos de trabajo fueron cabillas de acero de $\varnothing 3/8"$ (0,95 cm) y de 10 cm de longitud. Se revistieron en sus extremos, con una resina epoxy poliamida (2 cm), para definir un área expuesta de 18 cm^2 cada uno. La porosidad de este revestimiento fue inspeccionada en un Microscopio Estereoscópico (a 20X), para repintar las superficies con defectos y así lograr la ausencia de poros en éste.

La dosificación del concreto se llevó a cabo mediante las siguientes relaciones: peso cemento / peso arena = 1/2, peso cemento / peso grava = 1/3, y peso agua / peso cemento = 0,64.

Los materiales de construcción utilizados son comunes en la región. La grava fue de la llamada "Frijolito" (6 mm) y el agua usada fue la del Lago de Maracaibo, previamente filtrada y analizada químicamente (Tabla 1), excepto el agua potable que se usó para preparar las probetas de control (BP).

Los inhibidores utilizados fueron $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ y $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$. El primero de ellos fue usado bajo la forma de solución de aproximadamente 30% en $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$. El $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ se adicionó en forma de polvo (reactivo grado analítico), a la mezcla sólida de cemento y arena.

Las proporciones de inhibidores adicionados a la mezcla fueron en base al peso del cemento, en porcentajes comprendidos entre el 1 y el 4%. El proceso de curado fue de 28 días, con una hume-

Tabla 1
Análisis químico realizado al agua del Lago

Temperatura	pH	SO_4^{2-}	Cl^-	Resistividad Eléctrica
25°C	8,61	440 ppm	2839 ppm	203 Ohm x cm

dad relativa igual al 100%. Una vez finalizado éste, se procedió a realizar inmersiones parciales con agua salina (3,5% NaCl), con inmersiones totales intermitentes, para acelerar el ataque. A excepción de las probetas preparadas con agua potable que eran expuestas a este mismo tipo de agua.

Evaluación electroquímica. Medidas de potenciales

Una vez fraguadas las probetas, se comenzaron a medir los potenciales del acero de refuerzo del concreto, diariamente los primeros 45-50 días, luego semanalmente por un lapso de 260 días. Las medidas fueron realizadas mediante un Multímetro de 10 M.ohm. de impedancia interna, usando como electrodo de referencia el de Cu/CuSO₄ saturado.

Medidas de resistencia a la polarización

Estas se realizaron con un Potenciostato Computarizado PARC 173, con una frecuencia aproximada de 30 días, para así determinar su Resistencia a la polarización (Rp), a una velocidad de barrido de 0,28 mV/s, y desde -15 hasta +10 mV del potencial de corrosión. Una vez detectado un cambio importante en las medidas anteriores, se realizaron **Curvas de Polarización Cíclicas y Potenciodinámicas**, tanto a los 100, como a los 260 días, para comparar el comportamiento de cada probeta entre sí y para calcular el valor de la

constante B ($I_{corr} = B/R_p$), para cada tipo de mezcla y concentración del inhibidor. El potencial inicial fue -200 mV vs E_{corr}, sin precondicionamiento de potencial, y la velocidad de barrido 0,28 mV/s. Las probetas sometidas a este ensayo fueron desechadas inmediatamente después.

Resultados y Discusión

Medición de potenciales

Las medidas de potenciales con respecto al electrodo de Cu/CuSO₄, de las probetas de control BP (Blancos preparados con agua potable) y BL (Blancos preparados con agua del lago) se pueden apreciar en las Figuras 2 y 3. En la Figura 2 se puede observar, que las probetas preparadas con agua potable, muestran potenciales más positivos que -200 mV vs Cu/CuSO₄ dando una idea de la pasividad de las probetas con respecto a las otras. En las probetas preparadas con agua del Lago (Figura 3) se observan potenciales iguales y menores que -200 mV vs Cu/CuSO₄, y que disminuyen con el tiempo, pudiendo significar esto, que han perdido la pasividad por la ruptura de la película protectora, si es que la hubo al principio.

Los potenciales de las probetas preparadas con Ca(NO₂)₂ se muestran en la Figura 4. En las probetas que presentan una concentración del 3% y 4% el acero muestra un estado de pasividad que

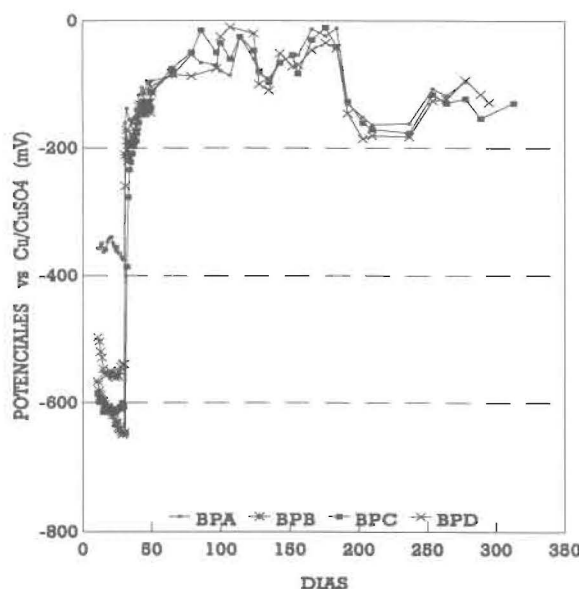


Figura 2. Potenciales BP. Agua potable. Sin inhibidor. Potenciales vs Cu/CuSO₄ (mV)

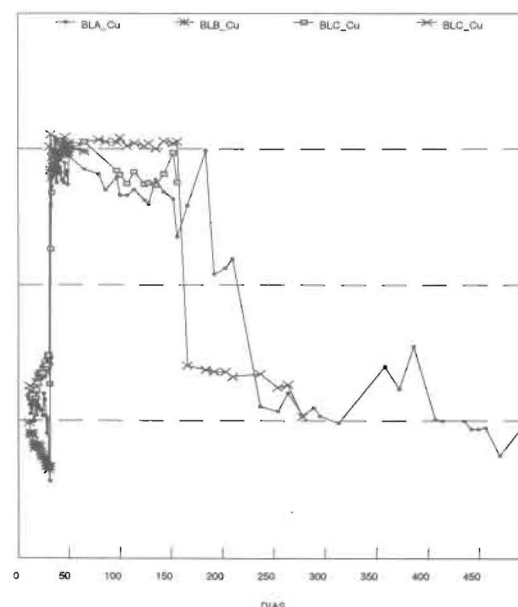


Figura 3. Potenciales BL. Agua del Lago. Sin inhibidor.

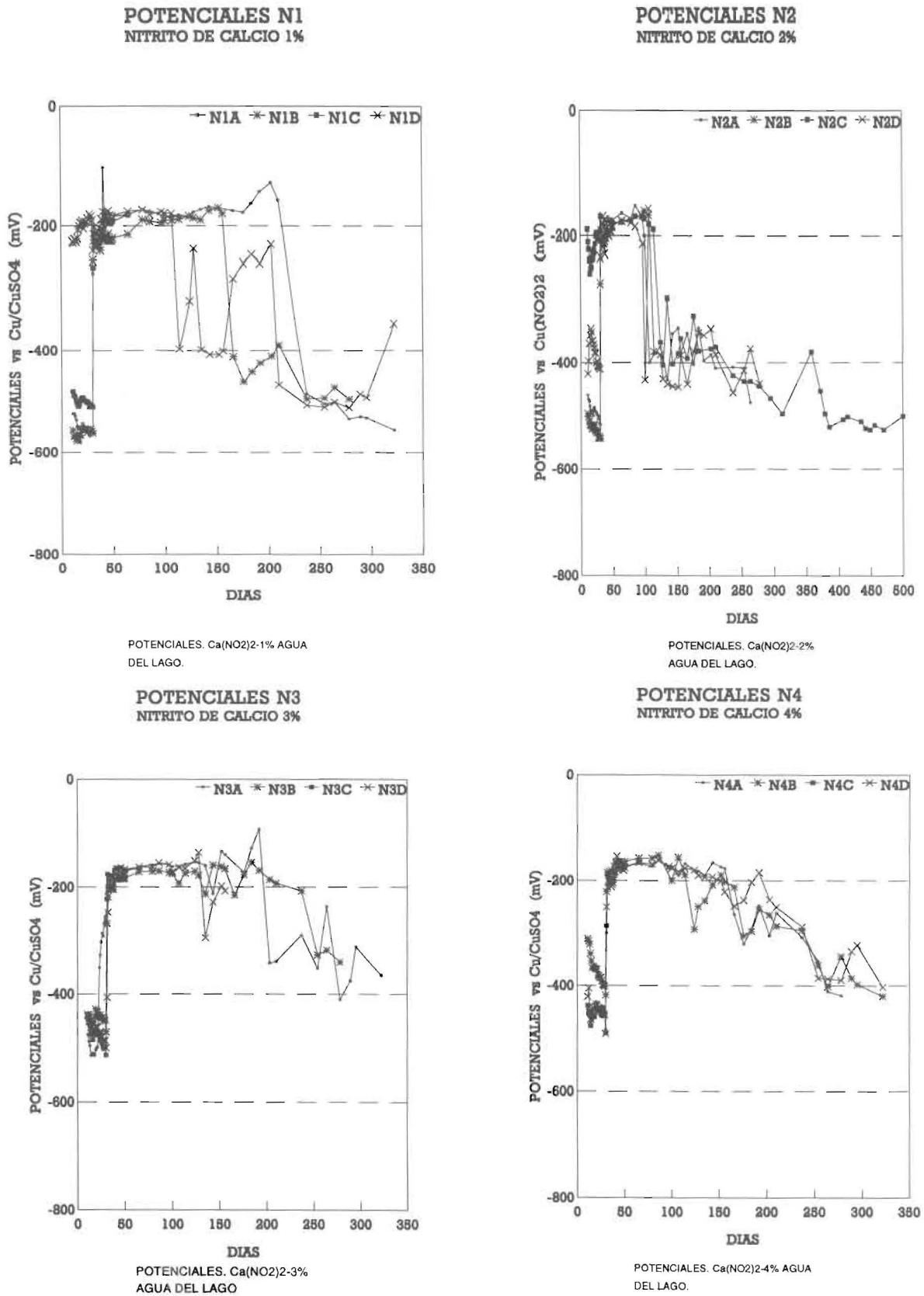


Figura 4. Potenciales. Nitrito de calcio.

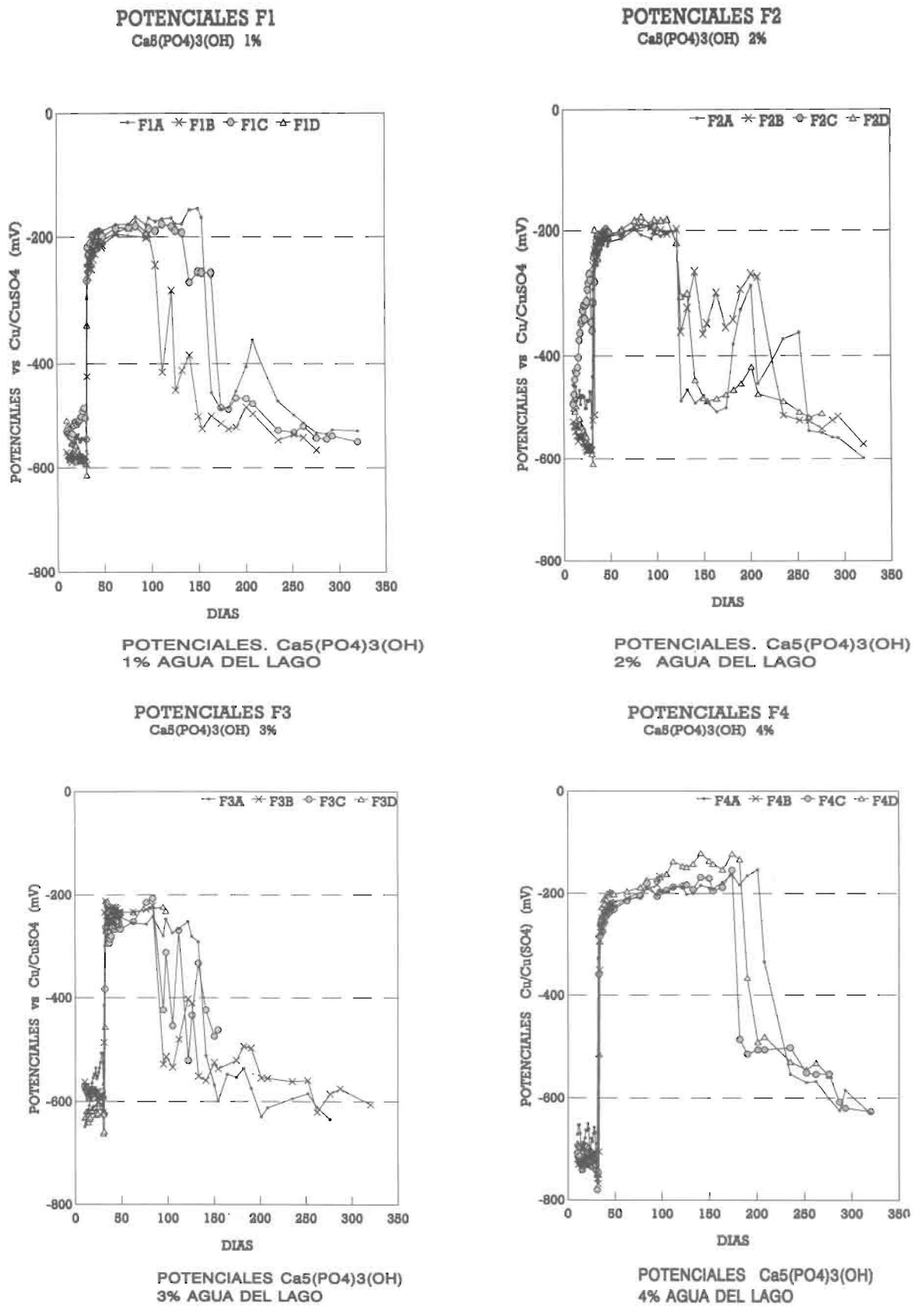


Figura 5. Potenciales. Ca₅(PO₄)₃OH.

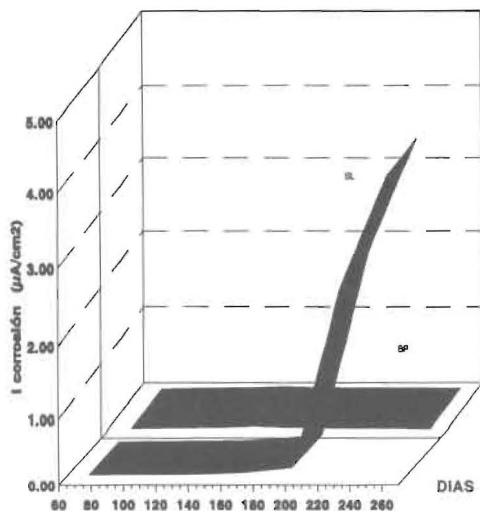


Figura 6. I_{corr} vs. Tiempo. Probetas con agua potable (BP) y con agua del Lago (BL).

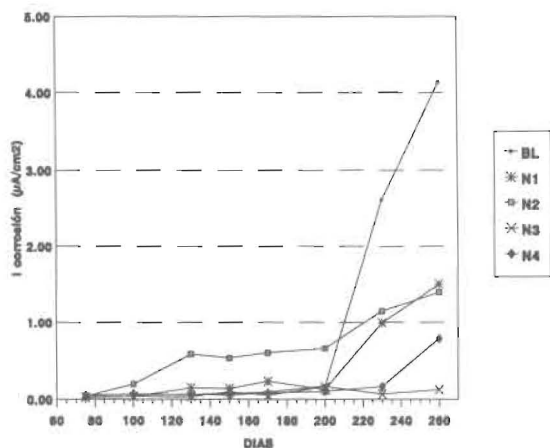


Figura 7. I_{corr} a diferentes concentraciones de Ca(NO₂)₂ (1, 2, 3, 4%) y con agua del Lago (BL).

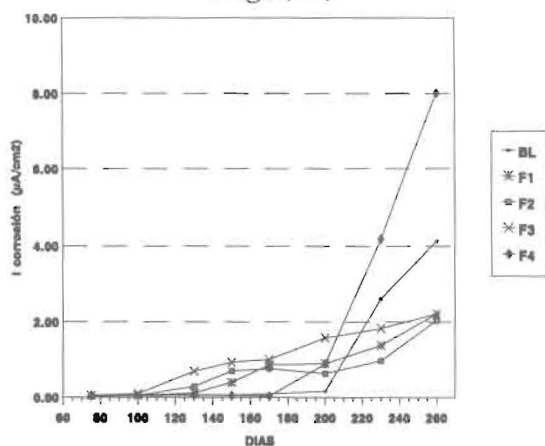


Figura 8. I_{corr} a diferentes concentraciones de Ca₅(PO₄)₃OH (1, 2, 3, 4%) y con agua del Lago (BL).

se mantiene los primeros 170 días. Luego de este tiempo de exposición al medio agresivo, el acero mostró en todos los casos, potenciales que indicaban alta potencialidad de corrosión. Estos resultados ya habían sido evaluados por otros[4,5] demostrándose la baja efectividad de este inhibidor adicionado a un concreto de mala calidad como el usado en esta investigación[8].

El acero en las probetas preparadas con Ca₅(PO₄)₃OH (Figura 5), presenta un estado de pasividad tal que a concentraciones del 1, 2 y 4%, los potenciales son más positivos que -200 mV los primeros 100 días, no ocurriendo así en las probetas preparadas con 3%, donde el acero antes de los 100 días, ya presentaba potenciales más negativos que -200 mV. Las probetas con una concentración del 4% mantuvieron por más tiempo el estado de pasividad (entre 170 y 200 días), y también mostraron los valores más activos al final de la evaluación.

Según estos resultados el Ca₅(PO₄)₃OH al 4%, y el Ca(NO₂)₂ al 3%, muestran una pasividad que indica una efectividad similar en su poder inhibitorio, los primeros 170 días. A partir de ese momento ninguno de los inhibidores fue efectivo.

Resistencia óhmica

Debido a que el concreto presenta una elevada resistividad que podría incidir negativamente en la medida de la Resistencia a la Polarización (R_p) para el cálculo de la velocidad de corrosión, se determinaron las resistencias óhmicas de las probetas mediante un Potenciostato. Los mismos resultaron mucho menores que los valores de R_p determinados, lo que evidencia que no hizo falta el ajuste por compensación de caída óhmica[16]. Este resultado era de esperarse, ya que el electrodo de referencia y el electrodo de grafito estaban muy cercanos (3 mm).

Resistencia a la polarización

Se calcularon las velocidades de corrosión (I_{corr}: µA/cm²), mediante el método de resistencia a la polarización (R_p), para cada probeta, obteniéndose las Figuras 6-8, donde se puede observar que el acero presenta en general, un incremento en la velocidad de corrosión con el tiempo de exposición. En la Figura 6 se observa un cambio en la I_{corr} de las probetas preparadas con agua del Lago sin inhibidor a los 150 días aproximadamente, coincidiendo con lo observado en las medidas de potenciales, indicando ésto la pérdida de la pasividad del

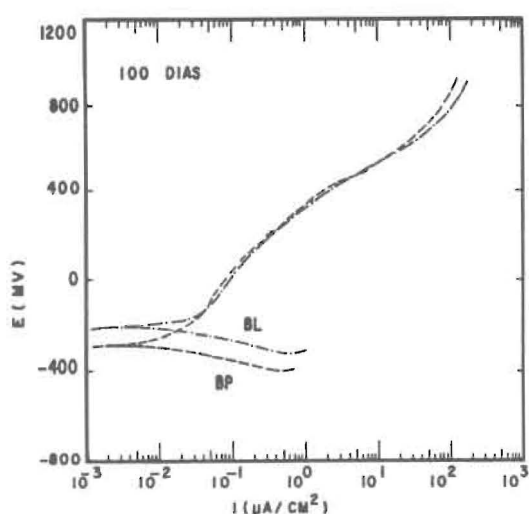


Figura 9. Curvas potenciodinámicas. Probetas con agua potable (BP) y con agua del Lago (BL) a los 100 días de preparadas.

acero. Este comportamiento de pasivación inicial del acero, en concreto preparado con agua del Lago no era esperado ya que en otros trabajos efectuados [7, 14], el acero no se pasivaba cuando se usaba esta agua en la mezcla.

Por el contrario el acero en la probeta preparada con agua potable se mantiene pasivo. Las probetas preparadas con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ (Figura 7) muestran para las concentraciones del 3% y 4%, valores más bajos de la velocidad de corrosión durante el tiempo de evaluación (260 días). En la Figura 8 se observa que las probetas preparadas con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ al 1, 2, y 3% presentan un comportamiento similar en cuanto a la velocidad de corrosión, siendo ésta más baja con respecto a la de 4% y a la probeta preparada con Agua del Lago. Sin embargo, todos estos valores al final del periodo de evaluación (260 días), presentan un incremento de la velocidad de corrosión, indicando pérdida de la pasivación del acero.

Estos resultados indican que con un concreto de esta calidad (relación $a/c = 0,64$), ninguno de estos inhibidores daría una protección efectiva, como ya había sido determinado para el $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ [9].

Curvas de polarización cíclicas y potenciodinámicas

La Figura 9 muestra las curvas potenciodinámicas para las probetas sin inhibidores, preparadas con agua potable (BP), y con agua del Lago (BL) a los 100 días, en ellas no se observan diferencias en su comportamiento cinético, posiblemente debido a que la concentración de cloruros

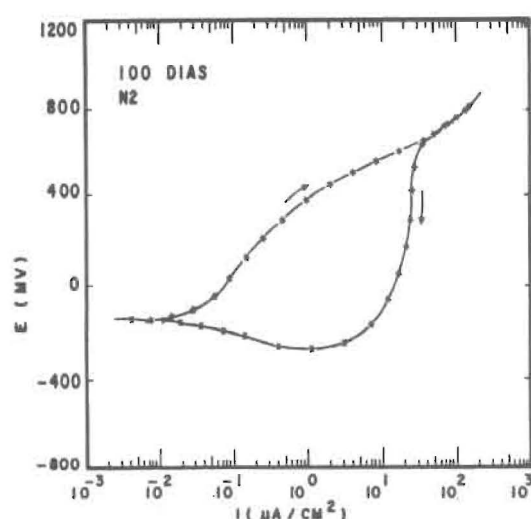


Figura 10. Curva de polarización cíclica. Probeta con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2 - 2\%$ (N2) a los 100 días de preparadas.

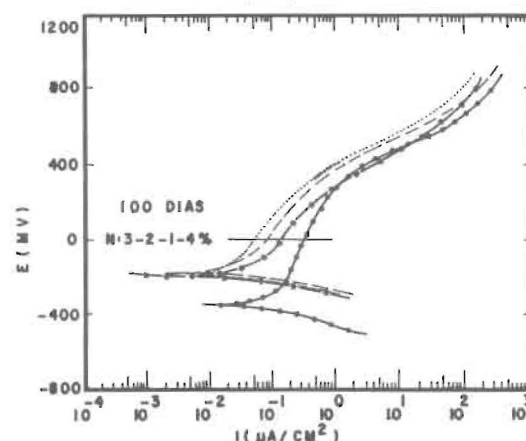


Figura 11. Curvas potenciodinámicas. Probetas con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2(\text{N})$ como inhibidor a los 100 días de preparadas.

libres no es suficiente para iniciar el ataque en ese lapso de tiempo, hecho que se corresponde con las velocidades de corrosión muy bajas que se visualizan en la Figura 6, a pesar de presentar la probeta BL, potenciales un poco más activos que las BP (Figuras 2 y 3), pero cercanos a los -200 mV vs. Cu/CuSO_4 .

La curva de polarización cíclica de la Figura 10, con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ al 2% (N2), presenta en su barrido directo una disminución de $1/3$ de corriente con respecto a N1 (Figura 11). Al iniciarse el retorno del potencial, hasta unos 300 mV, se mantiene una elevada corriente, indicando esto la no repasivación de las posibles picaduras formadas, o el inicio de un proceso de corrosión por espacios confinados, obteniéndose al final del retorno un

potencial inferior al E_{CORR} (en estado estable: -57 mV), lo cual señala un proceso de corrosión en marcha, lo cual coincide con los resultados de pérdida de pasividad reportados en la Figura 4. Un lapso de tiempo de 100 días, representa para estas probetas (N2), la pérdida de pasividad que se observa en la Figura 4.

El $Ca(NO_2)_2$, adicionado al 1,2 y 4% , no refleja ningún efecto inhibitor a los 100 días (Figura 11), a excepción del $Ca(NO_2)_2$ al 3%, el cual produce una disminución de un tercio de década de corriente, con respecto a BL (Figura 14).

Para el caso del $Ca_5(PO_4)_3OH$, en todas sus concentraciones, a los 100 días de evaluación se nota un comportamiento pasivo del acero (Curva

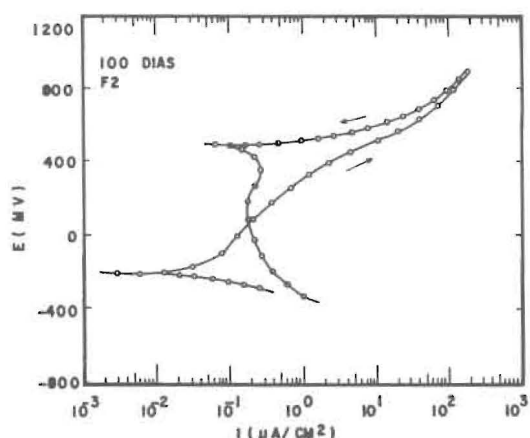


Figura 12. Curva de polarización cíclica. Probeta con $Ca_5(PO_4)_3OH$ 2% (F2). A los 100 días de preparadas.

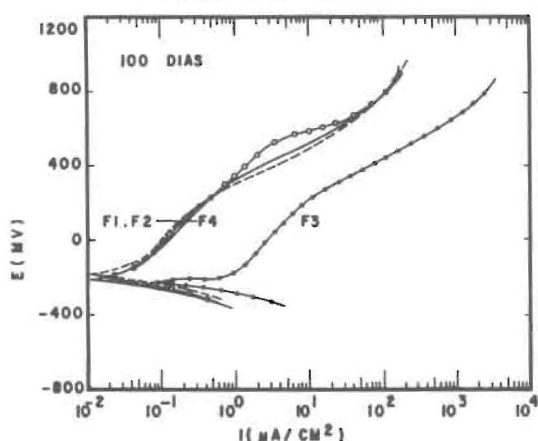


Figura 13. Curvas potenciodinámicas. Probetas con $Ca_5(PO_4)_3OH$ 1-2-3-4% a los 100 días de preparadas.

típica: Figura 12), demostrándose la estabilidad de la película formada, donde en el barrido inverso, se obtienen corrientes muy pequeñas, a potenciales muy nobles.

Comparando las curvas potenciodinámicas trazadas para el $Ca_5(PO_4)_3OH$, a diferentes concentraciones (Figura 13), se nota que a las proporciones de 1, 2 y 4%, se observa el mismo comportamiento cinético, excepto para la probeta al 3%, que muestra un incremento de la velocidad de corrosión, de más de una década de corriente, sin embargo este comportamiento puede deberse a varios factores no bien precisados hasta el momento.

En conclusión, a los 100 días de evaluación, el $Ca(NO_2)_2$ - 3%, presentó un ligero efecto inhibitor (Figura 14), y las probetas con $Ca_5(PO_4)_3OH$, en todas sus concentraciones, mostraron la formación de una película pasiva estable. El comportamiento de ambos resultó parecido.

A los 260 días de evaluación, las probetas con agua potable (BP) mantienen su pasividad (Figuras 2,15,16). Y las probetas elaboradas con el $[Ca_5(PO_4)_3OH]$, presentan curvas de polarización cíclicas similares a la de la Figura 18, con lazos de histéresis mucho más pequeños, que los de las curvas de probetas con nitrato cálcico (Figura 17), y potenciales de repasivación ligeramente más nobles que los potenciales de corrosión (vs. Grafito), lo que significaría que en ambos casos la película pasiva se rompe. Y aun cuando el acero en todas las probetas preparadas con 2% de $Ca(NO_2)_2$ no mostraron pasivación (Figuras 4 y 10), el resto

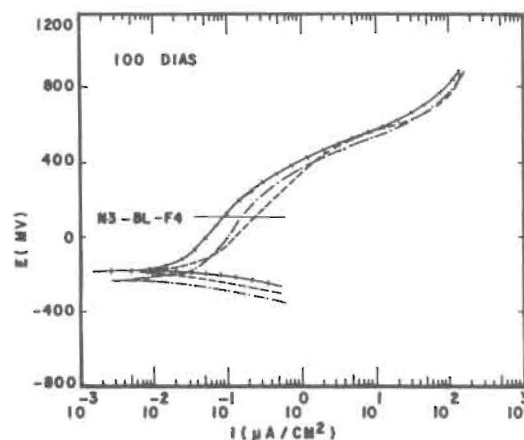


Figura 14. Curvas potenciodinámicas. Probetas con $Ca(NO_2)_2$ 3%(N3) agua del Lago (BL) y $Ca_5(PO_4)_3OH$ 4% (F4). A los 100 días de preparadas.

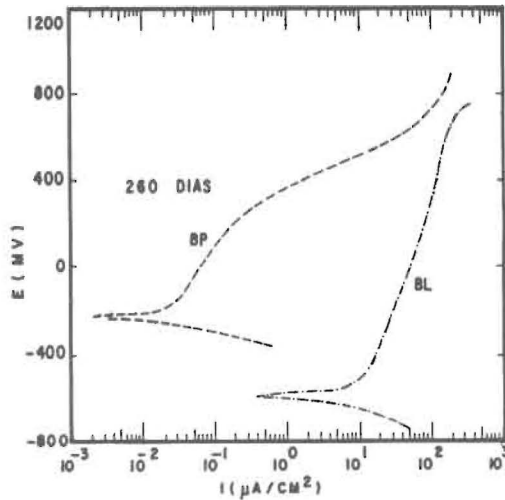


Figura 15. Curvas potenciodinámicas. BP-BL. 260 días.

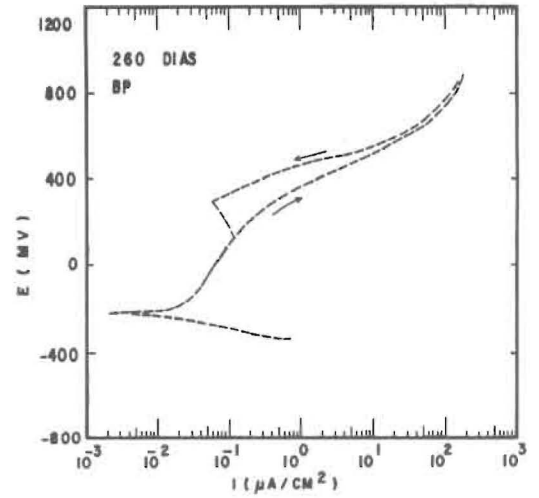


Figura 16. Curva de polarización cíclica. Probeta con agua potable (BP) a los 260 días de preparada.

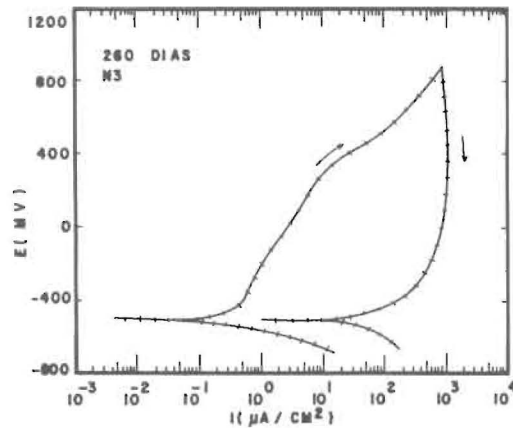


Figura 17. Curva de polarización cíclica. Probeta con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ 3% (N3) a los 260 días de preparada.

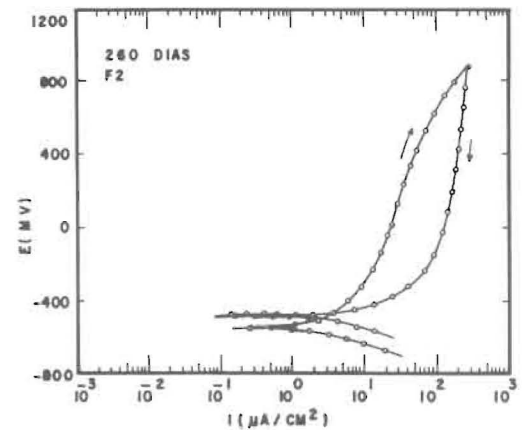


Figura 18. Curva de polarización cíclica. Probeta con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 2% (F2) a los 260 días de preparada.

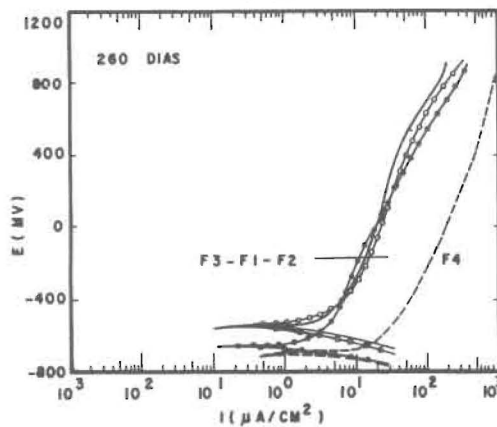


Figura 19. Curvas potenciodinámicas. Probetas con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 1-2-3-4% a los 260 días de preparadas.

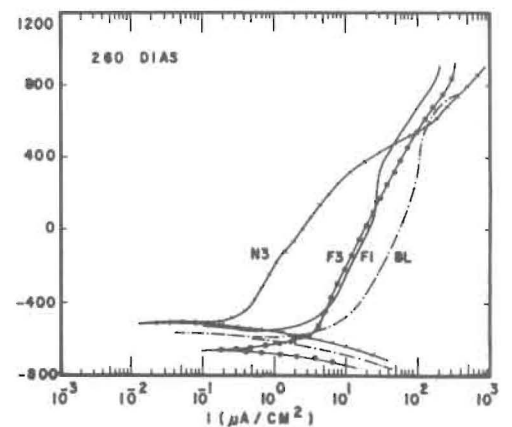


Figura 20. Curvas potenciodinámicas. Probetas con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ 3%(N3). $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ 1-3% (F1.F3). Agua del Lago (BL) a los 260 días de preparadas.

muestra un comportamiento similar a las preparadas con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, a todas las concentraciones.

En la Figura 19 se nota que las concentraciones de $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ al 1, 2 y 3%, muestran un comportamiento similar entre sí, no así, la de 4%, que presenta una velocidad mayor, en una década de corriente, estando éste en correspondencia con el hecho de que a la proporción del 4%, el acero pierde su pasividad abruptamente, a los 220 días (Figura 5), e incrementa notablemente su velocidad de corrosión (Figura 8), siendo este comportamiento inesperado, dada la posibilidad de inhibidor mixto que posee el fosfato.

A los 260 días (Figura 20), aun cuando se observa una disminución de la densidad de corriente, en las probetas preparadas con Nitrito de Calcio al 3%, y el de las preparadas con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ al 1, 2 y 3%, los potenciales (Figuras 4,5), y las curvas de polarización cíclicas, señalan pérdida de pasividad. Lo cual indica que para este tiempo de evaluación, ningún inhibidor resultó efectivo para la mezcla de concreto utilizada.

Conclusiones

1.- Durante los primeros 170 días las probetas preparadas con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ al 4% mostraron una pasividad similar a las preparadas con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ al 3%.

2.- Ningún inhibidor resultó satisfactoriamente efectivo en las condiciones de estudio, luego de 260 días.

3.- Las Curvas de Polarización Cíclicas permiten efectuar una mejor evaluación cualitativa de la película pasiva.

Nomenclatura

B	Constante de Stern-Geary
BL	Probeta con Agua Potable
BP	Probeta con Agua del Lago
$\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$	Nitrito de Calcio
$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$	Trifosfato Pentacálcico Hidróxido
E_{corr}	Potencial de Corrosión
F	Probeta con $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$
$\text{Fe}_2\text{O}_3\gamma$	Óxido Férrico Gamma
I_{corr}	Densidad de Corriente de Corrosión
N	Probeta con $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$

Rp Resistencia a la Polarización

mV Milivoltios

μA Microamperio

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad del Zulia (CONDES), y del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Venezuela (CONICIT).

Referencias Bibliográficas

1. Tripler, A. et al.: "Methods for Reducing Corrosion of Reinforcing Steel". Highway Research Board. National Cooperative Highway Research Program. Report 23. Washington D.C. 1966.
2. Maahn, E. "The Influence of Microstructure on the Corrosion Properties of Hot Dip Galvanized Reinforcement in Concrete". Paper 271. NACE. Corrosion 85. Boston, Mass. USA.
3. Elsener, B. Molina, M. and Böhni, H.: "The Electrochemical Removal of Chlorides from Reinforced Concrete". Corrosion Science, Vol. 35, Nos. 5-8, (1993). 1563-1570
4. Berke, N.S and Grace, W.R: "The Effects of Calcium Nitrite and Mix Design on the Corrosion Resistance of Steel in Concrete. Part I". Corrosion 85. NACE, Paper 273. Sn. Francisco, California, U.S.A. March. 1985.
5. Hartt, W. y Voshardt, H.: "Influence of $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ on Sea Water Corrosion of Reinforcing Steel Concrete. Part II". Corrosion 81. NACE. Paper 52, April, Toronto, Canada. 1981.
6. Rosemberg, A.M. Gaidis, J.M. et al: "A Corrosion Inhibitor Formulated with Calcium Nitrite for used in Reinforced Concrete". ASTM-STP 629. 1977.
7. Trocónis de R. O. "Uso de los Inhibidores para el Control de la Corrosión del Acero de Refuerzo del Concreto". Memorias VIII Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Argentina. Oct.-Nov. (1988). 444-446.
8. Martínez de N, Trocónis de R. O. "Efecto de los Inhibidores ZnO y $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ y del Agua del Lago en las Propiedades Físico-químicas del

- Concreto". Memorias del II Congreso Iberoamericano de Corrosión y Protección. Tomo I. Maracaibo- Venezuela. Nov. (1986) 397-403.
9. Trocónis de R.O., Pérez O., Longa I., Ludovic J. "An Evaluation of ZnO and Ca(NO₂)₂ as Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete Contaminated with Chlorides". Centro de Estudios de Corrosión-LUZ. Memorias del V Encuentro Nacional de Electroquímica (S.V.E). Mérida Venezuela. Sept. (1992) 409-423.
 10. Rosemberg A.M. and Gaidis J.M. " The Mechanism of Nitrite Inhibition of Chloride Attack on Reinforcing Steel in Alkaline Aqueous Environments". Materials Performance. NACE. November. (1979). 45-48.
 11. Craig, R.J, Wood L. "Effectiveness of Corrosion Inhibitors and their Influence on the Physical Properties of Portland Cement Mortars". Highway. Research Record. 1990.
 12. Trocónis de R.O., Sánchez, M. "Técnicas Utilizadas para el Monitoreo de Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado con Acero". I Simposio sobre Estructuras de Concreto Armado. Control de Corrosión y Rehabilitación. (1992). T-1.
 13. Trocónis de R.O., Oliva B.H. "Estudio sobre Inhibidores de Corrosión en Concreto Contaminado con Sal. Parte II". Universidad del Zulia. Facultad de Ingeniería. Trabajo de Ascenso. 1984.
 14. Alvarez, F. y Suárez, C. "Estudio de Inhibidores de Corrosión en Concreto Contaminado con Sal". Trabajo Especial de Grado. LUZ. Facultad de Ingeniería. 1982.
 15. Rozenfeld I. L. "Corrosion Inhibitors". McGraw Hill International Book Company. USA. 1981.
 16. González J.A. "Control de la Corrosión: Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas". CSIC-CENIM. Madrid-España. 1989.

Recibido el 10 de Octubre de 1995

En forma revisada el 25 de Febrero de 1997