



Estudio de una metodología basada en el monitoreo de potencial de corrosión para la evaluación de desempeño de mezclas cementicias – Parte 1.

Methodology study based on corrosion potential monitoring for cementitious mixtures performance evaluation – Part 1.

Presentación: 04/04/2025

Aprobación: 28/04/2025

Publicación: 07/05/2025

Enzo D. Gomez

 0009-0004-1087-1309

Universidad Católica Argentina, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agraria, Argentina.

Comisión Nacional de Energía Atómica, Gerencia de Materiales, Departamento de Corrosión, Argentina.

enzogomez@uca.edu.ar

enzodavidgomez@cnea.gob.ar

Resumen

El hormigón protege física y químicamente al acero contra la corrosión. Debido al pH del hormigón (≈ 13), el acero embebido desarrolla un film de óxido estable (capa pasiva) que inhibe el deterioro. Cuando el hormigón se contamina con agentes agresivos ambientales, la capa pasiva se daña y la corrosión se inicia. En hormigón sin defectos y bien colocado, el tiempo que tardan los agentes agresivos en alcanzar las armaduras e iniciar la corrosión, dependerá de la calidad de la mezcla y de las condiciones ambientales de exposición. Este trabajo presenta la correlación entre el potencial de corrosión (E_{CORR}), la velocidad de corrosión (V_{CORR}) y la exposición ambiental, en búsqueda de una metodología para evaluar desempeño de mezclas cementicias utilizando el inicio de la corrosión (O_{CORR}) como indicador. Los resultados mostraron que el comportamiento de E_{CORR} responde a cambios ambientales, pero puede ser utilizado para establecer O_{CORR} bajo ciclos de exposición adecuados.

Palabras claves: Durabilidad, Corrosión en armaduras, Evaluación de desempeño.

Abstract

Concrete is a physical and chemical protect barrier for steel against corrosion. Due to

concrete pH (≈ 13), a deterioration inhibitor stable oxide film (passive layer) develops on embedded steel. When concrete is contaminated with aggressive environmental agents, the passive layer is damaged and corrosion begins. In well-placed and defect-free concrete, the time in which aggressive agents reach reinforcements, and initiate corrosion, will depend on mixture quality and environmental exposure conditions. This paper presents a correlation between corrosion potential (E_{CORR}), corrosion rate (V_{CORR}) and environmental exposure, in search of a cementitious mixtures performance evaluation methodology that use the onset of corrosion (O_{CORR}) as an indicator. Results showed that E_{CORR} behavior responds to environmental changes, but it can be used to establish O_{CORR} under appropriate exposure cycles.

Keywords: Durability, Reinforcement corrosion, Performance evaluation.

Introducción

La corrosión de armaduras es el principal mecanismo de degradación que afecta a las estructuras de hormigón armado. En el interior del hormigón el pH es alto (≈ 13), lo cual genera sobre la superficie del acero una capa de óxido estable, denominada capa pasiva (CP), que mantiene al acero sin degradación. Sin embargo, el ingreso y la concentración de agentes agresivos, como iones cloruros (Cl^-) y dióxido de carbono (CO_2), en la superficie de las armaduras eventualmente provoca la destrucción de la CP, de manera generalizada o localizada, iniciando la corrosión (Bertolini et al., 2013). De acuerdo con esto, el hormigón del recubrimiento actúa como una barrera química (produce y mantiene la CP) y física (atenúa el ingreso de agentes) evitando que el acero se corroa (Bentur et al., 1997). El modelo de vida útil más básico (Tuutti, 1982) divide la degradación por corrosión de elementos de hormigón armado en dos periodos: iniciación y propagación. Durante la iniciación los agentes agresivos ingresan desde la superficie, a través del recubrimiento, hasta alcanzar una concentración en la superficie de las armaduras que provoque la destrucción de la CP. Durante la iniciación el acero no sufre degradación. Una vez destruida la CP, y sin la capacidad de regenerarse, se inicia el proceso de corrosión. Consecuentemente, en el periodo de propagación, la armadura se degrada perdiendo sección resistente, adherencia con el hormigón y eventualmente dañando el recubrimiento. La velocidad de degradación durante el periodo de propagación dependerá de las condiciones ambientales de exposición (Bentur et al., 1997; Bertolini et al., 2013).

En estructuras expuestas a ambientes ricos en cloruros, el inicio de la corrosión (O_{CORR}) es un hito de suma importancia (Carmen Andrade et al., 2004; Troncónis de Rincón et al., 1998). La irregularidad y aleatoriedad de la degradación, manifiesta a través de corrosión localizada que generan pérdidas de sección en puntos localizados, genera una gran dificultad para gestionar la vida remanente (periodo de propagación) de elementos estructurales. En estos casos la calidad del hormigón y el espesor del recubrimiento son importantes para garantizar que el O_{CORR} no se presente antes de que la estructura cumpla con su vida de servicio.

Múltiples investigaciones (C. Andrade & Alonso, 1996; Cigna et al., 1993; Duffó et al., 2018; Mietz & Isecke, 1996), indagaron el alcance de la utilización de mediciones de potencial de corrosión (E_{CORR}) como indicador electroquímico del estado de degradación por corrosión en armaduras, llegando a la conclusión de que solo puede utilizarse este parámetro como un indicador de susceptibilidad. En la actualidad existe un acuerdo general de que no es posible

utilizar valores de E_{CORR} para cuantificar el avance de la corrosión en armaduras, siendo la medición de velocidad de corrosión (V_{CORR}) el único parámetro electroquímico preciso para este sentido (Gouda & Halaka, 1970). Sin embargo, se ha establecido que el monitoreo continuo de E_{CORR} tiene la capacidad de evidenciar cambios en procesos superficiales de la armadura debido a la acción de las condiciones ambientales de exposición (Duffó et al., 2018; Gouda & Halaka, 1970; Li & Sagüés, 2001). Bajo esta premisa, se ejecutaron múltiples programas experimentales en ambientes con cloruros (Alonso et al., 2002; Angst et al., 2017; Tang et al., 2018) que utilizaron el monitoreo de E_{CORR} para establecer el O_{CORR} y correlacionarlos con la concentración umbral de cloruros necesaria para activar el proceso de degradación. Si bien la correlación entre el comportamiento de E_{CORR} y el O_{CORR} resultó ser una herramienta útil, la gran variabilidad de resultados demostró que no se puede establecer un criterio unificado de valor umbral de concentración (Tang et al., 2018).

La obtención de V_{CORR} no es simple, requiere la ejecución de técnicas eléctricas complejas, debiéndose contar con equipamiento, laboratorios y personal especializado para la obtención y tratamiento de registros. Como contraparte, la medición de E_{CORR} resulta accesible, en términos de equipamiento y personal, debiéndose contar solo con un electrodo de referencia y un voltímetro de alta impedancia como herramientas particulares. En este contexto, se plantea la posibilidad de utilizar el monitoreo de E_{CORR} como herramienta de determinación del O_{CORR} , a fin de establecer una metodología aplicable en un laboratorio de obra y en tiempos aceptables. Trabajos experimentales desarrollados previamente (Duffó et al., 2018), sobre aceros embebidos en morteros expuestos a múltiples condiciones ambientales, indicaron la necesidad de contemplar la utilización de ambientes de exposición con concentraciones de cloruros superiores a las marinas (3% - m/m) y temperaturas por encima del promedio ambiental para poder registrar el O_{CORR} en tiempos menores a 90 días.

Este trabajo muestra la primera parte de un programa experimental que indaga la posibilidad de utilizar monitoreo de E_{CORR} para establecer la ocurrencia del O_{CORR} como base de una metodología que permita evaluar el desempeño de la protección contra la corrosión que las mezclas cementicias les proveen a las armaduras. En búsqueda de condiciones ambientales controladas aplicables a un ensayo reproducible, se analizó la correlación entre el E_{CORR} , la V_{CORR} y la exposición ambiental obtenida a partir del monitoreo ejecutado sobre de barras de acero al carbono embebidas en probetas expuestas a condiciones ambientales controladas. Los resultados obtenidos sentaron las bases para la ejecución de ensayos sobre probetas con características similares a elementos estructurales de escala industrial (segunda parte del programa experimental).

Metodología

Se fabricaron probetas prismáticas de 70x70x60 mm con cuatro barras lisas de acero al carbono (SAE 1040) embebidas en su interior manteniendo 10 mm de recubrimiento respecto a la superficie, tal como se muestra en la Figura 1. Las barras de acero utilizadas fueron de 6 mm de diámetro y en todos los casos el área de contacto con las mezclas cementicias fue delimitada ($A = 6,6 \text{ cm}^2$) utilizando pintura epoxi. Cada barra de acero fue conectada mediante soldadura de estaño a un cable unipolar multifilamento (1 mm de diámetro y 500 mm de longitud) instrumentado con una ficha tipo banana de 4 mm en el extremo opuesto para poder ser conectada al equipo de monitoreo utilizado. Para proteger la soldadura entre barras y cables, se ejecutó un cabezal de resina epoxi que embebió e inmovilizó las

conexiones.

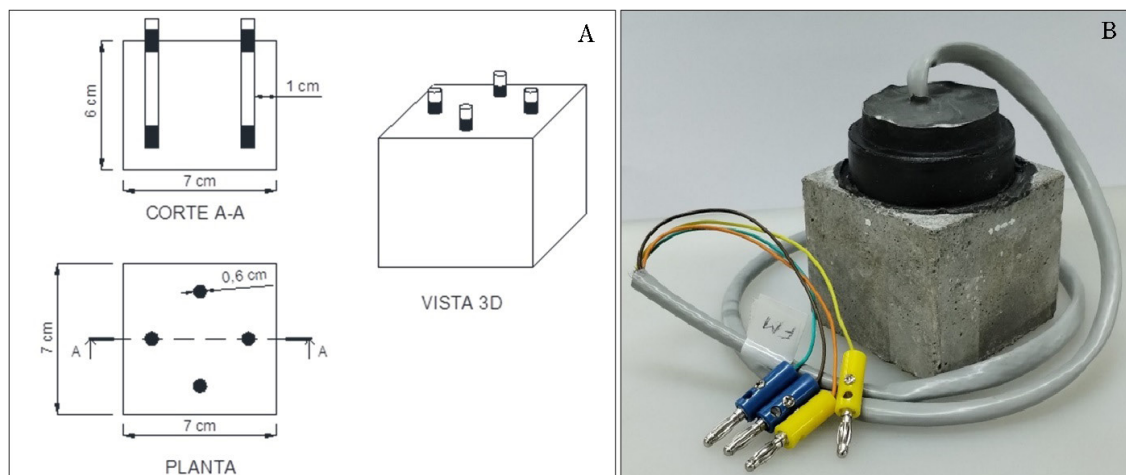


Figura 1 – Probetas prismáticas fabricadas. A – Diseño de probeta. B – Foto de probeta con conexión.

Se fabricó un lote de 3 probetas de mortero (M) y un lote de 3 probetas de pasta (P). Para ambas mezclas, la relación agua-cemento (a/c) fue de 0,4 y la relación arena cemento (s/c) de 2 en el caso de los morteros. Los materiales componentes utilizados fueron cemento CPN50, arena silícea de origen fluvial no reactiva y agua de red domiciliaria. El mezclado se ejecutó utilizando los equipos y lineamientos establecidos por norma internacional (ASTM, 2020). Para evitar la fisuración por contracción de las mezclas, todas las probetas fueron coladas, desmoladas, encabezadas y posteriormente curadas durante 28 días dentro de una cámara húmeda (98% HR). Finalizado el curado, todas las probetas fueron inmersas en una solución de cloruro de sodio (NaCl), con concentración de 10% (m/m) de cloruros y $40 \pm 1^\circ\text{C}$, hasta registrar en todas las barras de acero valores estables de E_{CORR} que indiquen alta probabilidad de corrosión. Finalmente, posterior a la contaminación por inmersión, todas las probetas se dejaron secar al aire bajo humedad de laboratorio ($\text{HR}_{\text{media}}: 70 \pm 5\%$).

Para monitorear el avance de la corrosión de manera precisa se realizó la medición de velocidad de corrosión sobre todas las barras y probetas en diferentes instancias: previo a la inmersión (Edad: 30 días), cada 10 días durante la inmersión, al finalizar la inmersión y luego de 7, 15, 30 y 90 días de secado en ambiente de laboratorio. Además de los registros de E_{CORR} obtenidos durante la medición de V_{CORR} , se monitoreó el potencial de corrosión de cada barra con una frecuencia de 24 horas durante la inmersión.

Para garantizar la estabilidad de concentración y temperatura de la solución de NaCl, se fabricó una cámara de exposición, aislada térmica e hidráulicamente, con una serpentina polimérica interna de intercambio de calor por la que circuló agua a 55°C impulsada por un baño termostático externo (Figura 2). Acoplada a la cámara de exposición se utilizó un equipo recolector de datos de 12 canales (resolución: 0,001V / precisión: $\pm 0,010\text{V}$), para monitorear E_{CORR} sobre cada barra de acero y la temperatura en la solución de exposición cada 24 horas.



Figura 2 – Sistema de exposición y monitoreo.

Para medir las polarizaciones inducidas (ΔE) que permitan para calcular V_{CORR} , se utilizaron un electrodo de referencia de calomel saturado (ECS) y un potenciostato/galvanostato GAMRY REFERENCE 600. Previo, durante y finalizada la inmersión, se midieron polarizaciones ΔE sobre cada una de las barras de acero utilizando la técnica del “pulso galvanostático”, en donde una corriente continua estable de $1\mu A$ se impone sobre una barra de acero y se registra, en contraste con el electrodo de referencia, el cambio de potencial que la barra sufre en consecuencia durante 60 segundos. La figura 3 esquematiza muestra la configuración de conexión para la ejecución de un pulso galvanostático y un ejemplo del diagrama de polarización típico obtenido durante la aplicación de la corriente.

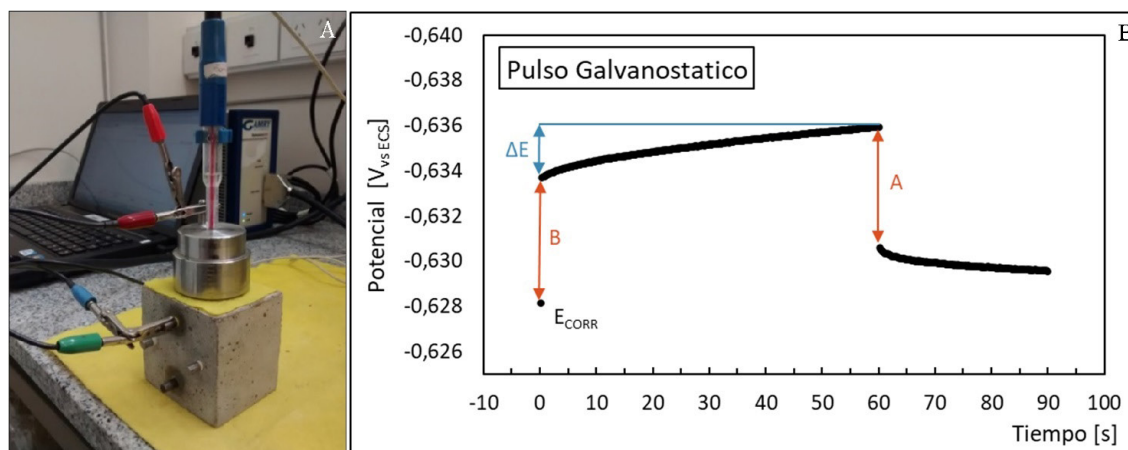


Figura 3 – Medición de velocidad de corrosión. A – Configuración de conexión. B - Registro resultante.

Utilizando el valor de ΔE medido, es posible calcular la resistencia a la polarización (RP) de la barra (Sathiyarayanan et al., 2006) de acuerdo con:

$$R_p \left[\Omega \cdot cm^2 \right] = \frac{\Delta E}{I_{AP}} * S \quad (1)$$

donde “ ΔE ”, expresada en V, es la polarización mediada a partir de la aplicación del pulso galvanostático; “ I_{AP} ”, expresada en A, es la corriente aplicada durante el pulso; y “ S ”, expresada en cm^2 , es la superficie expuesta de la barra en contacto con la mezcla cementicia. A partir del valor de R_p , puede calcularse la densidad de corriente de corrosión (i_{CORR}) mediante la ecuación de Stern & Geary (C. Andrade & Alonso, 1996; Carmen Andrade et al., 2004):

$$i_{CORR} \left[A / cm^2 \right] = \frac{R_p}{B} \quad (2)$$

donde “ B ”, expresada en V, es la constante que vale 0,052 cuando el acero está pasivo (sin corrosión) o 0,026 cuando el acero se está corroyendo. A partir de i_{CORR} puede calcularse la velocidad de corrosión (V_{CORR}) de acuerdo con la siguiente expresión (Carmen Andrade et al., 2004):

$$V_{CORR} \left[\mu m / año \right] = 11,6 * i_{CORR} \left[\mu A / cm^2 \right] \quad (3)$$

Calculado de esta manera, el valor de V_{CORR} indica la pérdida de sección de la barra en el momento de la medición, asumiendo un ataque homogéneo sobre su superficie expuesta. Debido a que la corrosión por cloruros puede inducir una morfología de ataque heterogénea en forma de picaduras, éste valor de V_{CORR} no puede ser utilizado como indicador de pérdida de sección localizada. En este trabajo el valor de V_{CORR} calculado de esta manera se utiliza como indicador preciso del O_{CORR} y no como base para el cálculo de pérdida de sección.

Resultados

Para identificar los registros de cada una de las barras monitoreadas se utilizó un código con formato “X – Y – Z”, donde “X” indica el tipo de mezcla (P/M), “Y” indica el número de la probeta (01/02/03) y “Z” identifica posición de la barra en la probeta (A/B/C/D). Siguiendo esta codificación, la Figura 3 muestra el monitoreo completo de E_{CORR} y V_{CORR} sobre barras embebidas en probetas de mortero. De manera similar, la Figura 4 muestra el monitoreo completo de E_{CORR} y V_{CORR} sobre barras embebidas en probetas de pasta. En ambas figuras se indican criterios de clasificación en función a límites planteados por la bibliografía de referencia (Troncónis de Rincón et al., 1998) y el periodo de inmersión. El tiempo “0” indica la fabricación de la probeta.

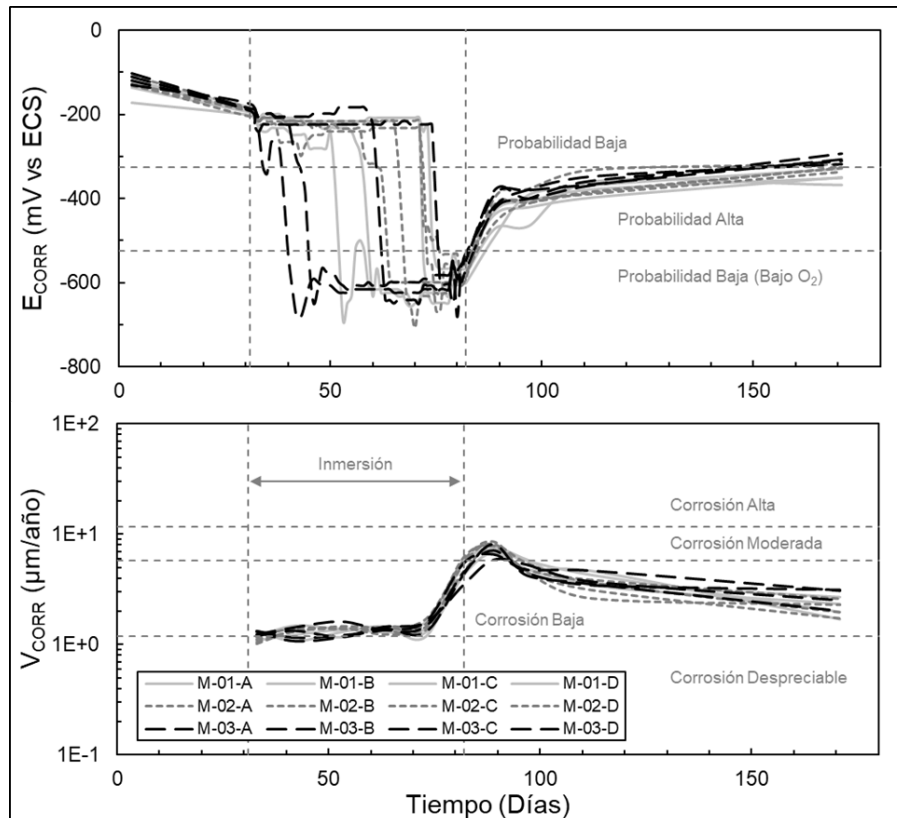


Figura 3 – Monitoreo de E_{CORR} y V_{CORR} sobre barras embebidas en probetas de Mortero.

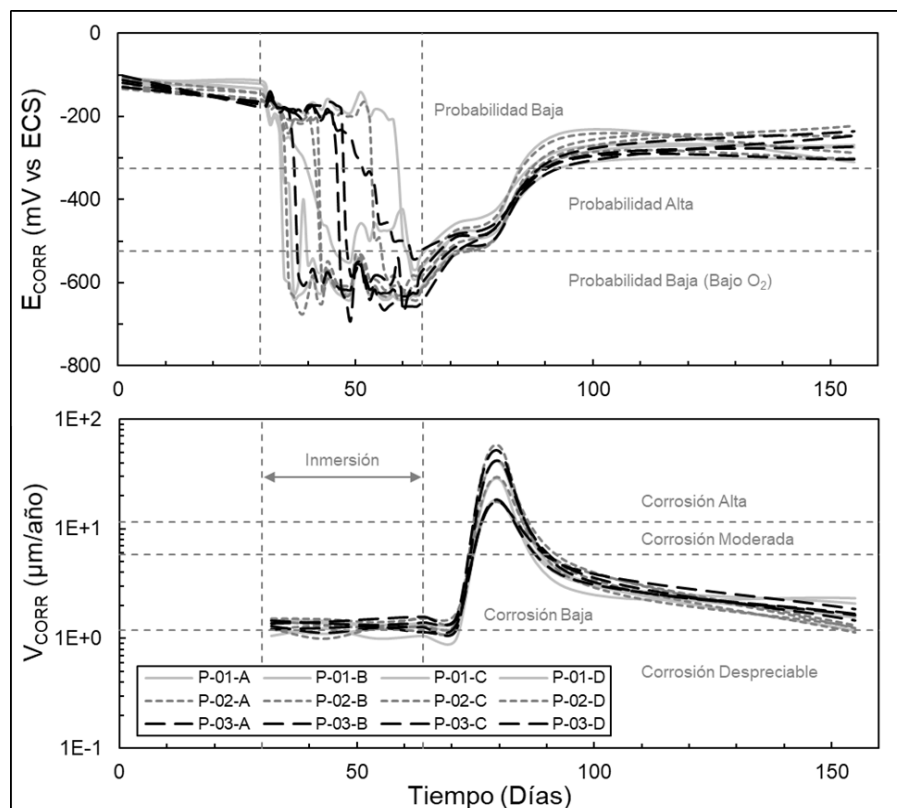


Figura 4 – Monitoreo de E_{CORR} y V_{CORR} sobre barras embebidas en probetas de Pasta.

De acuerdo con la bibliografía (Troncónis de Rincón et al., 1998), valores de potenciales inferiores a -400 milivoltios (mV) respecto al electrodo cobre-sulfato de cobre (ESC) (-325 mV vs ECS), son potenciales indicadores de alta probabilidad de que la corrosión se desarrolle. En los monitoreos de potencial realizados se puede notar que luego de un tiempo de inmersión en la solución de NaCl, todas las barras evidenciaron caídas de E_{CORR} , desde valores de “probabilidad baja” de corrosión, sin que pueda notarse un patrón específico para cada mezcla utilizada. Todas las barras embebidas en probetas de pasta se estabilizaron en valores de E_{CORR} que indican probabilidad baja de corrosión debido a la baja disponibilidad de oxígeno en menos de 35 días de exposición, mientras que para las barras embebidas en mortero se requirieron al menos 50 días de exposición. En ambos casos, finalizada la inmersión, los potenciales de las barras saltaron a rangos de “probabilidad alta” de corrosión para luego ir aumentando gradualmente a medida que las mezclas cementicias se secan.

En relación a los registros de V_{CORR} , aceros embebidos en probetas de pasta registraron un salto de valores de “corrosión despreciable” a “corrosión alta”, alcanzando un pico de valores, luego de finalizada la inmersión y con aproximadamente 15 días de secado; mientras que aceros embebidos en probetas de mortero evidenciaron un salto de valores de “corrosión despreciable” a “corrosión baja” en la etapa final de la inmersión (medición a 50 días de inmersión) seguido de un pico en valores de “corrosión moderada” luego de 7 días de secado. En ambos casos los valores cayeron gradualmente luego del pico estabilizándose en el rango de “corrosión baja” luego de 90 días de secado. En ambas mezclas los picos de V_{CORR} se alcanzaron cuando los potenciales de las barras se ubicaron en rangos de probabilidad alta de corrosión luego de la salida de la inmersión.

Como dato particular de interés, el pico V_{CORR} registrado en probetas de pasta (15 días de secado, posterior a la inmersión) coincide con la detección de fisuras en posición concordante con la ubicación de las barras de acero. Estas fisuras son asociadas a la elevada contracción por secado que este tipo de mezcla sufre. La figura 5 muestra los patrones de fisuración detectados.



Figura 5 – Patrón de fisuración detectado en probetas de pasta.

La figura 6 muestra la evolución de los valores promedios de E_{CORR} y V_{CORR} para cada probeta monitoreada. Como tendencia general se puede notar que en las probetas fabricadas con pasta la caída inicial de potencial se da en tiempos de exposición menores en relación a las probetas fabricadas con mortero. Esto era esperable y se asoció con los cambios en las propiedades de transporte que la incorporación de agregados inertes genera a las mezclas cementicias, haciendo más tortuoso el camino que la humedad y los agentes agresivos deber recorrer (conminación y secado más lento) (Basheer et al., 2005). Respecto a V_{CORR} , también se observa una diferencia marcada entre los valores pico alcanzados para cada tipo de mezcla. En este sentido es importante notar que, en probetas de mortero, el aumento de V_{CORR} se detectó mientras aún estaban bajo inmersión, aunque el pico se alcanzó luego de unos días de secado; a diferencia de las probetas de pasta en donde el aumento y pico de V_{CORR} se registró luego de unos días de secado y con la aparición de fisuras. Para ambas mezclas los picos de V_{CORR} coinciden con el salto de potencial a valores de alta probabilidad de corrosión debido al secado inicial posterior a la inmersión. Finalmente, luego de los picos, la velocidad de corrosión se atenúa, y los potenciales suben, gradualmente a medida que ambas mezclas cementicias pierden humedad, siendo este fenómeno más significativo en las probetas de pasta.

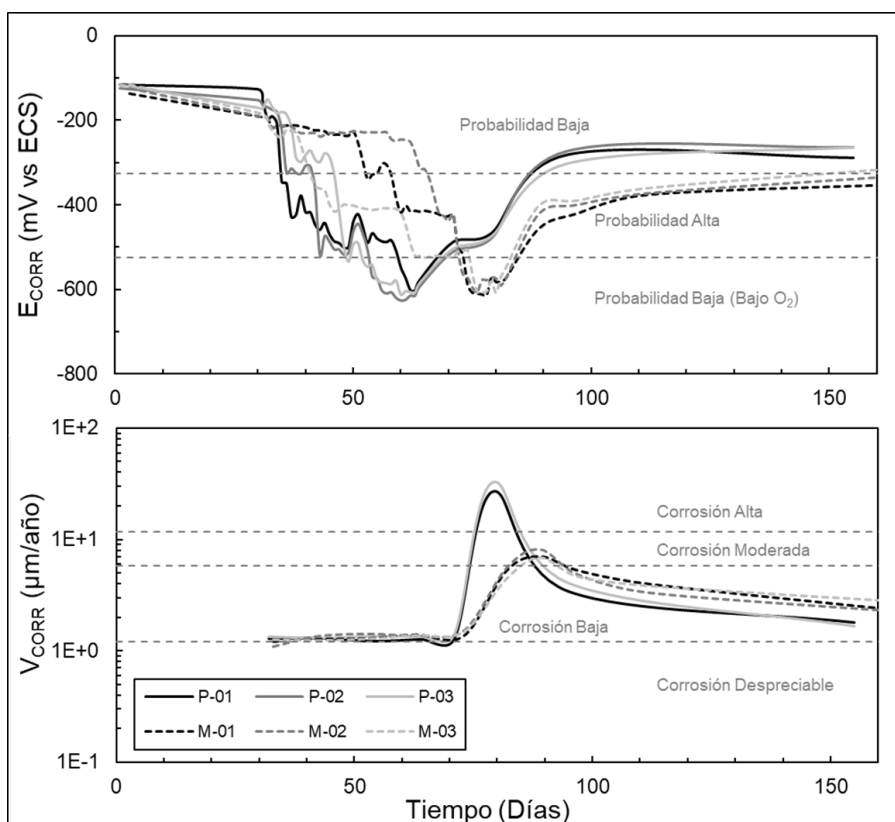


Figura 6 - Valores promedios de E_{CORR} y V_{CORR} para cada probeta monitoreada.

Discusión

Al contrastar los valores de E_{CORR} y V_{CORR} durante los periodos de inmersión se puede confirmar que las caídas de potencial registradas sobre cada barra monitoreada no son un indicador directo del O_{CORR} . Mientras que los tiempos de caída de potencial muestra una gran variabilidad, los aumentos de la velocidad de corrosión se producen de manera simultánea y consistente en todas las barras monitoreadas, sin observarse una relación entre los tiempos de ocurrencia.

Si se centra el análisis en el comportamiento de los registros de E_{CORR} , al observar que no existe una correlación directa entre el tiempo de caídas de potencial y de aumentos de la velocidad de corrosión, es factible asumir que las variaciones abruptas iniciales de potencial registradas están más asociadas a cambios drásticos de las condiciones ambientales (humedad/concentración de Cl-/disponibilidad de oxígeno) en la superficie de las barras monitoreadas, que al O_{CORR} como tal. En concordancia con esto, al finalizar las inmersiones, los valores de potencial evidencian un aumento de potencial en respuesta con el cambio de humedad: inicialmente abrupto y luego gradual a medida que las mezclas cementicias pierde humedad.

Por otro lado, al enfocar el análisis en los registros de V_{CORR} , se puede notar que el O_{CORR} (aumento de V_{CORR}) se registra cuando la relación entre el grado de contaminación con cloruros y las condiciones de humedad son propicias. Mientras que, en probetas de mortero, el grado de contaminación con cloruros fue suficiente como para iniciar el proceso de corrosión bajo inmersión luego de 50 días; en probetas de pasta (luego de 30 días de inmersión) fue necesario que la estructura de poros pierda humedad y/o la pieza se fisure para iniciar el proceso. En ambos casos, luego del O_{CORR} los picos de V_{CORR} se evidenciaron cuando la matriz cementicia perdió humedad, respecto al estado de saturación que tenía bajo inmersión. Finalmente, es importante notar que en todos los casos el O_{CORR} se registra luego de que los potenciales de las barras se estabilizan en valores de potenciales menores a -325 mV vs ECS, en respuesta a la condición de humedad de exposición (en inmersión o posterior a ella).

Durante la inmersión, a medida que pasa el tiempo, la concentración de cloruros en la solución de poros en contacto con el acero aumenta. El incremento de la salinidad y la temperatura reduce la cantidad de oxígeno disuelta alterando la capa pasiva formada e induciendo la caída del potencial de la barra a valores menores a -525mV vs ECS (Carmen Andrade, 2019). Bajo estas condiciones, el umbral de concentración de cloruros necesario para que se inicie la corrosión es mayor que el presente en la superficie de la barras (Izquierdo et al., 2004). Finalizada la inmersión, la mezcla cementicia pierde humedad mejorando el acceso del oxígeno hacia la solución de poros, cuya solubilidad es mayor al bajar la temperatura. El aumento de concentración del oxígeno en la superficie de la barra se evidencia por el aumento de su potencial de corrosión y, bajo estas condiciones, la concentración de cloruros necesaria para iniciar el proceso de corrosión es menor (Izquierdo et al., 2004) en relación a la requerida a altas temperaturas y en condición de inmersión. En este contexto, si la concentración de cloruros en la superficie de la barra es suficiente, el proceso de corrosión se iniciará y se mantendrá mientras haya humedad suficiente que lo sustente.

En la búsqueda de una metodología de ensayo que permita evaluar el desempeño de una mezcla como protección de la barra de acero, se remarca que, bajo las condiciones ambientales controladas utilizadas en este trabajo, para contaminar las probetas (solución con 10%Cl- a 40°C), se lograron niveles de contaminación suficientes como para iniciar el proceso de corrosión inclusive bajo inmersión (a 50 días con recubrimiento de 1 cm de mortero).

Sin embargo, los resultados mostraron la posibilidad de contemplar un ciclo de exposición controlada en donde una inmersión de contaminación sea continuada por un proceso de secado que evidencie, en los registros de E_{CORR} , la ocurrencia de O_{CORR} .

A partir del análisis de los resultados obtenidos se plantea la necesidad de ejecutar ensayos sobre probetas elaboradas con múltiples tipos de mezclas (contemplando hormigón), y espesores de recubrimiento en el orden de los utilizados en estructuras reales (>2 cm), para obtener registros de monitoreo de E_{CORR} y V_{CORR} que permitan definir una metodología prototipo de ensayo. Las bases a tener en cuenta para el desarrollo de estos ensayos son:

- Bajo inmersión, las caídas abruptas en los valores de potencial son indicadores de cambios en las condiciones ambientales de la superficie de la barra y no pueden ser utilizados como indicadores directos del O_{CORR} . Puede evaluarse la posibilidad de ser utilizados como indicadores de contaminación.
- Al finalizar la inmersión, e iniciar el secado, el aumento abrupto de potencial asociado a la pérdida de humedad y aumento de temperatura podría brindar información sobre el O_{CORR} . El rango de valores al cual se estabiliza puede ser evaluado como indicador.
- La concentración umbral de cloruros necesaria para la corrosión se inicie depende de las condiciones de humedad y disponibilidad de oxígeno en la superficie de la barra, siendo la condición de saturación con temperatura (bajo inmersión) una condición que requiere un elevado grado de contaminación. Utilizando un ciclo de inmersión y secado es posible registrar el O_{CORR} durante la pérdida de humedad y enfriamiento en tiempos de ensayos aceptables si la contaminación fue suficiente. Mezclas con alto grado de protección pueden que no dejen que el nivel de contaminación avance lo suficiente y el proceso no se inicie, debiendo contemplarse la necesidad de intensificar la agresividad la solución de inmersión o aumentar la cantidad de ciclos de inmersión y secado.
- Al utilizar mezclas de hormigón, y recubrimientos en escala industrial, puede ser necesario intensificar la agresividad de la inmersión. Esto se puede lograr aumentando la temperatura o la concentración de la solución de inmersión.

Conclusiones

Se llevaron a cabo los primeros ensayos en búsqueda del desarrollo y la aplicación de una metodología, basada en el monitoreo de E_{CORR} , que permita evaluar el desempeño de mezclas cementicias utilizando el O_{CORR} como indicador. Se analizaron los resultados obtenidos del monitoreo de E_{CORR} y V_{CORR} sobre aceros embebidos en probetas de pasta y mortero expuestas a una solución rica en cloruros, y se concluye que:

1. Bajo inmersión, las caídas abruptas de potencial responden a cambios en las condiciones ambientales de la superficie de la barra y no pueden ser utilizados como indicadores directos del O_{CORR} .
2. Las condiciones ambientales de contaminación utilizadas (solución con 10% de Cl- a 40°C) permiten lograr el inicio del proceso de corrosión bajo inmersión (con baja disponibilidad de oxígeno) en barras de acero recubiertas por 1 cm de mezclas de buena calidad, en plazos aceptables (2 meses).

3. Posterior a la inmersión, durante el inicio del secado, el comportamiento del potencial responde al enfriamiento y la pérdida de humedad, siendo el rango de valores en el cual se estabiliza de interés para evaluar el inicio y desarrollo de la corrosión.
4. Ciclos de inmersión (contaminación) y secado (susceptibilidad) pueden inducir el O_{CORR} en tiempos de ensayo aceptables para sistemas acero-hormigón con recubrimientos en escala industrial.

Agradecimientos

El autor agradece al apoyo financiero de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias de la Pontificia Universidad Católica Argentina (FICA-UCA), a través del proyecto “ALT-4320: Vulnerabilidad de elementos de Hormigón armado a la corrosión”; al apoyo tecnológico recibido del Departamento de Corrosión de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA); y a los Doctores Gustavo S. Duffo y Silvia B. Farina por la revisión conceptual de este trabajo.

Referencias

- Alonso, C., Castellote, M., & Andrade, C. (2002). Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. *Electrochimica Acta*, 47(21), 3469–3481. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00283-9](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00283-9)
- Andrade, C., & Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10(5), 315–328. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00044-5](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00044-5)
- Andrade, Carmen. (2019). Propagation of reinforcement corrosion: principles, testing and modelling. *Materials and Structures*, 52(2), 2–26. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1301-1>
- Andrade, Carmen, Alonso, C., Gulikers, J., Polder, R., Cigna, R., Vennesland, ... Elsener, B. (2004). Recommendations of RILEM TC-154-EMC: “Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion” Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. *Materials and Structures*, 37(273), 623–643. <https://doi.org/10.1617/13952>
- Angst, U. M., Boschmann, C., Wagner, M., & Elsener, B. (2017). Experimental Protocol to Determine the Chloride Threshold Value for Corrosion in Samples Taken from Reinforced Concrete Structures. *Journal of Visualized Experiments*, (126). <https://doi.org/10.3791/56229-v>
- ASTM. (2020, July 15). Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *ASTM International*. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- Basheer, L., Basheer, P. A. M., & Long, A. E. (2005). Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 19(9), 682–690. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.022>
- Bentur, A., Diamond, S., & Berke, N. S. (1997). *Steel corrosion in concrete: fundamentals and civil engineering practice*. London, UK: E & FN Spon.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair* (2nd ed.). Weinheim, Germany: WILEY-VCH.
- Cigna, R., Proverbio, E., & Rocchini, G. (1993). A study of reinforcement behaviour in concrete structures using electrochemical techniques. *Corrosion Science*, 35(5–8), 1579–1584. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(93\)90387-V](https://doi.org/10.1016/0010-938X(93)90387-V)
- Duffó, G. S., Gomez, E. D., & Vazquez, D. R. (2018). Revisiting the Effect of the Corrosion Potential, the Matrix Resistivity and the Oxygen Availability on the Corrosion Rate of Steel Bars Embedded in Mortar. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(9), 221–232.
- Gouda, V. K., & Halaka, W. Y. (1970). Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel II. Embedded in concrete. *British Corrosion Journal*, 5(5), 204–208. <https://doi.org/10.1179/000705970798324478>
- Izquierdo, D., Alonso, C., Andrade, C., & Castellote, M. (2004). Potentiostatic determination of chloride threshold values for rebar depassivation. *Electrochimica Acta*, 49(17–18), 2731–2739. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.034>

- Li, L., & Sagüés, A. A. (2001). Chloride Corrosion Threshold of Reinforcing Steel in Alkaline Solutions—Open-Circuit Immersion Tests. *Corrosion*, 57(1), 19–28. <https://doi.org/10.5006/1.3290325>
- Mietz, J., & Isecke, B. (1996). Monitoring of concrete structures with respect to rebar corrosion. *Construction and Building Materials*, 10(5), 367–373. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00016-X](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00016-X)
- Sathiyanarayanan, S., Natarajan, P., Saravanan, K., Srinivasan, S., & Venkatachari, G. (2006). Corrosion monitoring of steel in concrete by galvanostatic pulse technique. *Cement and Concrete Composites*, 28(7), 630–637. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.03.005>
- Tang, L., Frederiksen, J. M., Angst, U. M., Polder, R., Alonso, M. C., Elsener, B., ... Pacheco, J. (2018). Experiences from RILEM TC 235-CTC in recommending a test method for chloride threshold values in concrete. *RILEM Technical Letters*, 3, 25–31. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.55>
- Troncónis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, C., Helene, P., & Diaz, I. (1998). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Red DURAR - Programa CYTED.
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Royal Institute of Technology. Retrieved from <https://portal.research.lu.se/en/publications/corrosion-of-steel-in-concrete>

Contribución de los Autores

	Colaboración Académica													
Nombres y Apellidos del autor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Enzo David Gomez	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

1-Administración del proyecto, 2-Adquisición de fondos, 3-Análisis formal, 4-Conceptualización, 5-Curaduría de datos, 6-Escritura - revisión y edición, 7-Investigación, 8-Metodología, 9-Recursos, 10-Redacción - borrador original, 11-Software, 12-Supervisión, 13-Validación, 14-Visualización.