



Aplicación de ensayos no destructivos en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión

Maximiliano D. Segovia*, María F. Carrasco, Romeo E. Miretti, Néstor Ulibarrie,
Carlos Defagot, Raúl Puga
Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI)
Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe
Santa Fe, 3000, Argentina
Tel: 54 342 4697728
Fax: 54 342 4690348
e-mail: msegovia@frsf.utn.edu.ar

Resumen

La corrosión de las armaduras del hormigón se ha convertido en el principal problema económico de las construcciones civiles, poniendo en duda la efectividad de las herramientas de diseño que se han venido utilizando y provocando que muchas estructuras diseñadas para una vida útil de 50 a 100 años presenten graves patologías luego de 10 a 30 años en servicio.

Estos procesos de deterioro pueden dividirse en dos etapas bien diferenciadas: la “de iniciación” durante la cual la velocidad de deterioro es lenta y b) “de propagación” durante la cual los procesos se aceleran sensiblemente y la capacidad portante de la estructura se reduce drásticamente.

Para determinar el grado de afectación de las estructuras de hormigón armado por procesos de corrosión, se aplican actualmente ensayos no destructivos como la medición de potenciales electroquímicos de corrosión, de la resistividad eléctrica del hormigón y de la velocidad de corrosión de las armaduras.

Los resultados obtenidos mediante estas técnicas, analizados conjuntamente con características del hormigón tales como la presencia de cloruros, avance de la carbonatación del hormigón o el contenido de humedad, permiten establecer un nivel de riesgo o de afectación de las estructuras por comparación con criterios aceptados internacionalmente. No obstante, estas evaluaciones representan solo una condición instantánea del proceso de corrosión y deben repetirse en el tiempo a fin de lograr resultados representativos y confiables.

Resulta, entonces, importante considerar la variabilidad de los parámetros medidos para valorar en qué medida contribuyen a la incertidumbre de la evaluaciones estructurales en las cuales se emplean. La necesidad de un resultado confiable resulta significativa cuando se diagnostica que el proceso se encuentra aún en su etapa de iniciación y, por lo tanto, no se establecen requerimientos de evaluaciones a corto plazo.

Se presentan en este trabajo mediciones realizadas sobre probetas de hormigón que contienen barras con diferentes espesores de recubrimiento y de contenido de cloruros y que se exponen a la intemperie a fin de reproducir las condiciones de estructuras reales. En función de los resultados obtenidos en las mediciones, se realizan comparaciones con resultados obtenidos en estructuras en servicio.

1. Introducción

Puede plantearse como definición general que la corrosión es el deterioro de un material o de alguna de sus propiedades causado por la reacción con el medio que lo rodea. Esta definición permite incluir a todos los materiales, cualquiera sea el mecanismo de degradación que los afecte. En el hormigón armado el proceso de corrosión de las barras de acero del hormigón se genera por la formación de celdas electroquímicas en las cuales el metal que se está corroyendo funciona como un electrodo mixto sobre el cual tienen lugar reacciones catódicas y anódicas ⁽¹⁻²⁾.

La presencia de hormigón en torno a las barras de las armaduras, cumple la función de generar un medio envolvente protector sobre las mismas favoreciendo la estabilidad de una capa de óxido protectora (capa pasiva). Sin embargo, esta capacidad protectora disminuye paulatinamente debido a la carbonatación del hormigón que produciendo una reducción del pH de este medio, llevándolo de 12,5 (valor que define un medio fuertemente alcalino) a valores inferiores a 9. La carbonatación es un proceso progresivo que avanza desde la superficie expuesta del hormigón hacia el interior, a una velocidad que es tanto menor cuanto mejor sea la calidad del hormigón de recubrimiento (evaluada desde el punto de vista de su permeabilidad al aire y de la reserva alcalina que posea) ^(1,3-6).

Los problemas de corrosión de barras de acero que conforman las armaduras de los elementos estructurales se manifiestan a través de fisuras en el hormigón de recubrimiento orientadas según la dirección de las barras más superficiales, debido a las tensiones de tracción en el hormigón de recubrimiento originadas por formación de productos de corrosión que tienen un volumen varias veces superior al del metal original ^(1,7). En los casos más severos se producen desprendimientos de este hormigón que dejan como resultado las armaduras expuestas ^(1, 3-5, 7).

Asimismo, desde el punto de vista de la respuesta mecánica, la presencia de corrosión en las armaduras de una estructura tiene consecuencias perjudiciales que se pueden englobar en tres aspectos principales. Por un lado el deterioro por corrosión metálica trae aparejado la reducción progresiva de la sección efectiva de las barras de la armadura, en un proceso que puede, según su severidad, conducir a la pérdida completa de la misma ⁽⁷⁻⁸⁾. Por otra parte, la formación herrumbre en la superficie de las barras genera fisuras crecientes en el hormigón de recubrimiento que termina desprendiéndose, y por consiguiente originando reducciones, también, en la sección bruta de hormigón ^(1, 7-8). Por último, la transferencia de esfuerzos entre el hormigón y el acero se ve afectada debido a la debilidad mecánica de los productos de corrosión que se forman en la interfase ^(1, 3-5, 7-8). Estos aspectos originan alteraciones en la estructura en relación a su condición original, que se manifiestan en una pérdida de la capacidad portante y, consecuentemente, una reducción de los márgenes de seguridad, con todos los riesgos que ello implica (aumento de deformaciones, plastificación, salida de servicio, colapso virtual, etc.) ^(1, 7).

El modelo teórico que esquematiza el proceso de corrosión de las armaduras, incluye dos períodos bien diferenciados (Figura 1). El período de iniciación, que corresponde al tiempo que tarda la carbonatación en llegar hasta la armadura y despasivarla y el período de propagación, que es el tiempo durante el cual la armadura se corroe hasta

llegar a un deterioro inaceptable para la seguridad, funcionalidad o estética de la estructura ^(1, 9-10).

En la ingeniería civil, la evaluación de estructuras con diferentes patologías, que hayan sufrido algún siniestro o sean objeto de un cambio de destino o uso, es una situación que se presenta con una significativa frecuencia. En estos casos, las ventajas de los ensayos no destructivos radican en su relativa simplicidad, rapidez y en la posibilidad de realizar un gran número de determinaciones sobre la estructura. De esta manera es factible evaluar la homogeneidad de la misma sin comprometer su integridad, pero como contrapartida presentan el inconveniente de la compleja interpretación de sus resultados, habida cuenta de las distintas variables que los afectan sobre todo cuando se hacen determinaciones sobre estructuras concretas y no a nivel de laboratorio. Esto es permanentemente constatado por trabajos de especialistas tanto extranjeros como nacionales ⁽¹¹⁻¹³⁾.

En lo que respecta a la evaluación por medio de técnicas no destructivas de parámetros relacionados con la corrosión, es posible utilizar equipos tales como el GECOR_6 que basa su funcionamiento en la técnica de resistencia de polarización con señal confinada. Resumidamente, el procedimiento consiste en la aplicación sobre la superficie del hormigón de un sensor plano anular que censa los potenciales eléctricos y determina la densidad de corriente de corrosión, a la vez que impone una señal eléctrica confinada a una o más barras de armaduras que se encuentran por debajo de la superficie del hormigón (Figura 2). Una unidad de procesamiento de datos se encuentra conectada al sensor y a las armaduras en estudio ⁽¹⁴⁻¹⁸⁾.

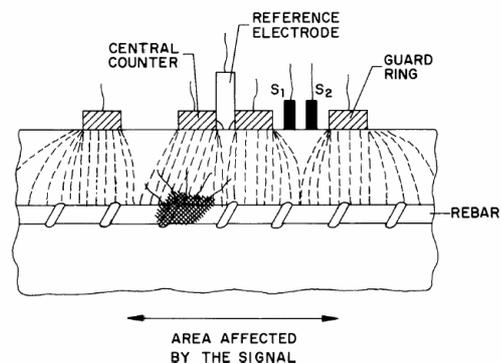
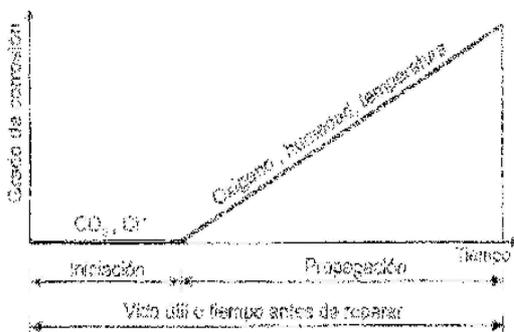


Figura. 1: Modelo de vida útil de Tuutti⁽¹⁾ Figura. 1: Aplicación del sensor del equipo Gecor -6⁽¹⁹⁾

Para el análisis de los resultados obtenidos en estas mediciones, se utilizan como herramienta los criterios de evaluación por potencial e intensidad de corrosión, extraídos del manual DURAR de la red CYTED⁽⁸⁾ y otros manuales que abordan la temática⁽¹⁹⁾.

Si bien los potenciales de corrosión en sí mismos no constituyen una medida de la eventual corrosión existente, hay criterios aproximados para valorar el riesgo de daño asociado con distintos niveles de potencial (Tabla 1). El mapeo de potenciales resulta una herramienta útil para las evaluaciones in-situ del estado de corrosión de las armaduras, permitiendo identificar zonas (macro-celdas) y su situación particular⁽²⁰⁾.

Los valores de corrientes de corrosión, por su parte, pueden asociarse a través de la ley de Faraday, con una velocidad de "consumo" del acero de las armaduras que pasa de su estado metálico a un estado oxidado y, por lo tanto, con una correspondiente "penetración" de la corrosión a partir de la superficie de las barras de armadura. Una escala de valoración es la que se muestra en la Tabla 2^(8, 14, 18).

Asimismo, es importante tomar en consideración que al evaluar estructuras en servicio, éstas presentan espesores variables de recubrimiento de las armaduras. De acuerdo a la reglamentación vigente en nuestro país ⁽²¹⁾, el espesor mínimo de recubrimiento de las armaduras dependerá de las condiciones ambientales en que se encuentre la estructura, del tipo de elemento y del nivel resistente del hormigón utilizado, variando entre 10 y 40 mm. Por otra parte, la nueva reglamentación ⁽²²⁾ que se encuentra actualmente en proceso de aprobación, especifica valores variables entre 15 y 75 mm.

En estas estructuras, resulta importante poder efectuar comparaciones entre valores de intensidad de corriente de corrosión y de potenciales de corrosión obtenidos en diferentes tiempos, a fin de analizar la evolución del proceso corrosivo ⁽¹⁹⁾. Para ello, es imprescindible conocer la variabilidad que afecta a las lecturas realizadas en cada caso.

Esta variabilidad está representada por la repetibilidad que puede definirse como la proximidad existente entre los resultados de sucesivas mediciones llevadas a cabo bajo las mismas condiciones de ensayo. Estas condiciones de ensayo se denominan condiciones de repetibilidad e incluyen el mismo procedimiento de medición, el mismo operador, el mismo instrumento de medición, la mismas condiciones ambientales y la repetición durante un período corto de tiempo ⁽²³⁾. Otros autores ⁽²⁴⁾ la definen como el valor por debajo del cual está situado, con una probabilidad del 95 % el valor absoluto de la diferencia entre dos resultados individuales obtenidos en un corto período de tiempo por el mismo operador y el mismo instrumental, utilizando un mismo método de ensayo normalizado sobre un producto idéntico.

No obstante, en la bibliografía científico-técnica o técnica-comercial, no se han detectado datos específicos referidos a la variabilidad que afecta los resultados de las mediciones ni a la influencia del espesor de recubrimiento, a excepción de alguna referencia aislada al respecto ⁽²⁰⁾. Consecuentemente, a fin de mejorar la calidad de las evaluaciones estructurales realizadas, se encararon experiencias consistentes en la repetición de lecturas sobre puntos establecidos en probetas de hormigón que contenían barras con diferentes espesores de recubrimiento, determinando los valores de corriente de corrosión y potencial de corrosión, intentando reproducir las condiciones de elementos estructurales reales.

2. Métodos

2.1 Mediciones en laboratorio

En la presente investigación se utilizaron probetas elaboradas en el marco del proyecto “Influencia de la acción del medio ambiente en la durabilidad del concreto (DURACON) de la Red CYTED. Estas probetas consisten en prismas de 150 x 150 x 300 mm, conteniendo 6 barras de 10 mm de diámetro con espesores de recubrimiento variables entre 15 y 30 mm, denominadas A14, A23, A5, B14, B23 y B5 (Figura 3).

En la Tabla 3 se resumen las dosificaciones empleadas para la elaboración de los hormigones con los que se fabricaron las probetas.

En todos los casos se utilizó para la elaboración del hormigón, cemento portland normal, arena silíceo de río y piedra granítica partida, como agregados fino y grueso respectivamente, y agua potable de la red de distribución.

Las probetas se situaron en un banco de exposición a la intemperie en la ciudad de Santa Fe (Argentina) sometidas a condiciones típicas de un clima cálido (zona bioambiental II) de acuerdo a la clasificación propuesta por la norma IRAM 11603:1996.

Sobre estas probetas se realizaron mediciones de potenciales (i_{corr}) y de intensidad de corriente de corrosión (i_{corr}) mediante la utilización del equipo GECOR_6. En trabajos anteriores se describe detalladamente el procedimiento de medición ⁽²⁵⁾.

Tabla 1: Criterio de evaluación de las potenciales de corrosión ⁽⁸⁾

Casos	Potencial [V]	Observaciones	Condición	Riesgo de daño
A	+0,20 a -0,20	Ausencia de cloruro pH>12,5 y H ₂ O (HR↑)	Estado Pasivo	Despreciable
B	-0,20 a -0,60	Cloruro O ₂ , H ₂ O (HR↑)	Corrosión Localizada	Alto
C	-0,15 a -0,60	Carbonatado O ₂ , ↑ (HR↑)	Corrosión Uniforme	Moderado / alto
D	+0,20 a -0,15	Carbonatado O ₂ , seco (HR↓)		Bajo
E	-0,40 a -0,60	Cloruro elevado, H ₂ O o Carbonatado H ₂ O (HR↑)		Alto
F	< -0,60	↑ Cloruro, ↑ H ₂ O (sin O ₂)	Corrosión Uniforme	Despreciable

Tabla 2: Criterio de evaluación de las corrientes de corrosión ⁽⁸⁾

Corriente de corrosión ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Nivel de corrosión	Penetración de la corrosión (micrones por año)
< 0.1	despreciable	< 1.1
0.1 - 0.5	Moderado	1.1 a 5.5
0.5 - 1	Elevado	5.5 a 11
>1	muy elevado	>11

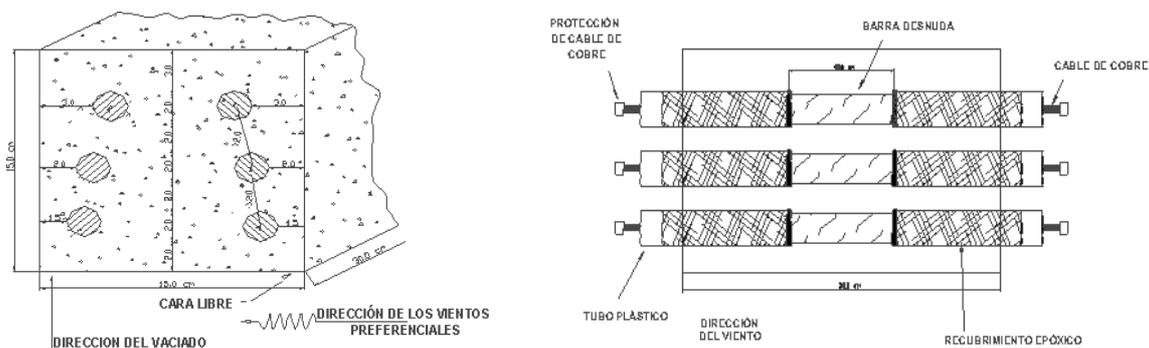


Figura. 2: Esquema de las probetas A y B

Tabla 3: Dosificaciones de hormigones utilizados en la elaboración de las probetas

Identificación probeta	Contenido de cada material por m ³ de H ^o [kg]				Relación a/c
	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Agua	
A	400	880	900	188	0,45
B	295	940	900	192	0,65

Las mediciones se realizaron a partir de los 513 días de exposición y con intervalos de 60 días para las probetas A y B.

Si bien, estas condiciones de ensayo no responden completamente a las condiciones de repetibilidad definidas por Taylor *et al* ⁽²³⁾, los intervalos se seleccionaron a fin de tomar en consideración el fenómeno de polarización en las armaduras que se da cuando se repiten las mediciones en cortos períodos de tiempo, ya que las cargas remanentes sobre las barras, producto de las diferencias de potencial aplicadas por el equipo, generan una distorsión de los resultados.

Por otra parte, se verificó que el proceso de corrosión que afecta a las barras analizadas se encuentre dentro del período de iniciación definido por Tuutti ⁽⁹⁻¹⁰⁾, dentro del cual las condiciones del proceso no cambian sustancialmente. Estas condiciones permiten reproducir la situación de elementos estructurales sobre los cuales se realizan evaluaciones in-situ, y que corresponderían a situaciones de reducida o nula afectación por corrosión.

Adicionalmente, se constató que el frente de carbonatación no hubiese sobrepasado en ningún caso al espesor de recubrimiento adoptado. Esta verificación se llevó a cabo realizando cortes en probetas elaboradas con los mismos hormigones y dimensiones que las probetas armadas, rociando una solución de 1% de fenoltaleína, 49% de alcohol y 50% de agua, que funciona como un indicador de pH cuyo rango de viraje se encuentra entre 8,2 y 9,8 ⁽⁸⁾.

2.2 Mediciones en obra

En el presente trabajo se incluyen datos obtenidos en la evaluación de una estructura de hormigón armado resuelta en nueve niveles (subsuelo, planta baja y siete niveles superiores) cuya construcción se inició en 1972 y que quedó expuesta a las inclemencias ambientales durante un período prolongado. El ambiente de exposición de la estructura resultó idéntico al correspondiente a las probetas de ensayo, debido a la cercanía de ambos sectores de trabajo. La estructura presenta entresijos resueltos con losas macizas y vigas que apoyan sobre elementos verticales (columnas y tabiques). El tanque de reserva de agua, está conformado en su base y cubierta por losas de hormigón y los laterales están conformados por tabiques de hormigón.

La evaluación partió de una inspección visual completa de la estructura y un relevamiento geométrico integral del edificio dada la imposibilidad de contar con documentación técnica ⁽²⁶⁾. A partir de este diagnóstico, se profundizó la evaluación con ensayos destructivos y no destructivos tendientes al análisis de la calidad del hormigón constituyente (resistencia y durabilidad) y el grado de conservación de las armaduras. Finalmente, se completaron las tareas con el análisis de la respuesta en servicio de la estructura mediante pruebas de carga directa.

3. Resultados y discusión

3.1 Estado general de las probetas evaluadas

A partir de las mediciones efectuadas se pudo observar que el frente de carbonatación no hubiera alcanzado a las armaduras en ningún caso, ya que las profundidades máximas de penetración fueron de 0.66 y 0.94 cm para las probetas tipo A y B,

respectivamente. De acuerdo a esta observación es esperable que las barras de acero inmersas en el hormigón se encuentren aún en un estado pasivo.

Las mediciones de icorr indican que para las probetas A y B, los valores son inferiores a $0.085 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, correspondiendo a una velocidad de corrosión despreciable ⁽⁸⁾.

Al graficar estos valores en función del tiempo, se obtienen pendientes para las líneas de regresión ⁽²⁷⁻²⁹⁾ variables entre $0.000001 \mu\text{A}/\text{cm}^2.\text{día}$ y $0.000007 \mu\text{A}/\text{cm}^2.\text{día}$ para las probetas A y B (Figura 4).

Los valores de ecorr, oscilan entre -117.3 mV y $+96 \text{ mV}$ para las probetas A y B que corresponden a un riesgo de corrosión despreciable y estado pasivo ya que hay humedad y oxígeno disponibles y no existe carbonatación ni cloruros. Esta condición es representativa de la situación de las estructuras de hormigón expuestas al aire donde el nivel de oxígeno disuelto es suficiente para mantener potenciales de corrosión del acero pasivo dentro del rango de $+100 \text{ mV}$ a -200 mV ⁽²⁾.

En este caso, al graficar los valores de ecorr en función del tiempo y trazar las rectas de regresión para las probetas A y B, se obtiene una pendiente variable entre $-0.002 \text{ mV}/\text{día}$ y $0.01 \text{ mV}/\text{día}$ (Figura 5).

Las pendientes obtenidas muestran una modificación muy leve en el tiempo de la condición de las probetas ensayadas resultando compatibles, en consecuencia, con el período de iniciación descrito en el modelo de Tuutti ⁽⁹⁻¹⁰⁾. En este período, entonces, resulta posible analizar la variabilidad de los valores obtenidos para icorr y para ecorr, así como la influencia que ejerce el espesor de recubrimiento.

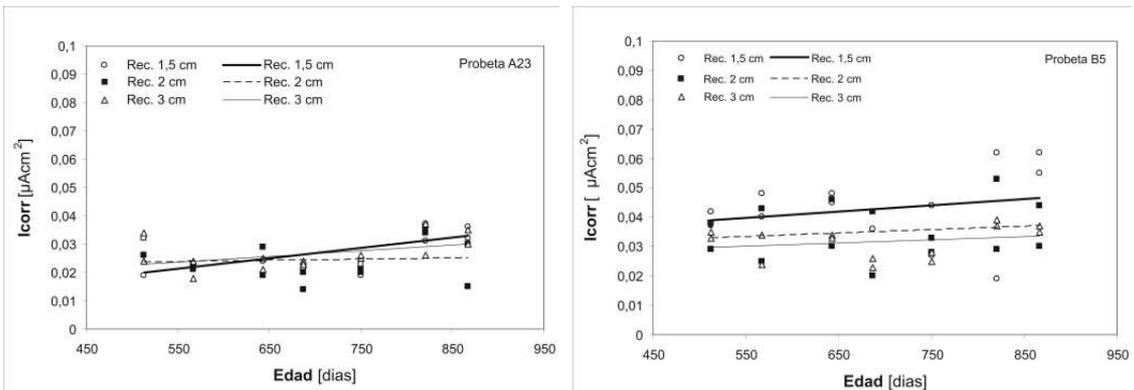


Figura 4 : Variación de la intensidad de corrosión en función de la edad para probetas A y B

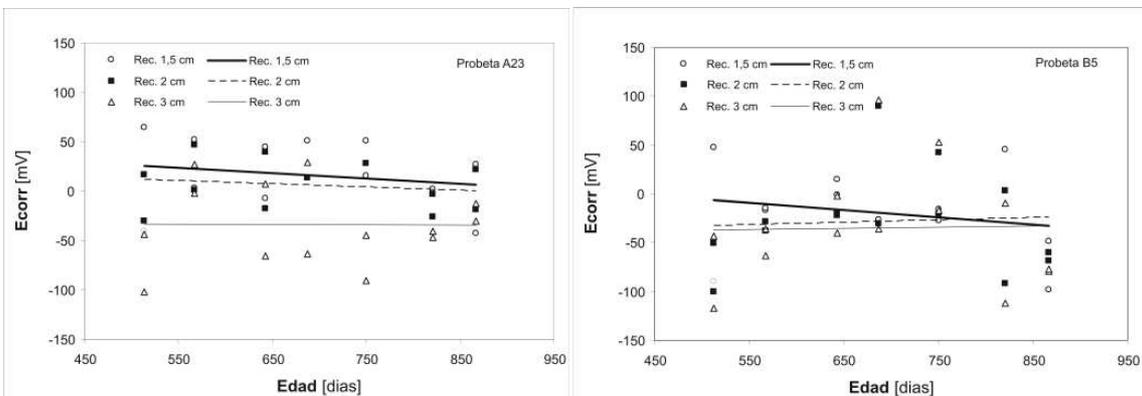


Figura 5: Variación del potencial de corrosión en función de la edad para probetas A y B

3.2 Análisis de la repetibilidad de las lecturas obtenidas en laboratorio

La repetibilidad se estimó de acuerdo a la definición de Brusnick *et al.*⁽²⁴⁾, se calcularon los valores absolutos para cada par de resultados individuales para luego calcular el límite superior del intervalo de confianza que, con un 95 % de probabilidades incluirá al valor medio de estas diferencias⁽²⁷⁻²⁹⁾ (Tabla 4). Así, la obtención de un mayor valor de repetibilidad según Brusnick *et al.*⁽²⁴⁾ indicará que los datos que componen la muestra analizada resultan más dispersos o variables.

A partir del análisis de estos valores de icorr, se puede observar que éstos se mantienen aproximadamente constantes para cada tipo de probeta y espesor de recubrimiento, demostrando que el método es capaz de identificar diferencias entre las condiciones de ensayo planteadas.

Contrariamente, al evaluar los resultados de ecorr, las diferencias no resultan muy significativas entre las distintas probetas.

No se aprecian variaciones significativas en los valores de icorr al incrementarse el espesor de recubrimiento utilizado, no obstante, la diferencia entre dos valores individuales presenta un comportamiento diferenciado para recubrimientos menores y mayores a 30 mm (Tabla 4). Para recubrimientos menores o iguales a 30 mm, la repetibilidad de los resultados se mantiene entre un 20 y un 43 % y, al incrementarse el recubrimiento a 50 mm, crece hasta alcanzar el 78 %. Esto pone en evidencia una influencia importante del espesor de recubrimiento sobre las mediciones realizadas.

Resulta menos representativo analizar la repetibilidad de las mediciones de ecorr en términos porcentuales. En la Tabla 4 se puede observar que la diferencia entre dos valores individuales se encuentra entre 24 y 69 mV para las probetas A y B.

Tabla 4: Valores medios y repetibilidad máxima de ecorr e icorr

	Recubrimiento (cm)	Icorr [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]		Ecorr [mV]	
		Valor medio	Repetibilidad	Valor medio	Repetibilidad
A15	1.5	0,029	0,0098	-1,9	23,385
	2.0	0,022	0,0060	-16,7	33,317
	3.0	0,027	0,0064	-34,2	48,707
A23	1.5	0,026	0,0072	18,6	43,994
	2.0	0,024	0,0084	6,0	31,630
	3.0	0,025	0,0080	-8,5	43,823
A5	1.5	0,028	0,0135	-21,0	44,127
	2.0	0,032	0,0122	-43,7	32,424
	3.0	0,027	0,0107	-20,4	34,670
B14	1.5	0,039	0,0166	-21,4	53,070
	2.0	0,032	0,0086	-28,2	48,375
	3.0	0,027	0,0079	-26,2	42,378
B23	1.5	0,035	0,0103	-19,9	45,18
	2.0	0,028	0,0082	-22,5	37,975
	3.0	0,029	0,0122	-25,4	43,957
B5	1.5	0,043	0,0141	-19,2	54,055
	2.0	0,035	0,0112	-28,3	58,023
	3.0	0,032	0,0064	-34,5	68,407

No es posible establecer una tendencia clara entre el incremento del espesor de recubrimiento y la repetibilidad de las mediciones de i_{corr} efectuadas en el caso de las probetas A y B que presentan recubrimientos de hasta 30 mm. En trabajos anteriores⁽²⁵⁾ se muestra que al incrementarse el recubrimiento hasta los 50 mm, se aprecia una dependencia de los valores de i_{corr} y su variabilidad respecto del espesor de recubrimiento resulta compatible con lo indicado en la bibliografía. Feliú *et al*, quienes definen un área eficiente que actúa como conductor iónico en las mediciones. Este área eficiente se relaciona con la resistencia del hormigón y depende, del espesor de recubrimiento entre otros factores⁽¹⁵⁾.

Por otra parte, se ha indicado que el espesor de recubrimiento tiene una influencia directa sobre los valores de i_{corr} medidos. A medida que se incrementa el espesor de recubrimiento, los valores medidos para corrosión activa y para estado pasivo se vuelven similares y, a una distancia infinita, resulta esperable que los potenciales determinados sean uniformes haciendo dificultosa la detección de zonas más comprometidas⁽³⁰⁾.

3.3 Estado general de elementos estructurales

En la Tabla 5 se resumen los resultados de las mediciones efectuadas en distintas instancias sobre algunos elementos constitutivos de la estructura en estudio. De acuerdo a las mediciones semi-destructivas realizadas, se constató que en los puntos analizados en el presente trabajo el frente de carbonatación no había alcanzado a las armaduras, a excepción de la columna 6 ubicada en el 4° piso que presentaba un espesor de recubrimiento de 3.00 cm y un espesor de hormigón carbonatado de 5.00 cm. De acuerdo a esta observación es esperable que las barras de acero inmersas en el hormigón se encuentren aún en un estado pasivo en el tabique del tanque del 7° piso, en la columna 3 del 5° piso y en la columna 3 del 3° piso.

Las mediciones de i_{corr} indican que los valores son inferiores a $0.1 \mu A/cm^2$, correspondiendo a una velocidad de corrosión despreciable para la totalidad de los elementos presentados⁽⁸⁾.

Los valores de i_{corr} , oscilan entre -165.6 mV y +11.4 mV para estos mismos elementos que corresponden a un riesgo de corrosión despreciable y estado pasivo ya que hay humedad y oxígeno disponibles y no existe carbonatación ni cloruros en el hormigón⁽⁸⁾.

Los resultados de resistividad del hormigón indican que existe, en general, un riesgo moderado a elevado para la ocurrencia del proceso de corrosión de las armaduras, que puede relacionarse con una baja calidad del hormigón de recubrimiento detectada en la estructura, compatible aproximadamente con la calidad del hormigón utilizado para la confección de las probetas B.

En la Tabla 6 se observa que, en general, se obtienen diferencias que resultan inferiores a la repetibilidad establecida, mediante el ensayo de probetas de laboratorio, para hormigones de buena calidad (representados por el hormigón identificado como A) o de mala calidad (representados por el hormigón identificado como B). En cada caso, se utilizan los límites de comparación correspondientes al espesor de recubrimiento utilizado en la estructura.

Los puntos en los cuales se sobrepasan los límites de repetibilidad obtenidos en laboratorio corresponden a puntos que presentan situaciones particulares.

Tabla 5: Mediciones realizadas en elementos estructurales

Elemento	Medición	Recubrimiento (cm)	Icorr [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Ecorr [mV]	Resistividad [$\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$]
Tabique Tanque – 7° P	1	1.80	0,045	-151,7	5,09
	2	1.80	0,060	-142,8	34,50
Columna 3 - 5° P	1	3.00	0,023	-31,2	57,99
	2	3.00	0,013	1,7	164,68
Columna 6 - 4° P	1	3.00	0,004	-151,2	334,02
	2	3.00	0,005	-165,6	30,49
	3	3.00	0,005	-44,9	219,00
Columna 3 – 3° P	1	4.80	0,053	-25,5	43,1
	2	4.80	0,018	11,4	64,13

Tabla 6: Mediciones realizadas en elementos estructurales

		T. tanque 7° P		Columna 3 5° P		Columna 6 4° P			Columna 3 3° P	
		1	2	1	2	1	2	3	1	2
Icorr [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Valor	0.045	0.06	0.023	0.013	0.004	0.005	0.005	0.018	0.031
	Diferencia máxima	0.015		0.010		0.001			0.013	
	Límite de repetibilidad	0.0135 bueno 0.0166 malo		0.0107 bueno 0.0122 malo		0.0107 bueno 0.0122 malo			0.0107 bueno 0.0122 malo	
	Cumple?	si		si		Si			No	
Ecorr [mV]	Valor	-151.7	-142.8	-31.2	-18.1	-151.2	-165.6	-44.9	11.4	2.9
	Diferencia máxima	8.9		32.9		120.7			8.5	
	Límite de repetibilidad	44.13 bueno 54.06 malo		48.71 bueno 68.41 malo		48.71 bueno 68.41 malo			48.71 bueno 68.41 malo	
	Cumple?	si		si		no			si	

En el caso de las mediciones de densidad de corriente de corrosión en la columna 3 del 3° piso, estos resultados se relacionan con un espesor de recubrimiento de 4.80 cm. Este valor resulta muy superior a los espesores estudiados en laboratorio e indica que, tal como se confirmó en trabajos anteriores⁽²⁵⁾, al incrementarse el recubrimiento a 50 mm se produce un incremento importante de la variabilidad de las mediciones. En estas condiciones, no resultarían aplicables los límites de repetibilidad calculados.

En el caso de las mediciones de potenciales de corrosión detectados en la columna 6 del 4° piso, se detectó un espesor importante de carbonatación que coloca a las armaduras en riesgo de corroerse. En esta situación, resulta esperable que los límites de repetibilidad no se respeten en virtud de la evolución del sistema más allá del período de iniciación.

4. Conclusiones

Para el sistema e instrumental utilizados en estas experiencias se verifica que:

- Los valores de icorr indican que esta medición es capaz de identificar diferencias entre condiciones de una estructura de hormigón armada, tales como modificaciones en la calidad del hormigón de recubrimiento (variaciones en la razón a/c).

- Los resultados de ecorr, no son sensibles ante modificaciones en la calidad del hormigón de recubrimiento (variaciones en la razón a/c).
- Tanto para las mediciones de icorr como de ecorr, se ha detectado un incremento de la variabilidad a medida que se incrementa el espesor de recubrimiento utilizado, especialmente al alcanzar los 50 mm. Este comportamiento se relaciona con las limitaciones en la capacidad de los electrodos con guarda para definir adecuadamente el área sobre la que se realizan las mediciones de parámetros de corrosión, ya que la corriente que emana del disco tiende a esparcirse sobre un área mayor que la considerada en los cálculos a medida que el espesor de recubrimiento aumenta hasta alcanzar el diámetro del electrodo con guarda.
- Es posible utilizar los valores de repetibilidad establecidos sobre probetas de laboratorio para evaluar la calidad de las mediciones realizadas sobre estructuras reales, a fin de confirmar la existencia de zonas de riesgo de corrosión despreciable. No obstante, resulta imprescindible tener en cuenta durante la aplicación de estos valores la utilización de hormigones de calidad compatible con los encontrados en las estructuras y de espesores de recubrimientos similares.
- Los valores de repetibilidad establecidos resultan significativamente inferiores a los intervalos definidos en criterios de análisis⁽⁸⁾, brindando confiabilidad a las mediciones no destructivas realizadas.

Referencias

1. L. Traversa, 'Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales en Durabilidad del Hormigón Estructural', Ed. F.E. Irassar, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Olavarría, Argentina, 2001, pp. 217-257.
2. C.L. Page, 'Basic Principles of Corrosion', RILEM Rep. Corrosion of steel in concrete. Ed. P.Schiessl, Nueva York, 1988, pp 3-21.
3. P.K. Metha, P.J.M. Monteiro, Concrete structure, properties and materials, Prentice Hall, Inc., E.E.U.U., 1993.
4. S. Mindess, J.F. Young, Concrete, Prentice Hall, Inc., E.E.U.U., 1981.
5. A. Neville, Tecnología del concreto I, Editorial Limusa, México, 1981.
6. R.F.M. Bakker, 'Initiation Period', RILEM Report Corrosion of steel in concrete. Ed. P.Schiessl, Nueva York, 1988, pp 22-55.
7. C. Alonso, C. Andrade, J. Rodríguez, J.M. Diez, Materials and Structures, Vol. 20 (1998) pp. 435-441.
8. 'Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado' Red temática XV.B "DURAR" (Durabilidad de la armadura) – CYTED.
9. K. Tuutti, 'Corrosion of steel in concrete', Swedish Cement and Concrete Institute (CIB) 4-82. Stockholm, Suecia, 1982.
10. S. Rostam, 'Vida útil de las estructuras de hormigón. Cómo satisfacer los requerimientos del nuevo milenio', Revista Hormigón No. 36, (2000), pp. 11-43.
11. A.Di Maio, 'Evaluación de las características de los hormigones por métodos no destructivos', 5º Reunión Técnica de la AATH, octubre 1982, pp. 61-82.
12. M. Klaric, C. Fava, 'Parámetros de referencia para la evaluación del hormigón en estructuras mediante ultrasonido'. 8º Reunión Técnica de la AATH, octubre 1987, pp. 234-252.

13. C. Colombino, E. Cáceres, 'Parámetros obtenidos por medios ultrasónicos y electromagnéticos en hormigones de estructuras resistentes. Experiencia regional', 8° Reunión Técnica de la AATH, octubre 1987, pp. 483-494.
14. J.P. Broomfield, J. Rodríguez, L. M. Ortega, A. M. García, 'Corrosion Rate and life prediction for reinforced concrete structures', Structural Faults and repairs symposium, Scotland, 1993.
15. S. Feliú, J.A. Gonzalez, C. Andrade, 'Errors in the on site measurement of rebar corrosion rate due to a lack of confinement', ACI Fall Convention, EE.UU., 1993.
16. A. Sagües, Corrosion 93, NACE, Paper N° 353.
17. S.C. Kranc, A. Sagües, Electrochimica Acta, 38 (14) 1993, pp. 2055-2061.
18. S. Millard, Institute of corrosion and The Concrete Society, Current Practice Sheet 132: Measuring the corrosion rate of reinforced concrete using linear polarisation resistance, Concrete, Vol. 37, March 2003, pp. 36-38.
19. CONTECVET Manual de evaluación de estructuras afectadas por corrosión de la armadura, Geocisa – Instituto Eduardo Torroja.
20. C. Andrade, 'Monitoring Techniques', RILEM Rep. Corrosion of steel in concrete. Ed. P.Schiessl, Nueva York, 1988, pp 79-95.
21. Reglamento CIRSOC 201, Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Argentina, 1982.
22. Reglamento CIRSOC 201, Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Argentina, 2002 (en proceso de aprobación).
23. B. N. Taylor, C.E. Kuyatt, 'Guidelines for evaluation and expressing the uncertainty of NIST measurement results', NIST Technical Note 1297, National Institute of Standards and Technology (NIST), Washington, EEUU, 1994.
24. G. Brusnick, G. Pulmann, R. Urban, Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 71, 1974, Francia, pp.85-91
- . Estudio sobre la repetibilidad de mediciones de parámetros electroquímicos en estructuras de hormigón armado, V Congreso Regional de Ensayos No Destructivos (CORENDE), Neuquén, 2005, pp. 77-85.
26. J. Calavera, 'Patología de Estructuras de hormigón armado y pretensado', Tomo I, INTEMAC, España, 1996, pp. 227-230.
27. D.C. Montgomery, G.C. Runger, Probabilidad y Estadística aplicadas a la ingeniería, McGraw-Hill, México, 1996.
28. J.E. Freund, G.A. Simon, Estadística Elemental, Prentice-Hall, México, 1992.
29. I.R. Miller, J.E.Freund, R. Jonson, Probabilidad y estadística para ingenieros, Prentice-Hall, México, 1992.
30. B. Elsener, H. Böhni, Potential Mapping and corrosion of steel in concrete, Corrosion rates of steel in concrete, ASTM STP 1065, N.S.Berke, V. Chaker, D. Whiting, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 143-156.