

Corrosión de armaduras en hormigones y morteros de reparación

M. Valdés* y M. Vázquez

División Corrosión, INTEMA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de
Mar del Plata, J. B. Justo 4302, B7608FDQ Mar del Plata, Argentina

*autor: masovaldes@copetel.com.ar

Resumen

En el presente trabajo se estudió el proceso de corrosión de los refuerzos de acero en hormigones y morteros de reparación. En el caso de hormigones, se confeccionaron dos diseños de mezcla: el hormigón H1 con una relación agua/cemento 0.4 y un contenido de cemento de 400 kg/m^3 de hormigón; y el hormigón H2 de relación agua/cemento 0.65 y un contenido de cemento de 260 kg/m^3 . En el caso de morteros de reparación se utilizaron cuatro diseños de mezcla, dos con morteros comunes de cemento Pórtland con distinto tiempo de curado y otros dos morteros de cemento con adición de un látex comercial en reemplazo del agua de amasado (relación 1:2), también sin curar y con 7 días de curado. Las probetas con barras de acero fueron mantenidas en solución aireada con 3.5% p/p de NaCl. A lo largo del tiempo se midieron parámetros electroquímicos característicos de los procesos de corrosión de las armaduras de acero junto con propiedades físicas y mecánicas de los hormigones y morteros bajo estudio.

Los resultados obtenidos indican que los morteros con látex son los que mejor protección le proveen a los refuerzos de acero, tanto por los resultados de los ensayos electroquímicos como por las propiedades físicas y mecánicas. Desde el punto de vista de la corrosión no se observa una influencia significativa del tiempo de curado de los morteros, pero se ven diferencias en su respuesta mecánica. En los morteros de cemento y en los hormigones estudiados se han registrado velocidades considerables de deterioro del metal, más acentuadas en el hormigón de mayor relación a/c (0.65). Los valores de porosidad ayudan a comprender la respuesta de estos materiales en los ensayos electroquímicos.

Palabras clave: hormigón, morteros, corrosión, refuerzos, látex.

1. Introducción

En las ciudades próximas a la costa del mar, la corrosión en estructuras de hormigón armado es la principal causa de deterioro de edificios, muelles y otras estructuras civiles y viales.

La corrosión en el hormigón armado no sólo afecta la integridad estructural de edificios, causando agrietamientos en el hormigón y reducción de espesor en las armaduras, sino que también compromete la seguridad de las personas que los habitan y de terceros. Asimismo, la evidencia de problemas de corrosión (manchas de óxido, agrietamientos y desprendimiento de material) provoca la desvalorización del inmueble debido a su deterioro estético y funcional[1,2].

En el marco del estudio de los principales factores que afectan el proceso de corrosión en estructuras de hormigón armado expuestas al ambiente marino, el presente trabajo se focaliza en el empleo de morteros de reparación. En la literatura se presenta información sobre las características mecánicas de los morteros, pero no se la vincula con el desempeño de estos morteros desde el punto de vista de la durabilidad y su incidencia en los procesos de corrosión de las armaduras[3-5].

Los objetivos particulares planteados para el presente trabajo son:

- Relevar el comportamiento frente a la corrosión de las armaduras en hormigones elaborados con diseños de mezcla que representen los típicamente empleados en la construcción local.
- Establecer la influencia del uso de morteros utilizados tradicionalmente en reparaciones de estructuras de hormigón armado sobre el proceso corrosivo.
- Evaluar la eficiencia de la protección que otorgan morteros de reparación con diferente composición, considerando en particular la incidencia de:
 - ➔ el período de curado
 - ➔ el uso de morteros modificados con aporte de látex al agua de amasado
- Evaluar las propiedades mecánicas de los morteros de reparación, especialmente aquellas que influyen en el desempeño de la durabilidad de las reparaciones.

2. Desarrollo Experimental

El sistema consistió de 16 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 15 cm de altura compuestas por dos secciones iguales en sentido longitudinal, mitad mortero y mitad hormigón. El diseño permite incorporar 4 refuerzos de acero al carbono (acero de construcción) de 8 mm de diámetro y 15 cm de longitud con un área de trabajo expuesta de 20 cm². Dos de los refuerzos están embebidos en el mortero y 2 en el hormigón (ver Figuras 1 y 2).

La resistividad eléctrica en los morteros y hormigones se evaluó en probetas sin barras. Estas consisten en prismas rectangulares de 4 x 4 x 16 cm y semicilindros de 10 x 5 x 20 cm elaborados con los morteros y hormigones en estudio, respectivamente.

Se utilizaron dos tipos de mortero de uso frecuente en la reparación de estructuras: el primero un mortero común, C, (pasta cementicia más arena) y el segundo con adición de látex, L, de marca comercial (relación volumen aditivo/agua = 1:2) como modificador de sus propiedades durables. A su vez, se estudiaron dos tiempos de curado: cero (C0) y siete (C7) días.

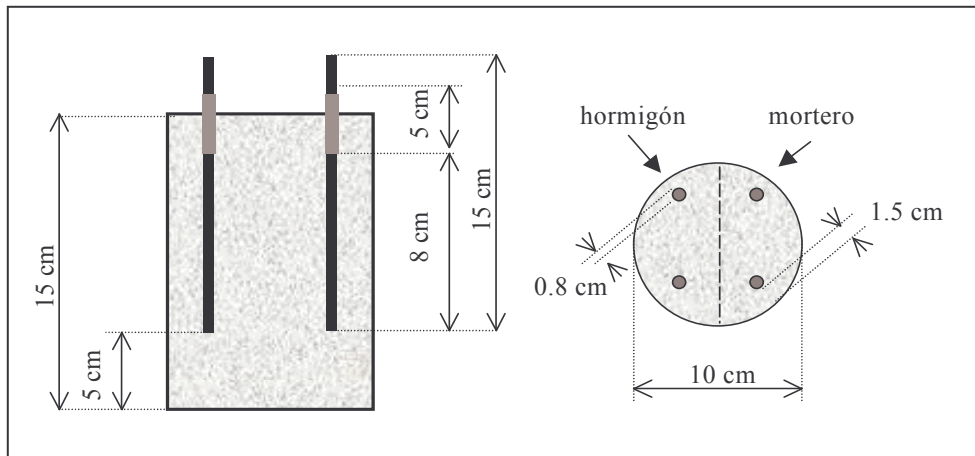


Figura 1. Esquema de las probetas con barras del Sistema experimental.

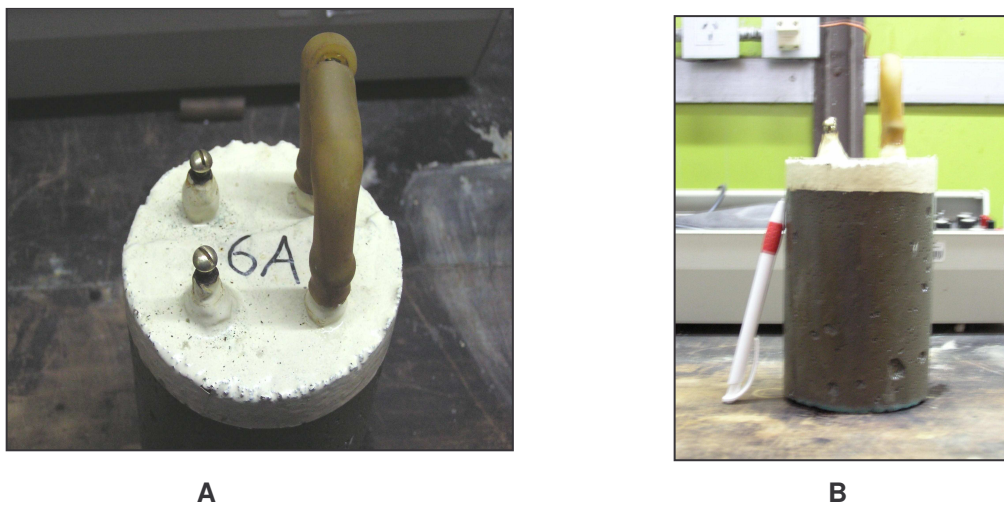


Figura 2. Fotografías de las probetas utilizadas en los ensayos electroquímicos.

A) Vista superior donde se observa la nomenclatura y las barras con sus contactos eléctricos.

B) Vista frontal de la probeta.

En cuanto a los hormigones empleados, se utilizaron dos dosificaciones bien diferenciadas (ver Tabla 1). Un hormigón, H1, con una relación agua/cemento de 0.4 y un contenido de cemento de 400 kg/m^3 de hormigón. Esta dosificación es representativa de un hormigón de muy buena calidad y alta prestación. En contraste, el hormigón H2, con una relación agua/cemento (a/c) de 0.65 y un contenido de cemento de 260 kg/m^3 , emulando a un hormigón de entre mediana / baja calidad.

Se utilizaron barras de acero corrugado, con resaltes transversales inclinados con respecto al eje geométrico de la barra. En la Tabla 2 se muestra la composición química del acero de refuerzo obtenida mediante un ensayo de espectrometría de emisión por chispa.

Tabla 1. Dosificación de hormigones y morteros.

Nombre	Relación agua/cemento	Asentamiento (cm)	Curado húmedo/ al aire (días)	Especificaciones
CC0	0.40	Flow: 70 ± 5	0/28	Mortero de Cemento CPN 40 Arena de río MF: 2.4
CC7			7/21	
LC0			0/28	Idem CC0 Solución de amasado 1:2 Látex : agua
LC7			7/21	
H1	0.40	Cono: 8 ± 2	7/21	Hormigón Cemento CPF 40 Arena or. + Arena arg. MF 2.4 Piedra Partida TMA:19 mm
H2	0.65			

CPN: Cemento Portland Normal; CPF: Cemento Portland fillerizado (filler calcáreo); MF: Módulo de finura; TM: Tamaño máximo agregado grueso; CC0: Mortero común sin curado; CC7: Mortero común curado a 7 días; LC0: Mortero látex sin curado; LC7: Mortero látex curado a 7 días

Tabla 2. Composición química del acero de refuerzo.

	C	Mn	Cu	Ni	Si	Cr	P	S	Fe
%	0.386	1.299	0.148	0.020	0.288	0.048	0.018	0.027	balance

Tanto las reglamentaciones locales como nacionales recomiendan distintos espesores de recubrimiento de las armaduras de refuerzo según las condiciones de emplazamiento y características estructurales de los elementos que forman parte de las estructuras de hormigón armado. Según el relevamiento efectuado en nuestra ciudad, raramente se alcanzan espesores de recubrimiento superiores a los 2 cm [1,6,7]. En este trabajo se adoptó un valor representativo de 1.5 cm de uso común en las estructuras de hormigón armado de la zona.

Todas las probetas se colocaron en inmersión en piletas por separado en una solución 3,5 % p/v de NaCl. La solución se mantuvo aireada a temperatura ambiente y fue renovada periódicamente. En la figura 3 se muestran fotografías del sistema experimental.

Los ensayos electroquímicos fueron realizados empleando un potencióstato Gamry Instruments Inc. con un software soporte CMS 100 para mediciones con corriente continua y otro EIS 100 para corriente alterna. El electrodo de referencia usado fue el de Cu/CuSO₄ saturado (CSE, E = 0.351 V vs. ENH). Como contraelectrodo se utilizó una cinta de bronce de gran área y geometría conveniente para asegurar un flujo de corriente homogéneo. Los potenciales se midieron con

respecto al electrodo de referencia durante 1 minuto cada 15 días aproximadamente en todas las probetas por duplicado (probetas A y B) como se indica en la Norma ASTM C 879 – 91[8]. La Tabla 3 presenta los intervalos de potencial que definen distintos estados de corrosión para el acero de refuerzo.



Figura 3. Piletones que contienen las probetas en inmersión en solución 3.5% p/v de NaCl.

Tabla 3. Intervalos de potencial de corrosión para el acero en el hormigón.

E_{corr} vs. CSE [mV]	Riesgo	Estado de corrosión
> -200	Bajo	Pasivo
-200 a -350	Moderado	Transición activo – pasivo
< -350	Alto	Activo

Para determinar la resistividad eléctrica (ρ) de hormigones y morteros en las probetas rectangulares se utilizó un dispositivo que posee dos contactos eléctricos que ejercen presión sobre las caras inferior y superior de la muestra. Las mediciones se tomaron con un medidor de resistencia Nilsson modelo 400. Este equipo posee una señal alterna con una forma de onda cuadrada a una frecuencia de 97 Hz, que evita la polarización de los electrodos (ver Figura 4).

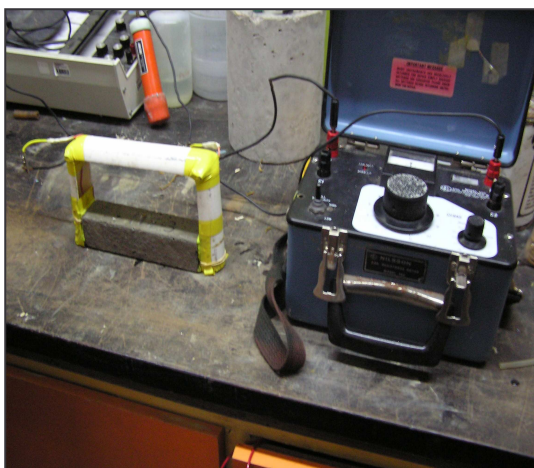


Figura 4. Ensayo de resistividad en hormigones y morteros.

Cada 15-30 días, se realizaron mediciones de resistencia a la polarización, R_p . Para determinar el R_p se utilizaron dos técnicas diferentes, en la primera el potencial se varió entre ± 15 mV respecto al potencial E_{corr} , a una velocidad de barrido de 0.1 mV/s. En la segunda técnica se utilizó un salto de potencial de 15mV respecto a E_{corr} y se midió la corriente una vez alcanzado un valor estable en el tiempo. Los ensayos se realizaron en probetas por duplicado siguiendo la norma ASTM G59-91.

Las curvas de polarización se realizaron hacia el final del trabajo, debido al carácter destructivo de este ensayo. Sólo se efectuaron mediciones sobre los hormigones H1 y H2. Se calcularon las pendientes de Tafel catódica y anódica, de manera de obtener las velocidades reales de corrosión de los refuerzos. Las barras se polarizaron a ± 1 V respecto del potencial de corrosión E_{corr} . La velocidad de barrido empleada fue de 1mV/seg.

En las impedancias electroquímicas se barrió un intervalo de frecuencias de 100000 a 0.0001 Hz, con una señal alterna de 10 mV. Se realizaron impedancias en barras en hormigones y morteros por duplicado cada 6 meses. Debido a la larga duración por ensayo, esta técnica sólo fue utilizada para realizar tres conjuntos de mediciones espaciadas en el tiempo. Sólo se ensayaron electrodos en probetas de hormigón, H1 y H2. El objetivo de estos ensayos será demostrar que es otra técnica por la cual se pueden obtener, a través de un circuito equivalente, parámetros importantes del sistema como son el R_p y el R_o . Para el modelado y ajuste de resultados se utilizó el software Z-View.

Para evaluar las propiedades físicas se llevaron a cabo ensayos de porosidad y densidad específica como se indica en la norma ASTM C 642 90[9]. Se utilizaron las mismas probetas que en los ensayos de resistividad eléctrica. Se utilizó una balanza granataria a la cual se le adaptó un dispositivo necesario para determinar los pesos de las probetas en agua. Se determinó el porcentaje en volumen de poros permeables, p_a (porosidad abierta) y la densidad específica en bulk ρ_b .

Los ensayos de compresión en hormigones se realizaron según la norma IRAM 1546[10] y la determinación del módulo secante por norma ASTM C 469[11]. Los ensayos fueron realizados a las edades de 7 y 28 días. Las probetas utilizadas fueron cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. La resistencia a la tracción de los hormigones se obtuvo de forma indirecta a través del ensayo de compresión diametral con probetas de 10×20 cm², según norma IRAM 1658 [12]. Los ensayos de flexión con carga puntual centrada se desarrollaron bajo norma ASTM C 293-94[13]. Se ensayaron probetas de hormigón de $4 \times 10 \times 43$ cm³ la edad de 28 días. Los ensayos se efectuaron a una velocidad de carga de 100 kg/min y con una luz libre entre apoyos de 35 cm.

Para caracterizar mecánicamente a los morteros se utilizaron probetas prismáticas de $4 \times 4 \times 16$ cm³, para determinar la resistencia a la compresión por norma ASTM C 109[14] y el módulo de ruptura (MOR) en flexión por ASTM C 293 – 94[13].

Resultados

Se discutirán los resultados obtenidos en los ensayos electroquímicos antes descritos. Las mediciones se efectuaron durante un período de aproximadamente 600 días a partir de la fecha de elaboración de las probetas. Se presentan asimismo los resultados de los ensayos mecánicos realizados para caracterizar los hormigones y morteros utilizados, de manera de establecer una correlación entre las propiedades del material y su respuesta frente al fenómeno de la corrosión.

Se presenta la evolución en el tiempo de las mediciones realizadas en hormigones y morteros de potenciales de corrosión (E_{corr}), resistividad eléctrica (ρ) y resistencia a la polarización (R_p). Estos últimos valores junto con las pendientes de Tafel permiten realizar una estimación de los valores de velocidad de corrosión (VC).

Los valores de potencial de corrosión de los refuerzos obtenidos en morteros y hormigones se muestran en las Figuras 5a y 5b respectivamente. Los valores surgen del promedio de cuatro lecturas para cada clase de mortero y ocho lecturas para cada clase de hormigón.

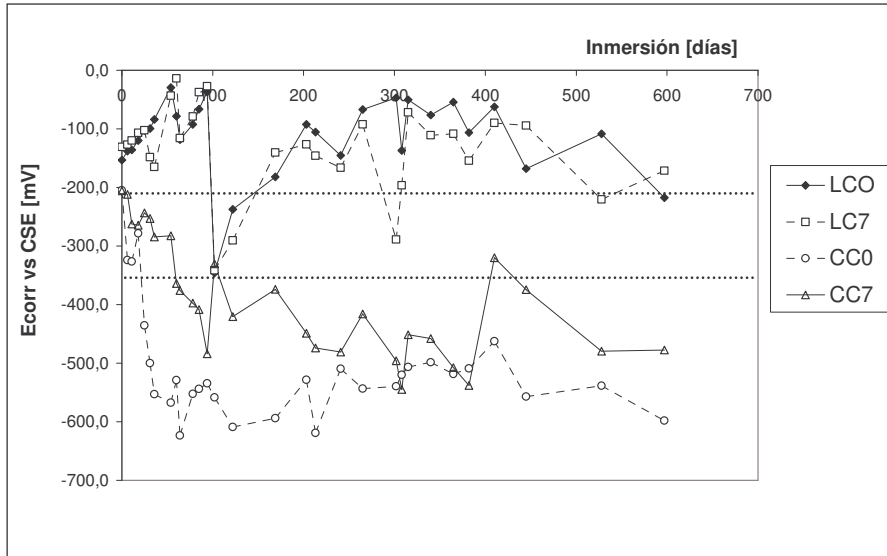


Figura 5a. Evolución del potencial de corrosión del acero (E_{corr}) en morteros de reparación. Las líneas delimitan las zonas de pasividad (> -200 mV), transición (-200 a -350 mV) y actividad (< -350 mV).

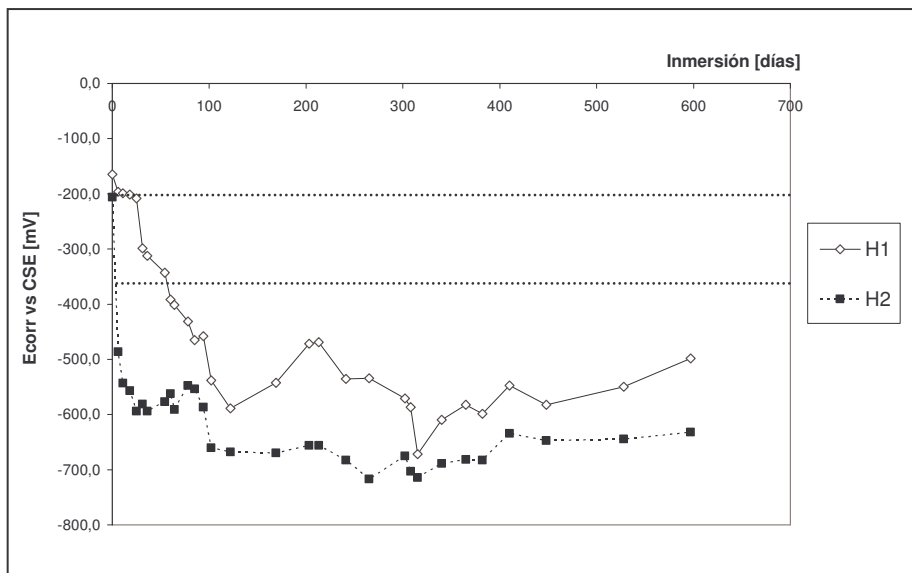


Figura 5b. Evolución del potencial de corrosión de la armadura (E_{corr}) en hormigones. Las líneas delimitan las zonas de pasividad (> -200 mV), transición (-200 a -350 mV) y actividad (< -350 mV).

Como se observa en la Figura 5a, los refuerzos en morteros con aporte de látex, LCO y LC7 muestran un mejor comportamiento frente a la corrosión, ya que su potencial se sitúa en la mayoría

del tiempo de exposición en la zona de pasividad, entre -50 y -200 mV. Si se compara entre estos dos morteros, se ve una pequeña diferencia en los valores de potencial, alcanzando el LC0 valores de potencial más positivos. Por su parte, las barras en los morteros “comunes” a base de cemento Portland, CC0 y CC7, presentan valores más negativos, entre -500 y -600 mV principalmente a partir del día 100 de inmersión, ubicándose en la zona de actividad. El mortero CC0 alcanza los potenciales más negativos, lo que sugiere corrosión activa de los refuerzos.

Algo similar sucede con el refuerzo en los hormigones. En la Figura 5b, se puede apreciar que los valores de potencial son altamente negativos. Este comportamiento es más evidente en el H2, alcanzando valores de hasta -700 mV. Por su parte el H1 presenta valores más positivos, ubicándose en un principio en la zona de transición activo – pasiva, (hasta el día 50 de inmersión), para luego mostrar un descenso marcado, y estabilizarse en valores entre los -500 y -600 mV.

La resistividad eléctrica en hormigones y morteros fue calculada a partir de la ecuación

$$\rho_{[\Omega.cm]} = Kr_{[cm]} \cdot R_{[\Omega]} \quad (1)$$

donde el valor de la constante geométrica de celda (Kr) surge en este caso, de la relación área/longitud para las probetas de mortero y hormigón utilizadas en las mediciones, siendo los valores de dicha constante 1 cm y 1,96 cm, respectivamente. La Figura 6 representa la variación de la resistividad con el tiempo de inmersión en morteros “látex” y “comunes”, y en los hormigones H1 y H2.

En función de los valores de resistividad determinados en el hormigón puede estimarse el grado de agresividad (acción del medio y los agentes externos) en perjuicio de la durabilidad de la estructura de hormigón armado[7,15]. En la Tabla 4 se muestran los valores de resistividad ρ y el grado de agresividad asociada.

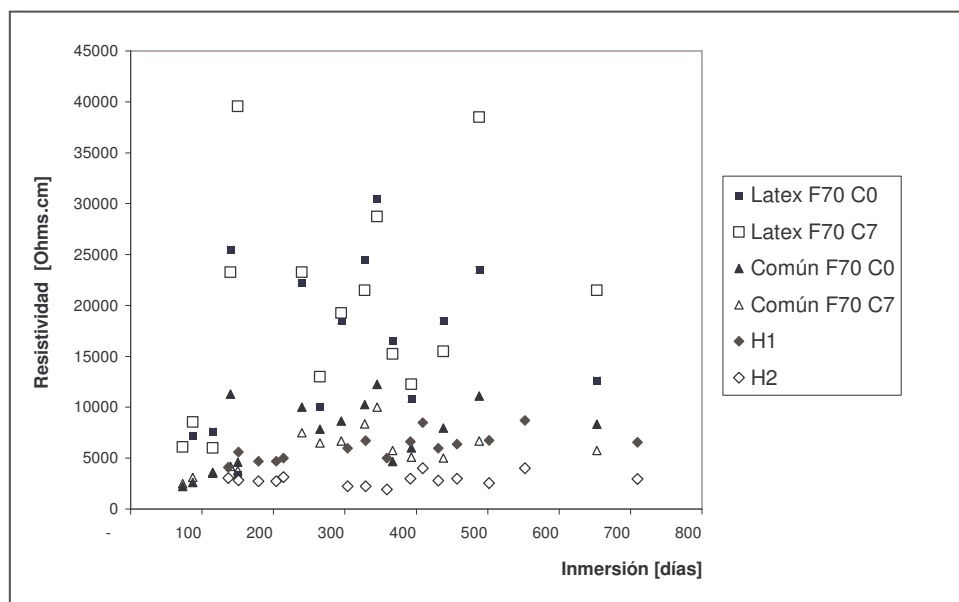


Figura 6. Variación de la resistividad eléctrica en el tiempo en hormigones y morteros de reparación.

Tabla 4. Agresividad del hormigón en función de los valores de resistividad eléctrica (ρ).

Intervalo de resistividad ρ ($k\Omega \text{ cm}^2$)	Agresividad del hormigón
> 30	Baja
10 a 30	Moderada
< 10	Alta

En la Figura 6 se ve que los morteros “látex”, LC0 y LC7 son los que alcanzan mayores valores de resistividad superando en promedio los $2 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$, mientras que los morteros “comunes”, CC0 y CC7, se ubican en valores cercanos a los $10^4 \Omega \text{ cm}$. La Figura 6 muestra que si bien entre los hormigones H1 y H2 hay una diferencia apreciable en sus valores de resistividad, ubicándose el hormigón H1 en valores superiores, ambos materiales no sobrepasan los $9 \times 10^3 \Omega \text{ cm}$.

La Figura 7 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a la polarización en hormigones y morteros. Nuevamente los morteros con aporte de látex LCO y LC7 presentan mejores resultados que los morteros “comunes”, CC0 y CC7, para todos los tiempos de exposición de las probetas. Según la ecuación de Stern - Geary:

$$i_{\text{corr}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303 (\beta_a + \beta_c)} \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

El R_p es un valor inversamente proporcional a la velocidad de corrosión, expresada en densidad de corriente, i_{corr} . Por lo tanto, un mayor valor de R_p se traduce en una i_{corr} menor. Esto significa que los morteros sin látex se encuentran en un estado más activo que los morteros que contienen látex.

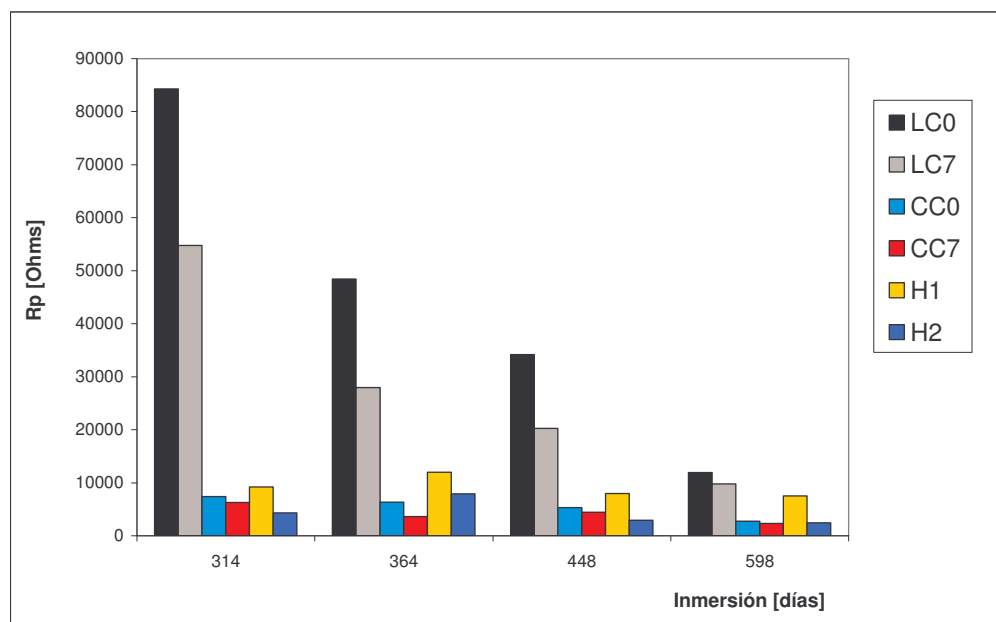


Figura 7. Valores de resistencia a la polarización (R_p) de las armaduras en morteros de cemento Portland, CC0 y CC7, y hormigones H1 y H2 obtenidos por la técnica de salto de potencial.

Si se compara entre morteros de la misma “familia”, se puede ver que no hay un efecto definido del tiempo de curado, es decir, los morteros “comunes” no presentan valores muy diferentes, aunque son algo mayores para el CC0. En los morteros “látex” sucede lo contrario, la diferencia es notoria particularmente a tiempos cortos de exposición, mostrando valores superiores el mortero sin curar LC0. A medida que el tiempo avanza esta diferencia se pierde.

En el caso de los hormigones se aprecia una marcada diferencia en los valores de Rp, siendo el hormigón H1 de menor relación a/c, el que presenta los valores de Rp más altos.

En la Tabla 5 se muestran los valores de las pendientes de Tafel anódicas y catódicas (β_a y β_c) obtenidos a través de los ensayos de polarización. También se presentan los valores de B (ec.2). Los valores de B calculados para el acero en ambos hormigones, H1 y H2, concuerdan con los valores reportados en bibliografía para el acero en estado de corrosión activa (0.026)[16,17]

Tabla 5. Valores experimentales de las pendientes de Tafel β_a y β_c calculadas en hormigones, valores de B calculados con estas pendientes y reportados en bibliografía[16,17].

Material	β_a [V]	β_c [V]	$B_{\text{calculado}}$ [V]	$B_{\text{teórico}}$ [V] (acero activo)	$B_{\text{teórico}}$ [V] (acero pasivo)
H1	0.125	-0.127	0.0273	0.026	0.052
H2	0.098	-0.135	0.0246	0.026	0.052

Asumiendo corrosión uniforme de la superficie de la armadura, la velocidad de corrosión (VC) en unidades de penetración se calculó aplicando la ley de Faraday a la ecuación (2) como:

$$VC = \frac{K a_w}{n F \delta} i_{\text{corr}} = \alpha i_{\text{corr}} \quad (3)$$

donde $K = 315360$ es un factor de conversión de unidades, F es la constante de Faraday ($F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$), n es el número de moles de electrones transferidos, a_w es el peso atómico en gramos, δ es la densidad del metal en g cm^{-3} , e i_{corr} es la densidad de corriente en $\mu\text{A cm}^{-2}$. El valor de la constante α para el acero es de aproximadamente $\alpha_{\text{Fe}} = 11.6 \mu\text{A}^{-1} \text{ cm}^2 \mu\text{m año}^{-1}$.

A través de los resultados de los ensayos de Rp y con las pendientes de Tafel se obtuvieron las velocidades de corrosión en morteros y hormigones (ec. 3). La Tabla 6 muestra los valores de VC obtenidos para cada material y la intensidad del daño generada por esta como se indicó en la Tabla 4. También se muestran los valores de la constante B usada en el cálculo para cada material. Se debe destacar, que como se comentó oportunamente, las pendientes de Tafel experimentales sólo se obtuvieron para los hormigones H1 y H2.

El valor de la constante B elegido para los morteros y que se utilizó en la ecuación 3 para obtener las VC, surge del análisis de los diagramas de potencial de corrosión presentados en las Figuras 5. Se comentó previamente que los morteros “látex”, LC0 y LC7, mostraban potenciales de corrosión dentro de la zona pasiva, o al menos dentro de la zona de transición ($-350 \text{ mV} < E_{\text{corr}} < -200 \text{ mV}$), en todos los tiempos de exposición de las probetas. Por lo tanto el valor utilizado de la constante B es el de acero en estado pasivo obtenido de la literatura (0.052 V)[16,17]. Por su parte, los morteros

“comunes”, CC0 y CC7, muestran potenciales de corrosión activos y con valores similares a los del hormigón H1, por lo que se utilizó el valor experimental de B obtenido en este (0.273 V).

En la figura 8, se muestran los espectros de impedancia en diagramas de Nyquist y Bode para el hormigón H1.

Tabla 6. Valores de velocidad de corrosión, VC, obtenidos mediante los valores de Rp por barrido de potencial.

Material	VC [$\mu\text{m/año}$]						B [V]
	308 días	340 días	382 días	410 días	528 días	597 días	
Mortero Látex F70 C0	0,71	0,75	0,81	0,57	1,37	1,70	0.052
Mortero Látex F70 C7	0,94	0,97	0,82	0,73	1,56	1,25	0.052
Mortero Común F70 C0	3,89	2,77	2,90	2,18	5,67	3,98	0.027
Mortero Común F70 C7	4,88	4,90	4,54	2,98	7,10	4,09	0.027
Hormigón H1	2,50	2,25	1,98	1,76	1,96	1,93	0.027
Hormigón H2	3,96	6,46	3,76	4,13	3,52	2,48	0.025
Nivel de daño	Muy Leve	Leve	Moderado	Alto	Muy Alto		

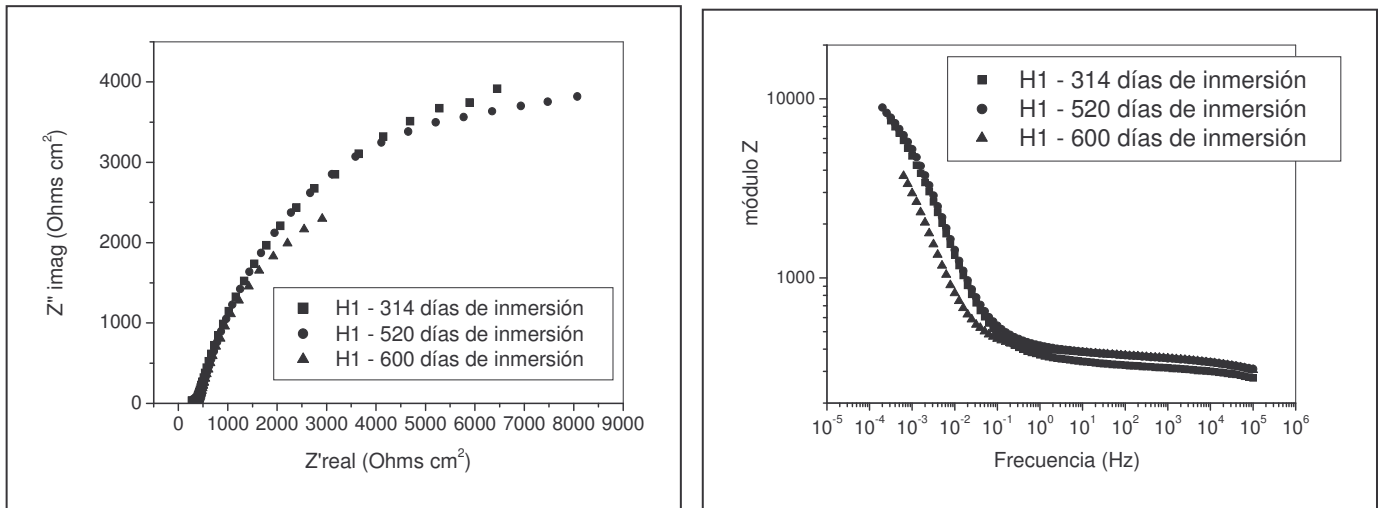


Figura 8. Diagramas de Nyquist (izquierda) y Bode (derecha) para el acero en el hormigón H1 para tres tiempos de exposición de las probetas.

Los ensayos de impedancia electroquímica permitieron realizar una comparación con las técnicas de corriente continua, más precisamente con los ensayos de Rp. En la Tabla 7, se muestra

esta comparación, exponiendo los valores (promedio) de R_p y velocidad de corrosión i_{corr} obtenida, para el hormigón H1 mediante las dos técnicas mencionadas y para tres tiempos de exposición.

Para obtener los valores de R_p en las impedancias electroquímicas, se modelaron los resultados con un circuito equivalente. El circuito que mejor ajusta los valores experimentales obtenidos se muestra en la Figura 9. Este circuito ajusta muy bien la corrosión del acero desnudo (sin recubrimientos de ningún tipo) en el hormigón[18].

Tabla 7. Comparación de valores de R_p e i_{corr} para el acero de refuerzo en el hormigón H1, obtenidos por las técnicas de: barrido de potencial, salto de potencial e impedancia electroquímica de barrido.

Técnica de medición	R_p [Ohms*cm ²]			i_{corr} [μA/cm ²]		
	314 días	520 días	600 días	314 días	520 días	600 días
Rp por barrido de potencial	126520	161180	163760	0,215	0,17	0.166
Rp por salto de potencial	183980	159620	151020	0,15	0,17	0,18
Rp impedancia electroquímica	114310	216000	150000	0.24	0,126	0,182

Las velocidades de corrosión fueron obtenidas de los espectros de impedancia electroquímica mediante el ajuste con un circuito eléctrico tipo Randles, con el componente capacitivo C_{dl} reemplazado por un elemento de fase constante CP_E definido como:

$$CP_E = Y_0 (i - w)^{-n_0}$$

donde w es la frecuencia angular ($w = 2\pi f$), n_0 es un número tal que $< n_0 < 1$ e Y_0 es una constante. Cabe notar que para $n_0 = 1$, CP_E se transforma en un capacitor ideal de placas planas y paralelas[18]. El software utilizado para ajustar las curvas de impedancia permite fijar valores conocidos y obtener por iteración numérica otros parámetros que se desconocen. Aquí, para la resistividad del electrolito, R_0 , se utilizaron los valores medidos en los ensayos de resistividad eléctrica en morteros y hormigones (5.2.1.2) y por el ajuste se obtuvieron los valores de R_p .

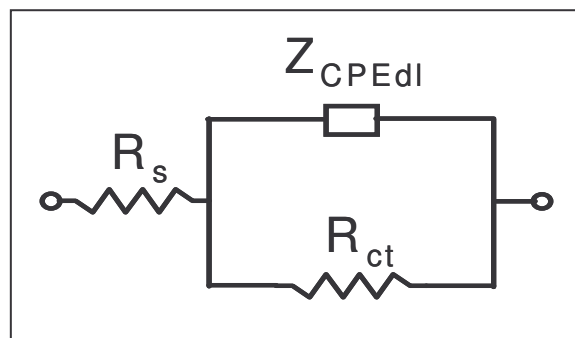


Figura 9. Circuito de Randles modificado con elemento de fase constante Z_{CPEdl} .

La Tabla 8 presenta los resultados del ensayo de porosidad abierta y densidad específica en hormigones y morteros. La figura 10 muestra los resultados del ensayo de flexión y compresión en morteros de reparación.

Tabla 8. Porosidad abierta y densidad en el bulk de morteros y hormigones.

Material	p_a [% volumen]	ρ_b [Kg/dm ³]
LC0	2.9	1.85
LC7	2.5	1.86
CC0	11.4	1.7
CC7	11.2	1.7
H1	10.2	1.6
H2	11.4	1.58

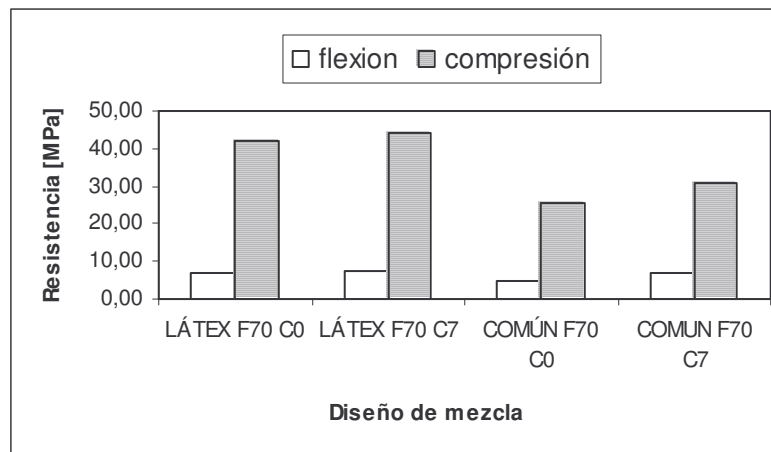


Figura 10. Resistencia a la flexión y compresión en morteros de reparación.

Se debe destacar la superioridad en resistencia mecánica que reflejan los morteros “látex” frente a los morteros “comunes”, tanto en solicitaciones de flexión como de compresión.

En la Tabla 9 se observan los resultados de los ensayos de flexión para obtener el módulo de ruptura (MOR) y la resistencia a la tracción simple por compresión diametral obtenidos para los hormigones H1 y H2, con sus respectivas relaciones agua/cemento. Nótese la buena respuesta a la compresión y los altos valores de módulo de elasticidad de estos hormigones, en particular el H1.

Tabla 9. Resistencia a la flexión y tracción en hormigones a 28 días.

Hormigón	Relación a/c	Flexión [MPa]	Tracción [MPa]	Compresión [MPa]		Módulo [GPa]	
				7 días	28 días	7 días	28 días
H1	0.45	10.16	3.85	7 días	28 días	7 días	28 días
H2	0.6	7.72	2.56	28.1	31.7	38.4	49.6

Los hormigones, en particular el H1, presentan una buena respuesta a las sollicitaciones de flexión en comparación con los morteros. Los bajos valores de resistencia a la tracción son típicos de materiales como el hormigón (frecuentemente del orden del 10 % de la resistencia a la compresión) y de ahí surge su empleo en conjunto con el acero para conformar el hormigón armado.

Discusión de resultados

– Evaluación del estado del refuerzo de acero en morteros de reparación y hormigones

Del análisis de los potenciales de corrosión, se observa una estabilización de los valores a partir de los 300 días de exposición. Estas fluctuaciones en los primeros tiempos pueden atribuirse a los cambios que ocurren durante el período de hidratación. Algo similar sucede con los valores de R_p , ya que en algunas mediciones del acero en el mismo material en el tiempo no se observan diferencias sustanciales. Esto sugiere que a partir de los 300 días, el proceso de corrosión entra en un régimen estacionario, y los cambios se manifiestan a tiempos largos.

Si se analizan los resultados obtenidos en los morteros de reparación, se observa que los morteros con aporte de látex (LC0 y LC7) presentaron resultados favorables en cuanto al grado de deterioro que sufre el acero por la acción de los iones cloruro. Tanto el potencial de corrosión, E_{corr} (Figura 5), como la resistencia a la polarización, R_p (Figura 7), demuestran que el acero dentro de estos morteros sufre un daño por corrosión mínimo y aceptable (Tabla 6). La resistividad eléctrica, ρ , confirma esta respuesta, puesto que los morteros “látex” conforman un electrolito de mediana a baja agresividad (Figura 6), resistente al ingreso de agentes externos como cloruros, agua, CO_2 , etc.

Por su parte los morteros “comunes” están alejados de este comportamiento. Los potenciales de corrosión y los valores de R_p medidos indican que los refuerzos se encuentran en un estado de corrosión activa, confirmado por los valores de velocidad de corrosión VC (Tabla 6). La resistividad eléctrica en este mortero es baja indicando que no provee una protección eficiente a las barras.

Los hormigones H1 y H2 son los que menos protección le confieren al acero, siendo este comportamiento más acentuado en el hormigón de mayor relación a/c. Este último presenta potenciales de corrosión (E_{corr}) muy negativos y valores de R_p bajos en comparación con el H1 (Figuras 5 y 7).

- Resistencia a la polarización: Comparación entre las técnicas utilizadas.

Se propone la utilización de varias técnicas para determinar la resistencia a la polarización de los refuerzos de acero: barrido de potencial, salto de potencial e impedancia electroquímica. Los valores de R_p entre las diferentes técnicas utilizadas son de órdenes de magnitud comparables.

Los ensayos de impedancia no parecen apropiados para realizar en campo. Sin embargo, la técnica puede brindar información inaccesible por las técnicas de corriente continua. Aquí su uso se limitó a obtener valores de R_p mediante el ajuste de un circuito simple. Los resultados obtenidos en las técnicas de impedancia dependen de que el ajuste se realice con un modelo apropiado que represente físicamente el sistema bajo estudio. Entre las empleadas, el R_p salto parece suficientemente simple y confiable.

- Influencia del tiempo de curado de los morteros

Si se comparan morteros de la misma “familia”, esto es morteros “látex” por un lado y morteros “comunes” por otro, se observan resultados interesantes. Si bien los morteros “látex”, LC0 y LC7 no muestran una diferencia marcada en los valores de potencial de corrosión y resistividad (figuras 4 y 6), sí se observan diferencias significativas en los valores R_p , sobre todo a bajos tiempos de exposición (Figura 7). Puede deducirse que debido al incremento en protección que genera el aporte del látex al mortero, el efecto del curado en estos se pierde o no se distingue.

Por su parte, en los morteros CC0 (s/curado) y CC7 (curado a 7 días) tampoco se observan diferencias apreciables.

– Análisis de propiedades físicas y mecánicas

Los resultados de los ensayos de porosidad contribuyen a comprender el efecto del látex. En buen acuerdo con los ensayos electroquímicos, el mortero “látex” resultó ser el material más denso, con una porosidad de alrededor del 3 % (Tabla 8). En los morteros “comunes” la porosidad resulta bastante superior a la de los morteros “látex” (≈ 11 %) y similar a la de los hormigones H1 y H2.

En cuanto a la respuesta mecánica de los morteros y los hormigones, se destaca el incremento en resistencia mecánica que muestran los morteros “látex” sobre los morteros “comunes”, superándolos tanto en resistencia compresiva (en un 30%) como en la resistencia a la flexión (30%). Sin embargo, si el mortero “común” es curado (CC7), estas diferencias se hacen menores. Los hormigones H1 y H2 mostraron una diferencia importante en sus propiedades mecánicas, como lo reflejan los valores de resistencia a la compresión y módulo secante a 7 y 28 días (Tabla 9). Los valores muestran una buena correspondencia con las relaciones a/c y contenido unitario de cemento (CUC) de cada hormigón. El curado por inmersión en agua con cal durante 7 días, seguramente elevó aún más los valores de resistencia alcanzado a las edades de 7 y 28 días. Algo similar reflejan los valores de resistencia a la flexión y tracción, aunque las diferencias entre H1 y H2 se hacen menos notorias.

Conclusiones

- Las técnicas electroquímicas resultaron de gran utilidad para evaluar comparativamente el estado de corrosión de las barras de refuerzo en hormigones y morteros.
- Si bien se evaluó un hormigón de alta prestación, los morteros aditivados con látex son los que proveen al acero una mejor protección contra la corrosión. Este comportamiento parecería estar relacionado con los bajos valores de porosidad propios de estos morteros.
- La comparación entre diferentes técnicas para evaluar resistencia a la polarización (R_p) permitió establecer ventajas y desventajas en relación con su utilización en campo y en laboratorio.
- El aporte de látex a los morteros comúnmente utilizados sobre las armaduras en las reparaciones estructurales confiere protección a los refuerzos de acero y mejora su comportamiento mecánico.

- No se aprecian ventajas al efectuar curado a 7 días sobre morteros. Esto es interesante teniendo en cuenta que los procedimientos de curado consumen tiempo y dinero en las reparaciones, y son difíciles de implementar en la práctica.

Referencias

- [1] M. Vázquez, S. Rosso de Sánchez y W. Morris. Congreso Asociación Argentina de Metales. Sam '97 (1997) Tandil.
- [2] M. Vázquez, S. Rosso de Sánchez y W. Morris. V Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones. CONPAT '99 (1999) Uruguay.
- [3] I-Dulaijan, S. U Ai-Zahrani, M. M. Saricimen, H.Maslehuddin. Cement & Concrete Composites, 24 (2002) 139-149
- [4] A. Rincón, O. Rincón, O. Morón, M Villasmil and R. Fernández. Materials Performance 35 (1996) 55-60
- [5] M. Maslehuddin, M.M. Al-Zaharani, S.U. Al Dulaijan, M. Ibrahim. Cement and Concrete Composites, 25 (2003) 527-537.
- [6] M. Vázquez, W. Morris, S. Rosso de Sánchez y A. Sagües. En: 1^{er} Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires (1998).
- [7] W. Morris, M.Vázquez and S.R. de Sánchez. J. of Mater. Sci., 35 (2000) 1885-1890.
- [8] ASTM C-876, "Standard Test Method for Half-Cell Potential for Uncoated Reinforcing Steel in Concrete". American Society of Testing and Materials, Philadelphia (1987).
- [9] ASTM C642-90, "Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete". American Society Testing Materials, Philadelphia (1990).
- [10] IRAM 1546, "Método de ensayo de Compresión". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1968).
- [11] ASTM C469-94, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression". American Standard Testing Materials, Philadelphia (1994).
- [12] Norma IRAM 1658, HORMIGÓN, "Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral". Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1995).
- [13] ASTM C293-94, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)". American Standard Testing Materials, Philadelphia (1994).
- [14] ASTM C109/C 109M-95, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars". American Standard Testing Materials, Philadelphia (1995).
- [15] W. Morris and M. Vázquez. Corr. Reviews, 20-6 (2002) 469-508.
- [16] C. Andrade, J.A. González, S. Agaba. Brit. Corr. Journal, 3 (1980) 15.
- [17] J. A. Gonzalez y C. Andrade, British Corrosion Journal, Vol. 17, p. 21, 1982.
- [18] W. Morris. Tesis Doctoral: "Durabilidad de hormigón armado expuesto a ambiente marino". Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina (2001).