

DURABILIDAD DEL HORMIGÓN EN AMBIENTE MARINO. VIDA ÚTIL DE DISTINTOS RECUBRIMIENTO DE ARMADURAS.

A.Vico, W. Morris, M. Vázquez

División Corrosión. INTEMA. Universidad Nacional de Mar del Plata. Juan B. Justo 4302. (B7608FDQ) Mar del Plata. Argentina.

e-mail; mvazquez@fi.mdp.edu.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se investigó la incidencia en la durabilidad del hormigón de tres tipos de recubrimientos utilizados comúnmente como esquemas de reparación de estructuras afectadas por corrosión. Estas son: convertidor de óxido (**C**), cinc proyectado (**Z**) y pintura epoxi rica en cinc (**E**). Se prepararon probetas de hormigón conteniendo dos barras de cada tipo de recubrimiento, además de las barras de acero desnudo (**A**) empleadas como testigos. Las probetas fueron expuestas a la intemperie en ambiente urbano (a 3 km de la línea costera) y marino (frente al mar). En base a mediciones de potenciales de circuito abierto (**E_{corr}**), velocidades de corrosión (**VC**), difusión de cloruros y perfiles de carbonatación, se determinaron los tiempos de iniciación (**t₀**) y propagación (**t_p**) correspondientes al modelo de Tuuti. El recubrimiento **C** mostró un **t₀** similar al del acero desnudo y **t_p** mayor en dos órdenes de magnitud. Ambos mostraron cinéticas similares para el proceso corrosión. Para el recubrimiento **Z**, se estimó un tiempo de protección (**t_{pro}**) en lugar de **t₀**, vinculado al período protección catódica que ofrece al acero, en función del espesor y su **VC**. Con el mismo criterio, para el recubrimiento **E**, fue determinado **t_{pro}** en función de parámetros electroquímicos. Estos valores resultaron ser bajos, pero con tiempos **t_p** alto debido a que su **VC** es menor que la del acero desnudo.

Palabras claves

Durabilidad del hormigón, corrosión, recubrimientos anticorrosivos, ambiente marino.

INTRODUCCIÓN

El prematuro deterioro de las estructuras de hormigón armado ha generado varias teorías y modelos para predecir la vida útil de diseño como la vida residual de servicio. Uno de los modelos ampliamente aceptados es el propuesto por Tuuti [1]. Este modelo establece que la vida útil de la estructura está comprendida por un tiempo de iniciación (**t₀**) que abarca el período que transcurre entre la construcción de la estructura y la despasivación, gobernada básicamente por los procesos difusivos de los iones Cl⁻ y del CO₂ atmosférico. Por otra parte se encuentra un período de propagación determinado por la velocidad de corrosión (**VC**) de la armadura donde están involucrados los mecanismos de protección que eventualmente se hayan utilizado. La figura 1 muestra esquemáticamente este modelo.

Como valores límites de deterioro se adoptan distintos criterios, generalmente en función de una reducción admisible de la sección transversal de la armadura. Se los selecciona

desde el punto de vista de la seguridad (desprendimiento de recubrimientos de hormigón) y otro como límite de riesgo estructural [2].

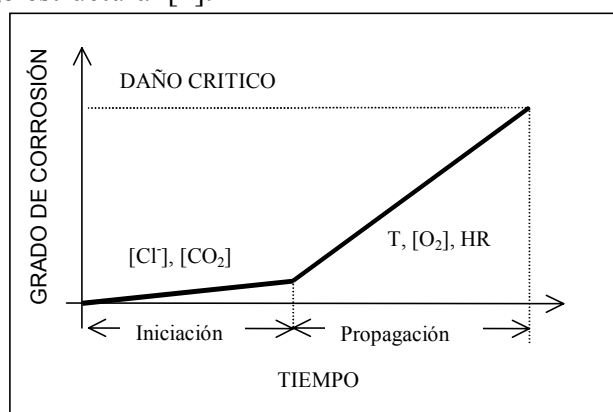


Figura 1. Representación esquemática del modelo de vida útil propuesto por Tuuti indicando los principales factores que afecta a cada período.

PARTE EXPERIMENTAL

Se prepararon ocho probetas de hormigón cilíndricas, con ocho barras de acero cada una, dos para cada tipo de recubrimiento, ubicadas de forma de obtener un espesor de recubrimiento de hormigón de 1,5 cm. Las barras tienen un diámetro (ϕ) de 10 mm y presentan un área expuesta de 40 cm² (ver figura 2).

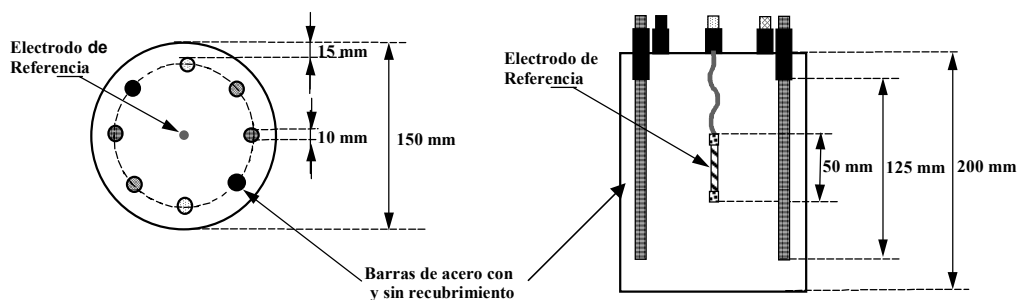


Figura 2. Esquema de las probetas de hormigón con barras de acero empleadas en el estudio.

Dos grupos de 4 probetas, fueron colocadas a la intemperie en distintas condiciones de exposición. Un grupo se emplazó a menos de 100 metros de la costa (ambiente marino "M") y el otro grupo a 3 km de la línea costera (ambiente urbano "U").

Se emplearon barras de acero para la construcción ADN420. La preparación y aplicación de los recubrimientos responden a las especificaciones indicadas por los fabricantes. La naturaleza, tipo y composición de cada sistema protector se detallan en la referencia [6]. Los espesores promedios de los distintos recubrimientos utilizados fueron de 150 mm para el convertidor de óxido (C), 350 mm para el epoxi rico en cinc (E) y 50 mm para el cinc proyectado (Z).

La dosificación de la mezcla y los materiales empleados es representativa de las normalmente encontradas en las estructuras de hormigón ubicadas sobre el litoral marítimo de la provincia de Buenos Aires donde el empleo de *arena de mar* es muy frecuente [3]. Las relaciones agua-cemento (a/c) generalmente recomendadas varían entre 0,40 y 0,55 [4]. Sin embargo, en la práctica, se emplean frecuentemente valores de a/c de 0,7 o aún mayores [5].

Se utilizaron dos tipos de mezclas de hormigón, una donde se utilizó como agregado fino arena de río contaminada con 1,5 % p/p de cloruros con respecto al cemento (mezcla denominada "C") y otra con arena de río sin contaminar (mezcla denominada "S"). En todos los casos se utilizó como agregado grueso, piedra partida con un tamaño máximo de agregado (TMA) de 12,7 mm (1/2") y se empleó cemento portland normal (Tipo I) . El contenido de cemento fue de 300 kg/m³ de hormigón y una relación a/c de 0,6. Las probetas fueron curadas por 7 días a 100 % HR.

Ensayos electroquímicos y eléctricos

El avance de la corrosión se evaluó mediante el seguimiento en el tiempo de parámetros electroquímicos tales como el potencial de corrosión (**E_{corr}**) y la resistencia a la polarización (**R_p**) [6]. Las mediciones de E_{corr} de las barras fueron efectuadas empleando un electrodo interno de referencia (**EIR**) y fueron luego corregidas con respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ sat. (**CSE**). Los ensayos de **R_p** se efectuaron mediante barridos de ± 10 mV respecto a **E_{corr}**, a una velocidad de barrido de 0,1 mV/s. Se calculó la velocidad de corrosión (**VC**) del acero (en µm/año), a partir de los valores de **R_p**, mediante la ecuación de Stearn-Geary, asumiendo que la corrosión del acero ocurre en forma uniforme [7].

Potenciales de corrosión (**E_{corr}**) y velocidad de corrosión (**VC**)

En la tabla 1 se muestran los potenciales de corrosión (**E_{corr}**) promedio medidos respecto al **CSE** a los 140, 310, 423 y 518 días. Estos valores son representativos y fueron extraídos del monitoreo efectuado durante 518 días (con lecturas cada 15 días) a partir del momento en que fueron coladas las probetas.

Tabla 1. Potenciales de corrosión (**E_{corr}**) para cada mezcla y condición de exposición.

| Barra | Ambiente | Mezcla | E_{corr} (mV) | | | |
|------------------------|----------|--------|------------------------------|----------|----------|----------|
| | | | 140 días | 310 días | 423 días | 518 días |
| A | Urbano | S | -173 | -131 | -131 | -153 |
| | | C | -428 | -295 | -255 | -318 |
| | Marino | S | -178 | -173 | -145 | -217 |
| | | C | -352 | -322 | -268 | -330 |
| C | Urbano | S | -94 | -33 | -74 | -22 |
| | | C | -384 | -351 | -288 | -335 |
| | Marino | S | -101 | -102 | -29 | -60 |
| | | C | -392 | -378 | -302 | -332 |
| E | Urbano | S | -322 | -153 | -166 | -209 |
| | | C | -505 | -396 | -242 | -384 |
| | Marino | S | -362 | -269 | -179 | -253 |
| | | C | -540 | -415 | -321 | -348 |
| Z | Urbano | S | -527 | -420 | -434 | -450 |
| | | C | -549 | -420 | -358 | -278 |
| | Marino | S | -502 | -412 | -442 | -582 |
| | | C | -544 | -453 | -396 | -471 |
| Estado de corrosión(*) | | Pasivo | Transición | | Activo | |
| Riesgo | | Bajo | Moderado | | Alto | |

(*) ASTM C 876-91 "Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete"

A partir de las mediciones de **R_p** se calcularon las velocidades de corrosión para cada condición de exposición y diseño de mezcla empleado. Los valores de **VC** que se muestran en la tabla 2, se calcularon para 310, 423 y 518 días, como también los valores de la constante **B** de la relación de Stearn-Geary utilizados en cada caso[7]. En la tabla se indican con la escala de grises el nivel de daño según lo recomiendan Andrade y col. [8].

Tabla 2. Velocidades de corrosión (**VC**) para en cada diseño de mezcla y condición de exposición. $B = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.303 \cdot (\beta_a + \beta_c)}$, donde β_a y β_c son las pendientes de Tafel anódica y catódicas, respectivamente

| Barra | Ambiente | Mezcla | VC ($\mu\text{m/año}$) | | | B (V) |
|----------------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|-------|
| | | | 310 días | 423 días | 518 días | |
| A | Urbano | S | 0,385 | 0,678 | 1,392 | 0,052 |
| | | C | 13,933 | 30,209 | 34,993 | 0,052 |
| | Marino | S | 1,521 | 1,847 | 4,437 | 0,052 |
| | | C | 18,601 | 17,727 | 22,626 | 0,052 |
| C | Urbano | S | 0,155 | 0,077 | 0,283 | 0,052 |
| | | C | 5,162 | 4,602 | 7,551 | 0,052 |
| | Marino | S | 0,045 | 0,048 | 0,303 | 0,052 |
| | | C | 7,991 | 5,614 | 11,854 | 0,052 |
| E | Urbano | S | 1,041 | 0,573 | 0,711 | 0,052 |
| | | C | 2,299 | 1,336 | 2,712 | 0,013 |
| | Marino | S | 0,605 | 0,150 | 0,336 | 0,052 |
| | | C | 2,776 | 2,364 | 3,318 | 0,013 |
| Z | Urbano | S | 1,218 | 0,859 | 0,465 | 0,052 |
| | | C | 2,852 | 2,267 | 3,990 | 0,013 |
| | Marino | S | 1,185 | 1,372 | 0,908 | 0,052 |
| | | C | 1,855 | 1,518 | 1,912 | 0,013 |
| Nivel de daño: | | Muy leve | Leve | Moderado | Alto | |

Determinación de los coeficientes de difusión de iones Cl⁻ (**Def**) y carbonación (**Kc**)

La estimación del coeficiente de difusión efectivo de cloruros (**Def**) fue realizada mediante el ajuste matemático de los valores experimentales mediante la solución de la segunda ley de Fick [9]. Los valores de concentración de cloruros fueron determinados en las muestras **S** (sin cloruros) luego de un período de exposición de 440 días (1,2 años) para las distintas condiciones de exposición (intemperie en ambiente urbano y marino). La tabla 3 muestra los valores de coeficiente efectivo de difusión de cloruros (**Def**), concentración superficial (**Cs**) y tasa de acumulación superficial de cloruros (**ks**) calculados a partir del ajuste matemático de los resultados experimentales.

Tabla 3. Valores de los coeficientes de difusión de cloruros y concentración superficial de las mezclas **S** expuestas en ambiente urbano y marino.

| Ambiente | Def [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] | Cs [% p/p] | ks [% p/p/año] |
|----------|---|-------------------|-----------------------|
| Urbano | 2.534×10^{-4} | 0.22 | 0.1 |
| Marino | 2.329×10^{-4} | 0.29 | 0.158 |

Los valores de **Def** reportados en otros trabajos para condiciones de exposición y diseños de mezcla similares, varían desde $1 \cdot 10^{-4}$ a $10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [10].

El valor de **Kc** se determinó a partir de las mediciones de la profundidad del frente de carbonatación (**xc**) en las probetas de hormigón de mezcla **S** expuestas a la intemperie en ambiente urbano y marino. El modelo propuesto para predecir el avance del frente de carbonatación es el de variación cuadrática: $\mathbf{xc} = \mathbf{Kc} \cdot \mathbf{t}^{1/2}$, donde **t** es el tiempo en años y **Kc** es expresado en $\text{m}/\text{s}^{1/2}$ [11]. La tabla 4 muestra los valores de los coeficientes de carbonatación (**Kc**) calculados para un tiempo de exposición de 500 días (1,37 años).

Tabla 4. Valores de **Kc** estimados para las distintas condiciones de exposición.

| Ambiente | Coeficiente de carbonatación, Kc en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$ | | |
|----------|---|-----------------------|-----------------------|
| | Mínimo | Máximo | Promedio |
| Urbano | $1,67 \times 10^{-6}$ | $2,89 \times 10^{-6}$ | $2,28 \times 10^{-6}$ |
| Marino | $0,61 \times 10^{-6}$ | $1,22 \times 10^{-6}$ | $0,92 \times 10^{-6}$ |

Los valores hallados en la literatura abarcan un muy amplio intervalo de coeficientes de de carbonatación que van desde 3×10^{-8} hasta más de $3 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1/2}$ [11].

Vida útil de las estructuras de hormigón armado

El modelo propuesto por Tuuti permite estimar la vida útil de una estructura que está corroyéndose dividiendo el proceso de corrosión en dos partes: 1º) el período de iniciación en el cual ingresan a la estructura los agentes agresivos a través del recubrimiento de hormigón y 2º) un período de propagación en el cual se asume que el acero se ha despasivado y el proceso de corrosión activa se ha iniciado.

En este modelo elemental se toman varias consideraciones: a) el período de iniciación se lo asume igual al tiempo requerido, que se considera conocido, para que los agentes agresivos alcancen una concentración crítica en la superficie de la barra, en el caso del ion cloruro, o se produzca la disminución del pH debido al avance del frente carbonatado, b) el proceso de corrosión activa del acero se asume que ocurre de forma generalizada y a una velocidad constante y c) los límites admisibles de deterioro se determinan a partir de distintos criterios que estiman el nivel de daño alcanzado en la estructura de hormigón. En este trabajo se toma como reducción máxima admisible, al 25 % de la sección del acero, cantidad que se considera que puede afectar su capacidad de carga. Por otra parte se adopta una reducción de hasta un 5% (aún en presencia de fisuras y desprendimientos) como indicador temprano del deterioro de la estructura.

Para el caso de las estructuras en las cuales se ha aplicado algún tipo de recubrimiento sobre las barras de acero se contempla un tiempo de protección **t_{pro}** para las barras **Z** y **E**. Mientras que para las barras **A** y **C** se utilizó el modelo original sin contemplar **t_{pro}**.

En el caso del convertidor se consideró que el tiempo de iniciación está determinado por los mismos factores que producen la despasivación del acero desnudo [6], dado que si se observa la tabla 2 puede observarse que, si bien las velocidades de corrosión para las barras **C** son menores hasta en un orden de magnitud respecto a las barras **A**, estas manifiestan un aumento paulatino de la velocidad de corrosión similar al de las barras de acero desnudo. Además los **E_{corr}**, independientemente de las condiciones de exposición y del grado de contaminación de cloruros, presentan valores similares al de las barras **A**.

Para las barras **E** se tomó como criterio de protección al tiempo en el cual el recubrimiento otorga una protección catódica que ofrece la adición de polvo de cinc [11]. A partir del momento en el cual el recubrimiento deje de otorgar esta protección se considera que sigue ofreciendo un efecto barrera similar al que ofrece el convertidor y por lo tanto debe considerarse el efecto de los agentes agresivos. Por lo tanto el tiempo de iniciación estará determinado por el tiempo máximo en que este ofrece protección catódica al acero o en el caso de ser mayor, se tomará el tiempo mínimo que toman los agentes agresivos en alcanzar la barra de refuerzo.

Para el recubrimiento del cinc proyectado, el tiempo de protección será igual al requerido para que se consuma el 50 % del material aportado a la **VC** obtenida a los 518 días (el porcentaje se adoptó con un criterio de seguridad debido a las irregularidades en los espesores de estos recubrimientos). El **tpro** se computa a partir del momento en que se ponen en contacto el cinc con el sustrato, el cual se polarizará debido a la cupla galvánica que se establece con el acero [12].

En la tabla 5 se muestran los valores de tiempo de iniciación (**tocl0.2**) debido a la difusión de cloruros para una concentración crítica de 0,2 % (concentración crítica determinada a partir de correlacionar la concentración de iones cloruro en la superficie de la barra y **VC**, para 1 $\mu\text{m/año}$). En la misma tabla se muestra el tiempo de iniciación necesario para el avance del frente de carbonatación (**toc**) para la mezcla **S** en ambas condiciones de exposición. En el caso de la mezcla **C** donde el contenido de iones cloruro supera el valor umbral de 0,2 % el tiempo de iniciación es nulo. En la tabla 6 se indican los tiempos de protección (**tpro**) que ofrecen los recubrimientos **Z** y **E** para las dos condiciones de exposición y grados de contaminación.

Tabla 5. Tiempo de iniciación debido al ingreso de Cl^- y CO_2 para mezcla **S** (sin cloruros)

| Condición de exposición | Tiempo de iniciación (años) | |
|-------------------------|-----------------------------|------------|
| | Tocl0.2 | Toc |
| Urbano | 1,1 | 1,4 |
| Marino | 0,7 | 8,4 |

Tabla 6. Tiempo de protección (**tpro**) para el cinc (**Z**) y la pintura zinc rich (**E**).

| Mezcla | Condición exposición | tpro (años) | |
|------------------|-----------------------|--------------------|----------|
| | | Z | E |
| S (sin cloruros) | Urbano (tsu) | 53 | 0.8 |
| | Marino (tsm) | 6 | 1 |
| C (con cloruros) | Urbano (tu) | 28 | 0,9 |
| | Marino (cm) | 13 | 1 |

En la figura 3 se muestran los esquemas de vida útil determinados para cada tipo de recubrimiento contemplando los tiempos de iniciación y de protección mostrados en las tablas 5 y 6.

En la tabla 7 se muestran los tiempos de iniciación, de propagación (o vida residual) y duración de la vida útil (tiempo total) para el acero y los tres recubrimientos, para cada condición de exposición y distintos contenidos de cloruros de la mezcla.

Jornadas SAM - CONAMET - AAS 2001

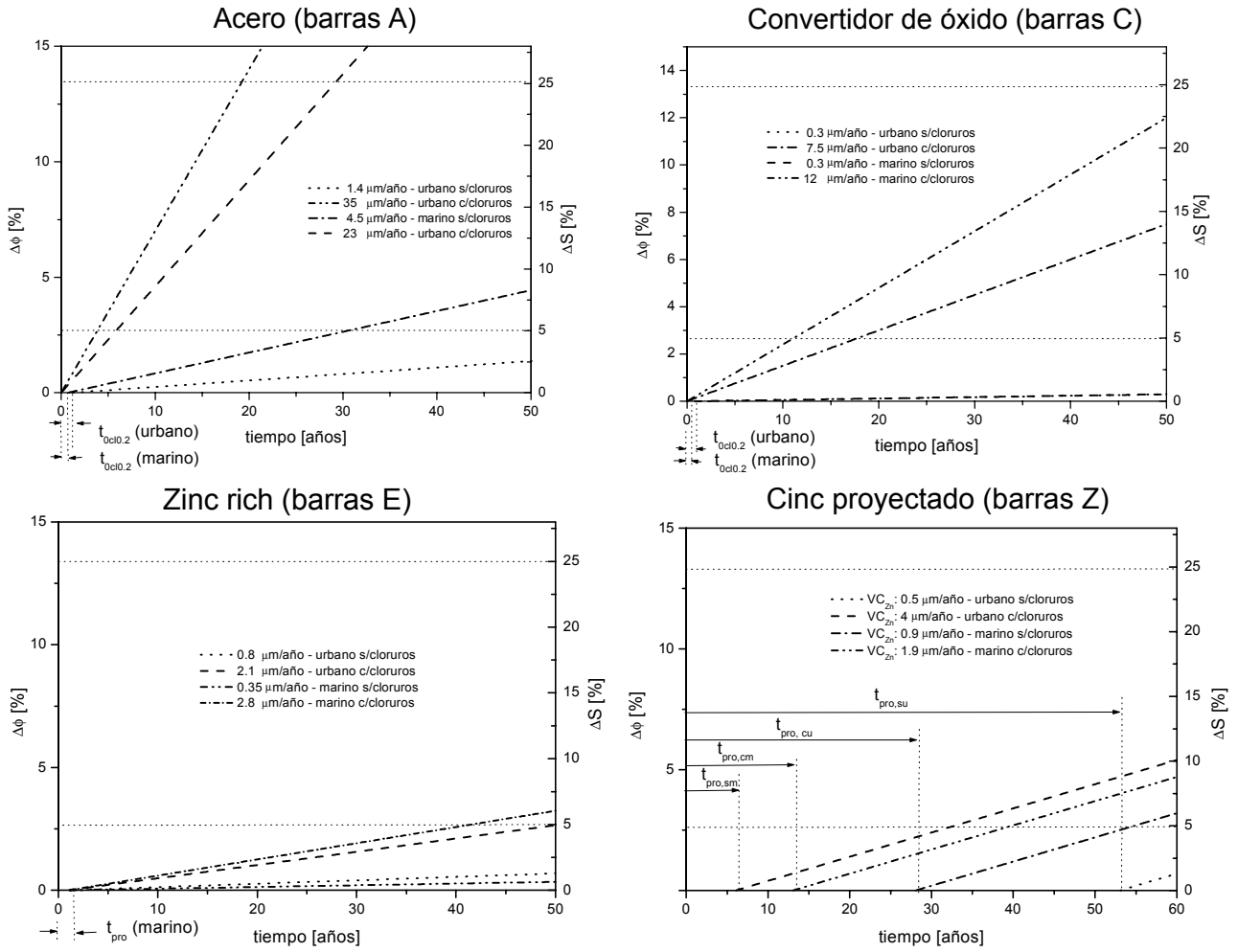


Figura 3. Modelo de vida útil para las barras A, C, E y Z.

Tabla 7. Valores de vida útil para los distintos tipos de recubrimientos.

| Barra | Mezcla | Ambiente | Vida útil (años) | | | |
|-------|--------|----------|------------------|------|------------|------------|
| | | | To | Tpro | tp (5%red) | Tp(25%red) |
| A | S | Urbano | 1,1 | - | 91 | >100 |
| | | Marino | 0,7 | - | 28 | >100 |
| C | C | Urbano | 0 | - | 5,5 | 29 |
| | | Marino | 0 | - | 3.6 | 19 |
| C | S | Urbano | 1,1 | - | >100 | - |
| | | Marino | 0,7 | - | >100 | - |
| | C | Urbano | 0 | - | 17 | 89 |
| | | Marino | 0 | - | 11 | 56 |
| E | S | Urbano | 1,1 | - | >100 | - |
| | | Marino | - | 1 | >100 | - |
| | C | Urbano | - | 1 | 48 | >100 |
| | | Marino | - | 1 | 40 | >100 |
| Z | S | Urbano | - | 53 | 78 | >100 (*) |
| | | Marino | - | 6 | 31 | >100 (*) |
| | C | Urbano | - | 28 | 53 | >100 (*) |
| | | Marino | - | 13 | 38 | >100 (*) |

(*) se estimó una velocidad promedio de corrosión del acero de 5 μm/año.

CONCLUSIONES

Si se toma como criterio de evaluación una reducción de la sección transversal del refuerzo inferior al 25 %, todos los modelos predicen una vida útil aceptable de la estructura, salvo para las barras A y C con diseño de mezcla C (con iones cloruro), para ambas condiciones de exposición.

Cuando se evalúan estos modelos respecto a una reducción admisible de ≤ 5 %, las barras A y C en la mezcla C, muestran una disminución importante en su vida residual, sobre todo si son expuestas al ambiente marino.

Las barras C mejoran la vida residual en contacto con la mezcla S en ambiente marino, observándose que en ambiente urbano el hormigón por si solo ofrece una buena protección al acero desnudo.

Es importante destacar el rol que cumple el cinc proyectado al retrasar el comienzo de la propagación, si bien las condiciones de exposición y el contenido de Cl^- influyen en la duración del recubrimiento, es posible dimensionar el espesor adecuado a las necesidades.

La pintura epoxi zinc rich usada en este trabajo mostró poca incidencia del tiempo de protección, pero con velocidades de corrosión más bajas que las de la barra desnuda y con convertidor de óxido.

Por último, el modelo de Tuutti además de predecir la vida útil de la estructura, permite estimar la vida útil de los recubrimientos. De esta manera se puede planificar, ya sea, la frecuencia de monitoreo de los procesos corrosivos en la estructura y también determinar los tiempos de intervención en aquellos casos en que se prevea una nueva reparación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Tuutti, "Corrosion of steel in concrete", CBI fo 4.82, Sweedish Cement and Concrete Reserch Institute, Stockholm 1982.
2. "Assessment of concrete structures and design procedures for udgrading" CEB, Bulletin No 162, pp. 87-90, 1983.
2. Morris, Vázquez, Rosso de Sanchez, "Patologías del hormigón armado expuesto al ambiente marino" 1er. taller Nac. sobre Mat. para la Construcción" SAM'97, Bs As, 1997
4. "Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado y pretensado" CIRSOC, INTI, tomo 1, pp.46-61, 1982.
5. Morris, Vázquez, R de Sánchez, "Corrosión en estructuras de hormigón de armado en ambiente marino", 1er. Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, Bs As, 1998.
6. Morris, Vázquez, R. de Sánchez, "Efficiency of coatings applied on rebars in concrete", Journal of Materials Science, 35 pp. 1885-1890, 2000.
7. Stern, Geary, Journal of Electrochemical Society, vol 104, No 1 pp. 56-63, 1957.
8. Andrade, Castelo, Alonso, González, "Determiration of corrosion rate of steel embedded in concrete by the polarization resistance methods" ASTM STP 906, Philadelphia, 1986.
9. Morris, Vico, Vázquez, R de Sánchez, "Corrosion of reinforcing Steel evaluated by means of concrete resistivity measurements" Corrosion Science, Elseiver, 2001.
10. Ho, Lewis, "Carbonation of concrete" Cement. and Concrete Reserch, v 17, 1987
11. Abreu, Izquierdo, Merino, Novoa, Pérez,"A new approach to the determiration of athodic protection period in zinc-rich paints" Corrosion NACE International, v. 55, 1999.
12. "Cathodic Protection of reinforcing Steel in atmospherical expoced concrete structures" NACE Standard Recommended Practice RPO 290-90, Houston, 1990.