

NIVEL DE CONFIABILIDAD DE LA VIDA ÚTIL PARA EXPOSICIÓN A CLORURO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO DISEÑADAS SEGÚN REGLAMENTACIÓN ARGENTINA

L.R. Santillán¹, S. Keßler², S. Sommadossi³, Y.A. Villagrán-Zaccardi^{1,4}

¹ LEMIT, CONICET, La Plata, Argentina.

² Helmut Schmidt University, Hamburgo, Alemania.

³ IITCI CONICET-UNCo, Neuquén, Argentina.

⁴ Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, Gante, Bélgica.

RESUMEN

El diseño de estructuras de hormigón armado es regulado en Argentina por el Reglamento CIRSOC 201-2005. El mismo establece, según el tipo de exposición de la estructura, lineamientos básicos de diseño que permiten una vida útil de servicio de 50 años (y períodos mayores para obras especiales). Por otro lado, los modelos de estimación probabilística de vida útil permiten realizar una valoración de la confiabilidad del período de servicio estimado para la estructura, según parámetros vinculados al tipo de exposición y las propiedades físicas y geométricas del elemento. En este trabajo se realiza una estimación de la confiabilidad de la vida útil estipulada en estructuras hipotéticas de hormigón armado, diseñadas según CIRSOC 201-2005 y ubicadas en tres diferentes puntos geográficos marítimos del territorio nacional (y tres tipos de exposición). El objetivo de este trabajo verificar la confiabilidad de vida útil que brindan las prescripciones del reglamento argentino.

Palabras clave: vida útil, durabilidad, diseño, corrosión, cloruros.

INTRODUCCIÓN

El diseño de hormigón por durabilidad es una práctica esencial para la sustentabilidad de la construcción. Desde el punto de vista económico, los costos asociados a la elaboración de una mezcla que cumpla con los requerimientos prescriptivos son exponencialmente inferiores a los costos que representaría una disminución significativa en la vida útil de la estructura, que resultan en gastos de reparación o reconstrucción [1]. Desde el punto de vista ambiental, la mayor durabilidad de las estructuras resulta en un menor consumo de materia prima y energía [2].

El diseño por durabilidad ha sido incorporado en todos los reglamentos del mundo, y en la Argentina es especificado por el reglamento CIRSOC 201 [3] (Capítulo 2). En el mismo se establecen las prescripciones para el diseño de un hormigón con una vida útil de servicio de 50 años, según las condiciones ambientales del emplazamiento del mismo.

Uno de los fenómenos habituales en los procesos de deterioro del hormigón en ambiente marino es el de corrosión en armaduras por ingreso de cloruro. Este tipo de condición se presenta, además de en el ambiente marino, en obras industriales específicas que manipulen cloruro. El Reglamento CIRSOC 201 prescribe una relación a/c máxima, y una

resistencia especificada mínima para un hormigón expuesto a este tipo de ambientes, garantizando de esta manera una porosidad baja en el hormigón que significaría una menor tasa de ingreso de iones cloruro a la región de las armaduras. También incrementa en un 50 % el recubrimiento de las armaduras, extendiendo así el tiempo necesario para que los iones cloruro alcancen la profundidad de las armaduras. Un aspecto no muy considerado es el del tipo de cemento. Este aspecto es omitido en el Reglamento CIRSOC 201 ya que no se hace diferenciación respecto al impacto que el tipo de cemento puede tener sobre la estructura en ambiente con cloruro. El diseño semi-prescriptivo establecido en CIRSOC 201 puede apenas recién comenzar a mostrar resultados de su aplicación construidas desde su implementación, pero la efectividad del reglamento no puede aún comprobarse por datos de campo en Argentina.

Con una visión prestacional, la estimación de la vida útil de las estructuras puede ser calculada mediante modelos matemáticos ampliamente divulgados en la bibliografía. Los modelos determinísticos originalmente planteados vienen siendo desplazados por modelos probabilísticos que estiman una probabilidad de falla y establecen límites aceptables para la misma. El nivel de confiabilidad es un parámetro que estadísticamente calcula el tiempo en el que la probabilidad de iniciación del proceso de corrosión es superior a un valor crítico. Las ecuaciones diferenciales establecidas en el fib Bulletin 76 [4] permiten estimar el nivel de confiabilidad de estructuras de hormigón teniendo en cuenta propiedades del material y características de la exposición, en función del tiempo.

En este trabajo se realizaron estimaciones del nivel de confiabilidad de estructuras de hormigón supuestas, diseñadas con las prescripciones del Reglamento Argentino. Se realizaron cálculos en hormigones expuestos en los 3 niveles de exposición marina, ubicados en 3 puntos geográficos del territorio nacional. Los resultados muestran un elevado nivel de confiabilidad de las estructuras aún para periodos de vida útil mayor a 50 años, y sientan un punto de referencia para la profundización de los criterios establecidos en el reglamento.

METODOLOGÍA

Datos

Se evaluaron casos en los 3 niveles de exposición de ambiente marino especificados en el Reglamento CIRSOC 201 [3]. Se propusieron entonces tres casos, ubicados en Mar del Plata (H1, H2 y H3), en distintas distancias respecto a la línea de costa marítima (Tabla 1), y diseñados según las prescripciones del Reglamento. Luego se propusieron dos casos más, en grado de exposición M3 (CIRSOC 201), de estructuras situadas en las localidades de Ingeniero White (Buenos Aires) y Punta Loyola (Santa Cruz) (Tabla 2). Finalmente se evaluaron tres casos más (Tabla 3), en los cuales se realizaron variaciones en los parámetros de diseño tanto en el material (cambio del tipo de cemento y de la relación a/c) como en la disposición geométrica de las armaduras (espesor de recubrimiento). Todos estos casos fueron supuestos para la ciudad de Mar del Plata (comparables a H3).

En la Tabla 4 se muestran los parámetros de entrada seleccionados para cada caso de estudio. Los valores para el coeficiente de difusión fueron tomados de la base empírica del fib Bulletin 76 [4] para hormigones con la relación a/c establecida en cada caso. El coeficiente de envejecimiento (α) fue adoptado según el tipo de cemento seleccionado. Para los casos H1, H2, H3, I3 y J3, se adoptó un cemento CPC que es el tipo de cemento más comercializado en nuestro país. En ese caso se consideró un factor de envejecimiento según los estudios de campo publicados en [8]. Para los casos H4, H5 y H6, se consideró un cemento CPN por lo que el factor de envejecimiento fue adoptado según la base empírica del fib Bulletin 76 [4]. El parámetro t_0 fue adoptado para períodos habituales de

curado (28 d). Los valores de temperatura según la región geográfica fueron tomados de registros abiertos de datos climatológicos disponibles en internet [5].

Tabla 1: Casos de estudio según nivel de exposición.

	Nivel de exposición		
	M1	M2	M3
	> 1 km LM	< 1 km LM	Zona de fluctuación
Casos	H1	H2	H3
Tipo de cemento	CPC	CPC	CPC
Prescripciones CIRSOC 201			
Relación a/c máxima	0,50	0,45	0,40
f'c mínima, MPa	30	35	40
Recubrimiento, mm	45	45	45

Tabla 2: Casos de estudio según ubicación geográfica.

Ubicación	Ubicación geográfica		
	Mar del Plata	Ingeniero White	Punta Loyola
Casos	H3	I3	J3
Tipo de cemento	CPC	CPC	CPC
Relación a/c máxima	0,40	0,40	0,40
f'c mínima, MPa	40	40	40
Recubrimiento, mm	45	45	45

Tabla 3: Casos de estudio según factores de diseño

Casos	Factores de diseño			
	H3	H4	H5	H6
Tipo de cemento	CPC	CPN	CPN	CPN
Relación a/c máxima	0,40	0,40	0,50	0,40
f'c mínima, MPa	40	40	40	40
Recubrimiento, mm	45	45	45	20

Respecto a la concentración superficial de cloruros, para los casos correspondientes a Mar del Plata e Ingeniero White, las mismas fueron obtenidas de datos publicados en la bibliografía nacional [6-9]. Para el caso ubicado en Punta Loyola (J3), esta información no se encuentra debidamente cuantificada en la literatura, por lo que se consideró una concentración igual a la encontrada en Mar del Plata. Esta decisión es conservadora, debido a que es sabido que en la costa Patagónica existe una menor deposición de cloruro, debido a la menor salinidad del agua y menor incidencia de vientos marinos conteniendo bruma marina. Sin embargo, esta situación pone en evidencia la importancia de realizar futuros estudios de campo en diferentes puntos del país.

Finalmente, la longitud de la zona de convección depende de la posición de la estructura respecto al agua de mar, y el parámetro c_{nom} , que corresponde al espesor de recubrimiento fue adoptado según indica el reglamento CIRSOC 201, menos en el caso H6 en el cual se consideró un espesor de recubrimiento deficiente por errores constructivos.

Tabla 4: Parámetros de entrada para cálculo matemático (detallado en la sección siguiente: Cálculo numérico).

Param.	D_{RCM} (t_0)	α	t_0	T_{ref}	T_{real}	b_e	$C_{s,0}/$ $C_{s,\Delta x}$	Δx	C_{crit}	C_{nom}
Unidad	10^{-12} .m ² /s	-	años	°K	°K	°K	%/c [peso]	mm	%/c [peso]	mm
Dist./ Caso	Norm. μ (σ)	Beta $\mu \sigma$ (a b)	Cons. μ	Cons. μ	Norm. μ (σ)	Norm. μ (σ)	LogN. μ (σ)	Beta $\mu \sigma$ (a b)	Beta $\mu \sigma$ (a b)	Norm. $\mu \sigma$ (12)
H1	15,8 (3,2)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	288 (4)	4800 (700)	0,5 0,25	10 5 (0 50)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
H2	10,0 (2,0)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	288 (4)	4800 (700)	0,9 0,45	0 0 (0 0)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
H3	8,9 (1,8)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	288 (4)	4800 (700)	4,0 1,8	0 0 (0 09)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
I1	15,8 (3,2)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	289 (6)	4800 (700)	0,3 0,15	10 5 (0 50)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
I2	10,0 (2,0)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	289 (6)	4800 (700)	0,6 0,45	0 0 (0 0)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
I3	8,9 (1,8)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	289 (6)	4800 (700)	6,0 2,7	0 0 (0 0)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
J1	15,8 (3,2)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	280 (4)	4800 (700)	5,0 2,25	10 5 (0 50)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
J2	10,0 (2,0)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	280 (4)	4800 (700)	0,2 0,1	0 0 (0 0)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
J3	8,9 (1,8)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	280 (4)	4800 (700)	0,1 0,05	0 0 (0 0)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
H4	8,9 (1,8)	0,20 0,2 (0 1)	0,076	293	288 (4)	4800 (700)	0,5 0,25	10 5 (0 50)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
H5	15,8 (3,2)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	288 (4)	4800 (700)	4,0 1,8	0 0 (0 09)	0,6 0,15 (0,2 2)	45 (12)
H6	15,8 (3,2)	0,56 0,2 (0 1)	0,076	293	288 (4)	4800 (700)	4,0 1,8	0 0 (0 09)	0,6 0,15 (0,2 2)	20 (6)

Cálculo numérico

El modelo para predicción de vida útil propuesto por el fib Bulletin 76 [4] consiste en la aplicación de una solución particular de la segunda ley de difusión de Fick, considerando ciertas condiciones iniciales y de borde (ecuación 1), donde la concentración, en un tiempo t y profundidad x , es igual a la concentración inicial más la generada por el proceso de difusión. En este segundo término influyen condiciones ambientales, como la concentración de cloruro en la superficie del material, y el coeficiente de difusión del hormigón, que se encuentra fuertemente vinculado a la porosidad del mismo.

$$C(x, t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right] \quad (1)$$

- C(x,t): contenido de cloruro en función a la profundidad y tiempo [%/c]
- C₀: contenido inicial de cloruro [%/c]
- C_{s,Δx}: contenido de cloro en al final de la zona de convección Δx [%/c]
- Δx: profundidad de la zona de convección [mm]
- x: profundidad del contenido de cloruro determinado [mm]
- t: tiempo [a]
- D_{app}(t): coeficiente de difusión aparente, ecuación (2)

El coeficiente de difusión aparente (ecuación 2) se estima a partir del coeficiente de difusión determinado mediante el método RCM (*rapid chloride migration test*) y el factor de envejecimiento en el tiempo relacionados con la actividad puzolánica del material

cementicio (es decir, depende del tipo de cemento). Además, para la traspolación de los valores del laboratorio al campo se consideran factores que afectan al coeficiente en general, como por ejemplo la temperatura ambiente (ecuación 3)

$$D_{app}(t) = k_e \cdot D_{RCM}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^{\alpha_{RCM}} \quad (2)$$

$D_{RCM}(t_0)$: coeficiente de migración de cloruro en el tiempo de referencia [m²/s]
 t_0 : tiempo en el que se efectúa el RCM [a]
 α_{RCM} : factor de envejecimiento [-]
 k_e : factor de temperatura ambiente [-], ecuación (3)

$$k_e = \exp \left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) - \left(\frac{1}{T_{real}} \right) \right) \quad (3)$$

b_e : coeficiente de temperatura [K]
 T_{ref} : temperatura de referencia [K]
 T_{real} : temperatura del elemento estructural o del aire [K]

Finalmente, la ecuación 4 describe como se obtiene el factor de confiabilidad de la estructura, tomando como criterio de falla cuando la diferencia es inferior a cero, lo cual indicaría que el proceso de corrosión ha iniciado al tiempo t .

$$g(X, t) = C_{crit} - C(c, t) \quad (4)$$

C_{crit} : contenido de cloruros crítico en que se despasivan las armaduras
 $C(c, t)$: contenido de cloruros en la profundidad del recubrimiento (c) en el tiempo t

El factor de confiabilidad indica la probabilidad de que se despasiven las armaduras, siendo más segura la estructura cuanto más alto es este factor. La norma ISO 2394 [10] establece un valor de 1,5 como umbral de confiabilidad, mientras que el *fib bulletin* 34 [11] establece un valor de 1,3.

Todos los calculos probabilisticos estaban realizados por el programa STUREL [10] con el metodo de FORM (First Order Reliability Method) o Monte-Carlo Simulacion.

RESULTADOS

En la Figura 1 se presentan los factores de confiabilidad de condiciones de servicio para los casos de la primera etapa del trabajo, es decir, para las estructuras ubicadas en tres distancias desde la costa, en la ciudad de Mar del Plata, elaboradas bajo las prescripciones del Reglamento.

Se observa un factor de confiabilidad muy elevado, aún para los 100 años de vida en servicio. En el caso más desfavorable (M3), el nivel de confiabilidad a los 100 años es de 1,8, mientras que para los 50 años de vida en servicio (vida útil especificada en el reglamento) el nivel de confiabilidad asciende a 2,1. Para las estructuras en condiciones M1 y M2 los niveles de confiabilidad son aún superiores, alcanzando para los 100 años de vida en servicio los valores de 3,6 y 3,2 respectivamente.

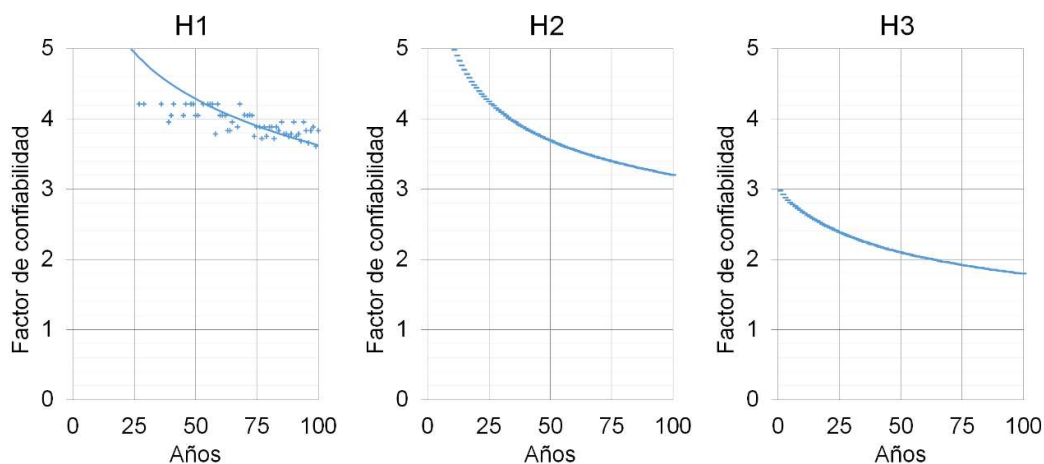


Figura 1: Factor de confiabilidad para estructuras en distintos niveles de exposición, en la ciudad de Mar del Plata.

En la Figura 2 se presentan los factores de confiabilidad de condiciones de servicio para los casos de la segunda etapa del trabajo, es decir, para las estructuras que cumplen con el reglamento, bajo el ambiente más agresivo de exposición (M3) y en tres puntos geográficos diferentes de la costa atlántica argentina.

Para el caso ubicado en la localidad de Ingeniero White (I3), se obtiene una pequeña reducción en el factor de confiabilidad respecto al caso H3 (1,9 y 1,6 para 50 y 100 años respectivamente), lo cual se atribuye a la mayor concentración de cloruros reportados en los casos de campo consultados en la bibliografía (de 4,0 a 6,0 respectivamente). Sin embargo, el nivel de confiabilidad es muy elevado según los estándares internacionales. Para el caso ubicado en la localidad de Punta Loyola (J3), el nivel de confiabilidad aumenta sensiblemente (3,2 y 2,6 para 50 y 100 años respectivamente), mostrando el efecto positivo de la baja temperatura ambiente, que disminuye el coeficiente de difusión del cloruro al interior del material.

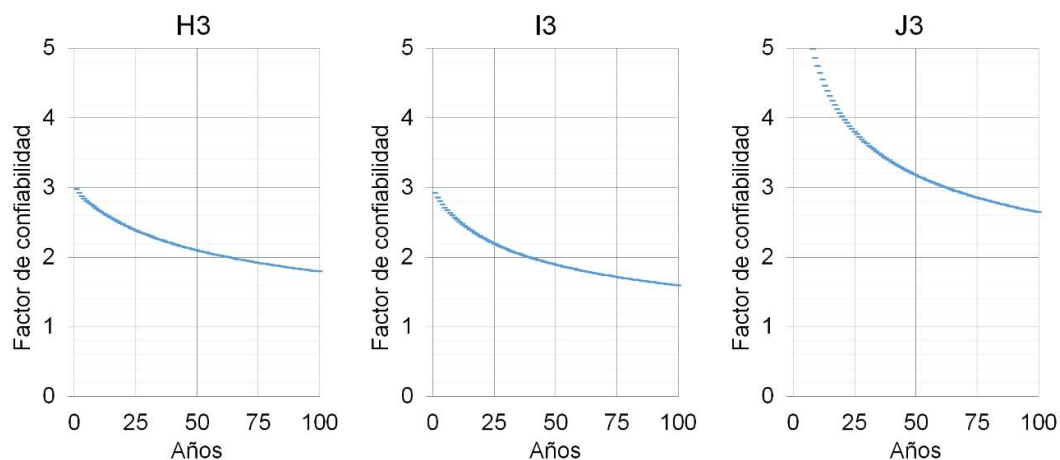


Figura 2: Factor de confiabilidad para estructuras en exposición M3, en tres puntos geográficos de la costa atlántica Argentina.

En la Figura 3 se presentan los factores de confiabilidad de condiciones de servicio para los casos de la tercera etapa del trabajo, es decir, para las estructuras con variaciones en el diseño del hormigón, o con deficiencias constructivas (menor espesor de recubrimiento).

El caso H4, corresponde a un hormigón elaborado con un cemento CPN en lugar de un cemento CPC, que cumple con los requisitos del reglamento (relación $a/c = 0,45$ y recubrimiento de 45 mm). En este caso, el factor de confiabilidad se reduce considerablemente respecto al caso H3. Los valores de 1,5 y 1,3 son alcanzados a los 46 y 63 años respectivamente. El reglamento garantiza una vida útil de 50 años por lo que las prescripciones resultan adecuadas para este diseño de mezcla.

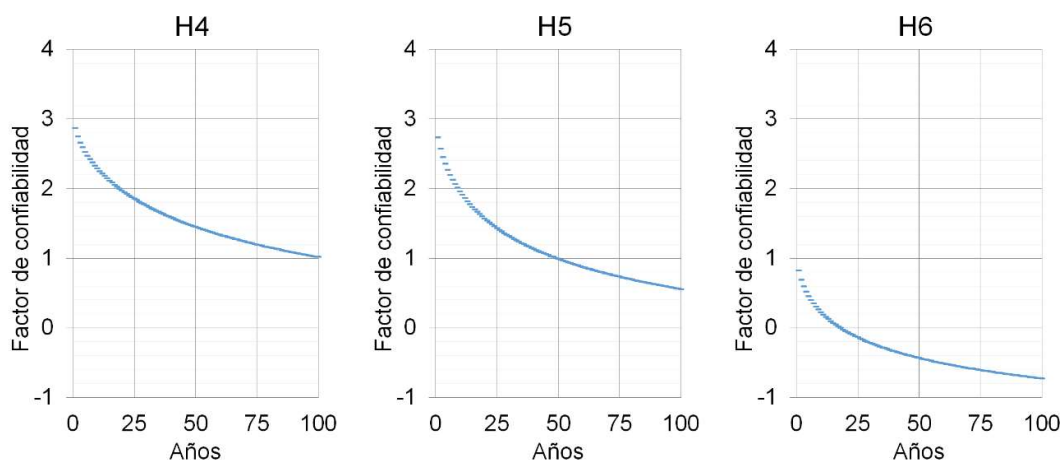


Figura 3: Factor de confiabilidad para estructuras equivalentes a la del caso H3, con variaciones en sus factores de diseño.

El caso H5, es un hormigón que no cumple con los requerimientos del Reglamento, y puede indicar los efectos de una deficiente dosificación del hormigón. El factor de confiabilidad de la estructura alcanza los valores de 1,5 y 1,3 a los 22 y 31 años, es decir reduciendo aproximadamente a la mitad su vida en servicio con baja probabilidad de problemas de corrosión. La mayor relación a/c resulta en un incremento de las propiedades de transporte del hormigón, y por ende un mayor ingreso de cloruros por el mecanismo de difusión.

El caso H6 tampoco cumple con los requerimientos del Reglamento, y puede indicar los efectos de una deficiencia geométrica en el espesor de recubrimiento de las armaduras. Se observa una caída drástica del factor de confiabilidad de la estructura, siendo inferior a 0,9 desde el año 1, e indicando una alta probabilidad de corrosión de las armaduras a 19 años.

CONCLUSIONES

Los resultados en general muestran un elevado nivel de confiabilidad de la vida útil de las estructuras de hormigón diseñadas según el Reglamento CIRSOC 201-2005. Como ejemplo, para el ambiente más severo de exposición (M3), el caso H3 (Mar del Plata) mostró un nivel de confiabilidad superior al 1,5 aún para 100 años de vida en servicio.

Por otro lado, los resultados indican la importancia de poder considerar más factores en las especificaciones establecidas por el reglamento, como por ejemplo las condiciones vinculadas a la geografía (temperatura ambiente), o el tipo de cemento utilizado. La utilización de cementos con materiales cementíceos suplementarios puede modificar considerablemente la durabilidad en el tiempo bajo este tipo de agresión. La inclusión de

estos factores resultaría en una utilización más eficiente de los materiales garantizando la vida útil en servicio.

El reglamento CIRSOC 201-2005 se presenta como altamente conservador para el diseño para durabilidad en ambiente marino. Esto se fundamenta en la falta de control de calidad habitualmente encontrada en el ámbito nacional, de manera que la mayoría de las manifestaciones patológicas podría asociarse a defectos constructivos. Los resultados indican que defectos en la dosificación del hormigón o deficiencias constructivas por falta de recubrimiento (que son los defectos más comunes en la construcción), reducen significativamente el período de vida en servicio con estándares de confiabilidad. La utilización obligatoria de espaciadores que aseguren el recubrimiento podría plantearse como una de las adecuaciones más necesarias al Reglamento.

REFERENCIAS

- [1] Metha K P, Monteiro PJM, "Concrete: Microstructure, Properties and Materials", Third Edit., vol. Third Edit. New York: McGraw-Hill, (2006), 659p.
- [2] AATH, Durabilidad del Hormigón Estructural. AATH, (2002).
- [3] INTI, CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, (2005).
- [4] Fib, "fib Bulletin 76 - Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards," (2015).
- [5] <https://es.climate-data.org>.
- [6] Cabrera O, Rahhal V, González M, "Regiones que presentan problemas generalizados de corrosión," in Jornadas Técnicas Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón – Evaluación, Diagnóstico y Reparación, AATH, 24 y 25 de octubre de 2002, Mar del Plata, Argentina, (2002), 13p.
- [7] Traversa LP, Di Maio A, "Difusión de cloruros en el hormigón," in Jornadas Técnicas Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón – Evaluación, Diagnóstico y Reparación, AATH, 24 y 25 de octubre de 2002, Mar del Plata, Argentina, (2002), 9p.
- [8] Zaccardi YAV, Di Maio AA, Traversa LP, "Deficiencias Constructivas como Causa de Corrosión en Estructura de Hormigón Armado Ubicada en Ambiente Marino," in VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, (2010), 20p.
- [9] Villagrán-Zaccardi YA, "Ingreso de cloruro en hormigones con cemento pórtland compuesto. Influencias del tiempo y de la capacidad de fijación.," Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires, (2010).
- [10] Strurel, Eracons GmbH, Oberanger 42, D-80331, Munich, Alemania. <http://www.strurel.de/>.