

VIDA ÚTIL Y DISEÑO POR CORROSIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

Luis P. Traversa¹

Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica
(LEMIT). Calle 52 e/121 y 122. (1900) La Plata.
direccion@lemit.gov.ar

Resumen

En el presente trabajo se define el concepto de vida útil de las estructuras y se plantea el esquema de diseño por corrosión empleando métodos determinísticos y probabilísticos. Se analizan la influencia del tipo de ligantes empleados sobre el espesor de recubrimiento para obtener una determinada vida útil y se evalúa el uso de distintos coeficientes de variación para el coeficiente aparente de difusión de cloruros y el de envejecimiento.

1. Introducción

El hormigón armado es un material compuesto conformado por una matriz de hormigón de cemento pórtland y refuerzos de barras de acero. La adherencia entre ambos materiales le da integridad y la protección a la corrosión que el hormigón ofrece al acero, presupone una determinada vida en servicio.

El citado material es empleado desde hace muchos años, particularmente a partir de principio del siglo XX. Las propiedades requeridas al hormigón armado están fuertemente vinculadas con las características de la estructura a la cual está destinado. En lo que respecta a la durabilidad (capacidad de duración según el Manual Americano de la Construcción, Edición 1952), puede plantearse que la misma es la “capacidad del material para resistir hasta cierto punto los efectos de las condiciones de servicio a que esta sujeto tales como la meteorización, la acción química y el desgaste”.

Esta definición de la durabilidad es adoptada para la redacción de otros reglamentos como por ejemplo el Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, (PRAEH, edición 1964). En este reglamento se menciona particularmente que el hormigón debe resistir la acción destructora del medio ambiente a que estará expuesto, para lo cual especifica razones agua/cemento máximas en peso a emplear según el tipo de estructura y la condición de exposición. Igual concepto adopta el Proyecto de Reglamento CIRSOC-201 (Edición 1982), en particular para los hormigones definidos como de características y propiedades especiales, incluyendo en este ítem a los hormigones impermeables, de elevada resistencia contra los efectos de las bajas temperaturas o los expuestos a la agresión química o fisicoquímica.

Sin embargo, en todos los casos mencionados, no se explicita el período en el cual el material debe mantener las condiciones de proyecto. Recién en el anteproyecto del Reglamento CIRSOS-201 del año 2000 se hace referencia al concepto de vida útil en servicio de una estructura como aquel período durante el cual debe mantener condiciones de seguridad, funcionalidad y aspecto aceptables sin gastos de

¹ Investigador CIC-LEMIT

mantenimiento significativo. El citado Anteproyecto considera expresamente que las especificaciones de durabilidad indicadas en el mismo, permiten obtener una vida útil de la estructura de 50 años.

La falta de definición explícita de la vida útil prevista, parece estar vinculada fuertemente con la creencia hasta hace algunos años, que las estructuras eran construidas para un tiempo de uso ilimitado. La existencia de estructuras ejecutadas con otros materiales, por ejemplo bloques de rocas, con siglos de vida, parecía justificar el concepto antes mencionado. Sin embargo, la última generación de estructuras construidas, en particular en hormigón armado, han sufrido serias patologías atribuibles principalmente a la corrosión de sus armaduras, algunas de ellas a los pocos años de ser construidas, por lo cual se ha visualizado la necesidad de definir taxativamente la vida útil de proyecto de las estructuras.

Por lo expuesto, es conveniente definir desde el proyecto la vida útil de la estructura, diseñando en el caso de ambientes agresivos por corrosión, el recubrimiento y/o las medidas especiales a adoptar sin elevar excesivamente el costo de ejecución y/o mantenimiento, ya que el bajo costo es una de las características principales que hacen que el hormigón armado sea un material ampliamente utilizado en la construcción. Además, el hormigón armado resulta un material competitivo, porque en la mayoría de los casos las tareas de mantenimiento son mínimas, limitadas principalmente a preservar la limpieza y el correcto drenaje de las aguas de lluvia.

La vida en servicio especificada varía según el tipo de estructura, como por ejemplo:

- Estructuras off-shore: 35 años
- Estructuras diseñadas según CIRSOC-2001/02, Eurocode 2, etc.: 50 años
- Túneles, puentes: 100 años

2. Esquema de los procesos de degradación del hormigón armado

Los mecanismos de deterioro del hormigón armado pueden ser agrupados de la siguiente manera:

a.- Corrosión de las barras, que lleva usualmente a la fisuración del hormigón y a la reducción de la capacidad de carga de la estructura debido a la disminución del área del refuerzo. Las razones que desencadenan la corrosión se deben a que las cualidades protectoras del hormigón están reducidas por:

- Carbonatación del hormigón de recubrimiento
- Ataque de cloruros
- Una combinación de ambos mecanismos

b.- Deterioro de la matriz del hormigón. Existen varios factores potenciales de degradación, algunos asociados con la composición intrínseca del hormigón y otros causados por agentes externos. Entre los principales se pueden citar:

- Reacción álcali-silice (RAS)
- Ataque por ácidos
- Ataque por sulfatos
- Ataque biológico (microorganismos, organismos y plantas)

c.- Daños físicos por sobrecarga, temperatura, impacto, abrasión, congelación y deshielo, etc.

d.- Fisuración inicial (plásticas) y por contracción por secado.

El modelo que esquematiza a todos los procesos de degradación del hormigón armado, que es una generalización del propuesto por Tutti, K. (1982) para la corrosión de las armaduras, incluye dos períodos diferenciados (ver Figura 1):

* **Período de iniciación (Pi)**: Que es el tiempo que tardan las sustancias agresivas y las reactivas en ponerse en contacto. En algunas reacciones el Pi es elevado ya que las velocidades de transporte de las sustancias agresivas en el hormigón es lento. En el caso de la corrosión es el tiempo en que el frente carbonatado o los cloruros tardan en llegar hasta la armadura y despasarla.

* **Período de propagación (Pp)**: Es el tiempo durante el cual se producen las reacciones cuyos resultados pueden llevar a un deterioro inaceptable para la seguridad, funcionalidad o estética de la estructura. En la mayoría de los procesos de degradación y en particular en los químicos, las temperaturas elevadas actúan como acelerantes del proceso.

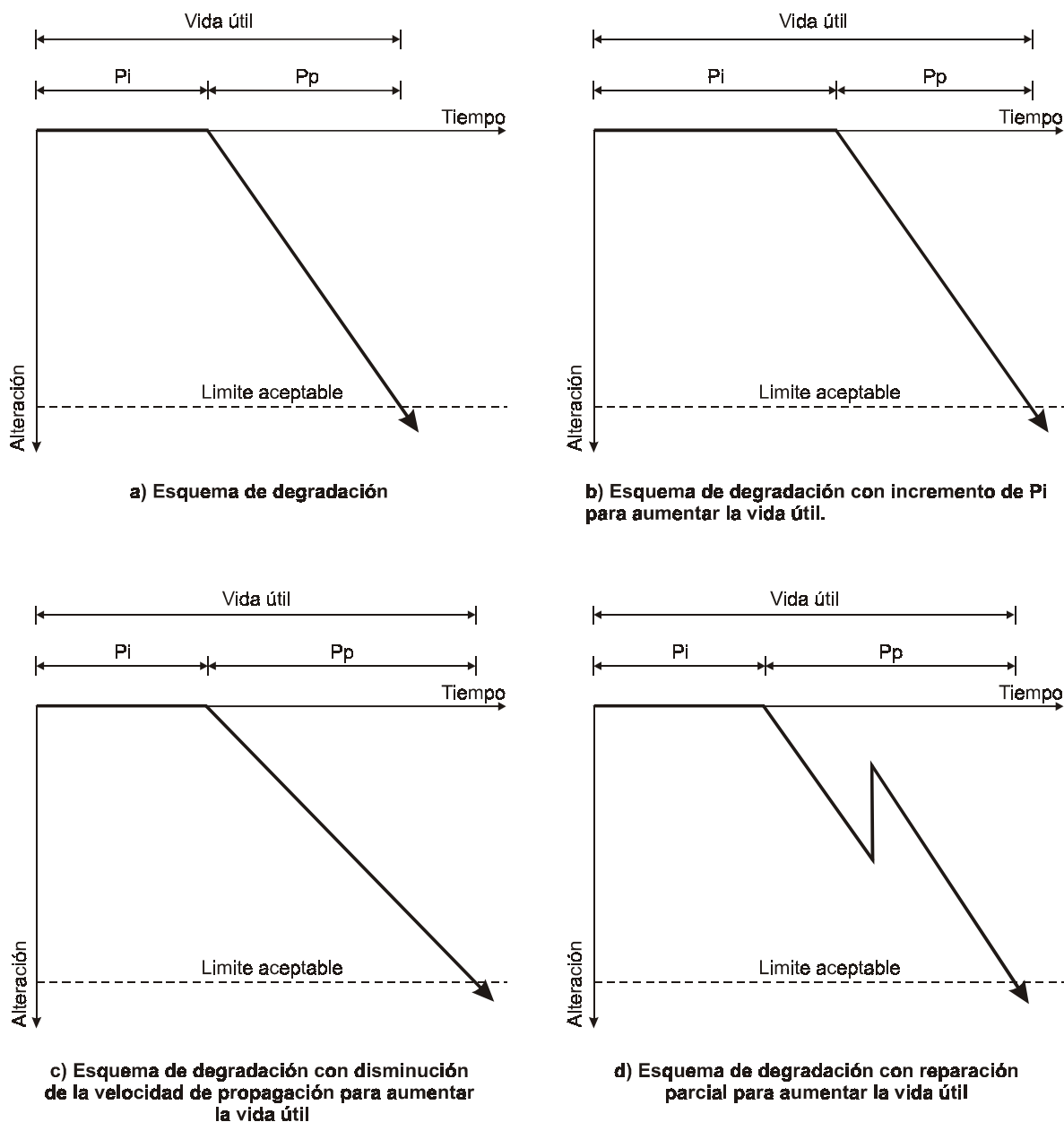


Figura 1. Modelo teórico de los procesos de degradación

De acuerdo al esquema propuesto un aumento de la vida útil puede ser alcanzado prolongando el período de iniciación o disminuyendo la velocidad de propagación una vez que el daño se ha iniciado, o mediante una combinación de ambas acciones. También, puede prolongarse la vida útil realizando reparaciones parciales, que disminuyan el grado de deterioro.

La dificultad práctica es definir el período de iniciación y cuantificar la velocidad de propagación de la mayoría de los fenómenos de degradación del hormigón armado. Esto es particularmente crítico en el caso de la difusión de los cloruros iniciadores de la corrosión, ya que en hormigones nominalmente idénticos, la penetración varía dentro de amplios márgenes, especialmente en ambientes marinos en los cuales el coeficiente de difusión presenta elevadas dispersiones. La corrosión causada por carbonatación es, a menudo, más predecible ya que puede estimarse con suficiente exactitud el espesor carbonatado en función de la edad de exposición.

En el caso de la corrosión es posible establecer en la actualidad, modelos sofisticados del mecanismo de deterioro a fin de calcular los espesores de recubrimiento para una determinada vida útil de la estructura. Sin embargo, estos modelos no están incorporados a los reglamentos vigentes pero pueden ser usados como soporte de las decisiones técnico - económicas que se adoptan, fundamentalmente en estructuras expuestas en ambientes muy agresivos.

Debe plantearse también que cuando se considera la vida útil en servicio de las estructuras es importante definir el límite aceptable de deterioro. En el caso de la corrosión pueden adoptarse algunos de los siguientes criterios, que dependerán fuertemente del tipo de estructura:

- Momento en el cual se inicia la corrosión (fin del Pi)
- Primera aparición de fisuras visibles con magnificación (espesor < 0.3 mm)
- Fisuras visibles a simple vista (espesor > 0.3 mm)
- Primer desprendimiento del hormigón de recubrimiento
- Pérdida de sección en las barras del 10%
- Flexión de vigas
- Colapso bajo carga de servicio

En el caso del diseño estructural se calcula para resistir las cargas y sobrecargas estipuladas en el proyecto con un determinado grado de seguridad mientras que en el diseño por durabilidad en el caso particular de la corrosión deben adoptarse algunos de los criterios citados u otros que resulten adecuado. Además, en algunos casos la agresión tiene efectos acumulativos mientras que en otros, los procesos de degradación pueden ser modificados en el tiempo de acuerdo al desarrollo alcanzado por el mismo, atenuando sus efectos nocivos.

3. Diseño por vida útil.

El período a partir de la construcción, durante el cual deben mantenerse las condiciones de seguridad y funcionalidad (aptitud en servicio) con un aspecto aceptable, sin gastos de mantenimiento significativos debe ser fijado por el propietario antes del inicio del diseño y depende del tipo de estructura. Cuando no se establezca expresamente, se asume por defecto que es igual a 50 años.

La metodología de cálculo para el diseño por durabilidad se basa fundamentalmente en:

- a.- Determinación del período de vida útil, que debe definirse mediante el deterioro admisible que estará relacionado con las características de la obra, tipo de agresión, etc.
- b.- Definición de la sollicitación o factor de degradación (química, física, mecánica, biológica, etc.)
- c.- Determinación de las propiedades del hormigón que controlan el proceso de degradación.
- d.- Determinación de los parámetros de diseño de la mezcla y de la estructura, en el caso de la corrosión el espesor mínimo de recubrimiento y/o de otros métodos de protección complementarios (membranas, revestimientos, etc.).

En el método tradicional de diseño por requisitos, la propiedad del hormigón en la que se basa el control o resistencia a la penetración del agresivo (en el caso de la corrosión de la armadura de CO_2 ó de Cl^-), es la resistencia mecánica a compresión. Esta es la propiedad básica que tradicionalmente se ha asimilado a la calidad y, por tanto, a la durabilidad del hormigón, especificando la razón agua/cemento máxima aceptable.

En los últimos años se han iniciado estudios conducentes a implementar métodos de diseño que consideren al efecto del ambiente como si fuese una carga. En particular, este concepto ha tenido un amplio desarrollo en el caso específico de la corrosión de las barras empotradas en el hormigón atribuibles a procesos de carbonatación y/o presencia de cloruros, ya que se consideran a estas patologías como las de mayor incidencia. Además, es necesario mencionar que los procesos involucrados en los citados mecanismos de despasivación de las armaduras pueden ser modelados con relativa facilidad, situación que adquiere mayor complejidad en otras patologías como por ejemplo la reacción álcali-agregado o el ataque de sulfatos.

En el diseño por vida útil de un elemento estructural debe considerarse un nuevo concepto, el cual está vinculado con la seriedad que la falla por durabilidad puede tener sobre la estructura o sobre el propio elemento. La *criticalidad* del elemento se refleja, entonces, en su importancia para soportar cargas, la dificultad en la reparación o reemplazo o en su colapso. Las estructuras o elementos pueden ser categorizados como de baja, media y alta *criticalidad* de acuerdo a las siguientes definiciones:

- *Alta criticalidad:* La falla causa la cesación de la función del elemento o estructura y/o graves inconvenientes durante su reparación.
- *Media criticalidad:* La funcionalidad de la estructura se reduce, pero los trabajos de reemplazos o reparación pueden ser realizados sin mayores inconvenientes con precauciones mínimas y durante las horas en las cuales se desarrollan actividades en la estructura.
- *Baja criticalidad:* La falla de estos elementos o estructuras no revisten importancia, ya que no resultan críticos para el funcionamiento estructural. El trabajo de mantenimiento o reparación puede ser realizado sin inconvenientes, no presentando dificultades tecnológicas.

La *criticalidad* del elemento o de la estructura determinara, entonces, el método de diseño a emplear. Para estructuras donde las consecuencias de las fallas o los deterioros por durabilidad son extremadamente altas, un diseño basado en minimizar el riesgo resultará el más apropiado. En estos casos, los costos iniciales son de menor importancia que las consecuencias que origina la existencia de fallas o deterioros por durabilidad. En diseños de estructuras de baja *criticalidad*, que son un porcentual elevado de las que se construyen habitualmente, es suficiente el uso de las recomendaciones especificadas en los Códigos, Reglamentos y/o Normas vigentes.

3.1. Cálculo determinístico.

En el diseño por vida útil de estructuras se ha desarrollado una expresión matemática para definir los espesores de recubrimiento en función de los procesos de carbonatación. En la citada expresión, propuesta por el CEB, en el año 1997, el

espesor de carbonatación (d_c) en el límite de la vida en servicio de la estructura se determina por:

$$d_c = \{ 2 \cdot g_1 \cdot g_2 \cdot g_3 \cdot D_c \cdot (D_{ef}/a) \}^{0.5} (t_0/t)^n t^{0.5}$$

donde:

g_1 : parámetro del microclima que se vincula con la humedad media del hormigón.

g_2 : parámetro que describe el curado.

g_3 : parámetro que tiene en cuenta la a/c del recubrimiento.

n : parámetro del microclima, considera el humedecimiento y secado.

t_0 : edad a la que se realizaron las determinaciones.

t : vida útil de diseño.

a : cantidad de CO_2 necesaria para completar la carbonatación.

D_{ef} : coeficiente de difusión efectivo de CO_2 en el hormigón.

D_c : diferencia de concentración de CO_2 entre el frente carbonatado y el medio inmediato a la superficie.

Como se observa, para obtener el valor de d_c hay que aplicar coeficientes vinculados con las características del hormigón de recubrimiento y las ambientales como ser humedad relativa, porcentaje de CO_2 , etc.

Al cumplir la vida útil de diseño, el valor de d_c resultante del cálculo matemático se aproximará al espesor carbonatado real si los coeficientes aplicados han sido elegidos adecuadamente.

En estructuras de hormigón armado en contacto con cloruros el cálculo del espesor de recubrimiento se efectúa a partir de la solución de la segunda Ley de Fick, que modela el proceso de difusión de los cloruros a través de la solución de poros del hormigón, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$1 - C(x,t) / C_s = \text{erf} [x / 2 (D_{ap} \cdot t)^{0.5}]$$

donde:

$C(x,t)$: concentración de cloruro a la distancia x , en el tiempo t (se adopta 0.1 % en peso del hormigón).

C_s : concentración superficial de cloruros o carga ambiental

x : espesor de recubrimiento

D_{ap} : coeficiente aparente de difusión

t : vida útil (se adopta 50 años u otro valor)

erf: función error

Sin embargo, el D_{ap} disminuye con el tiempo debido a los procesos de hidratación del material cementante empleado (cemento pórtland y adiciones minerales activas) que modifican la porosidad de la pasta. El D_{ap} depende del tiempo de exposición, según la expresión:

$$D_t = D_o (t_0/t)^n$$

donde:

D_t : coeficiente aparente al tiempo t

D_o : coeficiente aparente al tiempo t_0

n: coeficiente de envejecimiento

En la Tabla 1 se informan los espesores de recubrimiento calculados para una vida útil de 50 años obtenidos a partir de la expresión matemática antes citada para dos tipos diferentes de mezclas que emplean como ligante cemento pórtland normal (CPN) y cemento puzolánico (CP). Los valores de D_{ap} y C_s fueron obtenidos de experiencias de laboratorios a la edad de 120 días y con una concentración de cloruros del 3%. También, se informa la variación del espesor de recubrimiento cuando se considera la modificación del D_{ap} en el tiempo. En todos los casos se ha adoptado como limite de la vida útil en servicio la existencia de un porcentaje de cloruros de 0.1% en peso de hormigón en la superficie de la barra.

Tabla1: Valores del espesor de recubrimiento calculados por el método determinístico

Mezcla	a/c	Ligante	$D_{ap} \cdot 10^{-6}$ (mm^2/s)	C_s (Kg/m^3)	n	Recubrimiento (mm)
1	0.37	CPN	8.3	9.9	0.0	183
1	0.37	CPN	0.7	9.9	0.5	52
2	0.37	CP	1.8	14.9	0.0	106

Los valores obtenidos confirman la influencia del tipo de ligante empleado sobre el espesor de recubrimiento necesario para obtener una vida útil de 50 años. Además, el empleo del coeficiente de envejecimiento marca claramente la influencia significativa de la variación del D_{ap} en el tiempo sobre el valor obtenido.

Con respecto a las variables consideradas, hay que tener en cuenta para el cálculo más exacto del espesor de recubrimiento, que la rugosidad de la superficie del hormigón expuesto y el régimen de lluvias del lugar de emplazamiento, modifican el valor de C_s . Complementariamente habría que considerar, también, la variación de D_{ap} en función de la temperatura de exposición.

3.2. Cálculo probabilístico.

Siguiendo el criterio aplicado en el diseño estructural se han desarrollado nuevas metodologías generalizadas al diseño de durabilidad, basado en el método probabilístico. En esta nueva situación, pueden llegar a calcularse los espesores de recubrimiento referidos a distintas probabilidades de corrosión y asumir consecuentemente el riesgo que implica adoptar un determinado espesor de recubrimiento.

En comparación con los métodos determinísticos, en los cuales las probabilidades de ocurrencia del daño es del 50%, ya que se trabaja con valores medios, en los probabilísticos hay que definir esa probabilidad de acuerdo a la *criticalidad* de la estructura. En todos los casos hay que introducir en el cálculo los valores medios de D_{ap} como así también los coeficientes de variación de los mismos, lo cual supone trabajar con valores característicos asumiendo una distribución gaussiana para dichos factores. Se supone que la concentración superficial es constante.

En la Tabla 2 se informan a modo de ejemplo los espesores de recubrimiento calculados para una probabilidad de falla del 10% y adoptando para los valores de D_{ap}

de la Mezcla 1 distintos coeficientes de variación ($\delta = 15$ y 25%) y variando el valor de n pero no considerando al citado coeficiente como una variable estadística.

Tabla 2: Valores del espesor de recubrimiento calculados por el método probabilístico para una probabilidad de falla del 10%

Mezcla	$D_{ap} \cdot 10^{-6}$ (mm^2/s)	δ (%)	C_s (Kg/m^3)	n	Recubrimiento (mm)
1	8.3	15	9.9	0.0	199
		15		0.5	57
		25		0.0	210

Los valores obtenidos muestran la influencia de la variación porcentual del coeficiente de difusión aparente sobre el valor de recubrimiento para iguales condiciones de diseño. Sin embargo, sigue siendo más significativa la influencia del coeficiente de envejecimiento.

4. Consideraciones finales

En todo proceso de degradación del hormigón armado siempre es conveniente disminuir el tiempo inicial y el tiempo de propagación mediante tecnologías que no eleven excesivamente el costo de diseño, ejecución y/o mantenimiento de las estructuras, ya que el bajo costo es una de las características principales del hormigón armado.

En la casi totalidad de los Reglamentos se emplean métodos prescriptivos para la mayoría de las patologías, definiendo razones agua/cemento, contenidos mínimos de cemento, etc., según los ambientes de exposición. En algunos pocos casos se incorporan exigencias prestacionales del material.

En el caso de la corrosión de las armaduras existen métodos más avanzados de cálculo del recubrimiento para asegurar una determinada vida útil de la estructura, tanto en el caso de la despasivación por carbonatación como por acción de los cloruros. En ambos casos el mecanismo del proceso puede ser explicitado mediante una expresión matemática y pueden emplearse en particular en la despasivación por cloruros, procedimientos probabilísticos en los cuales el coeficiente de difusión aparente y el de envejecimiento se asumen como variables estadísticas.

Bibliografía

- [1] Seki, H. Deterioration of reinforced concrete wharf. Concrete International, March, 1981.
- [2] Eperjesi, L., Traversa, L.P., Giovambattista, A., Barbosa, M., Gassa, L., Vetere, F. & Sota, J.D. Difusión de cloruros en hormigones con adiciones minerales activas. Proc. 1st. International Congress of Concrete Technology. Buenos Aires. Argentina, 1998.
- [3] Weyers, R. Service life model for concrete structures in chloride laden environments. ACI Materials Journal. July-August, 1998.

- [4] Wallbank, E.J. The performance of concrete bridges: a survey of 200 high way bridges. HMSO. London, Inglaterra, 1989.
- [5] Durable Concrete Structures Design Guide. CEB. Second Edition, 1989.
- [6] Durabilidad de Estructuras de Hormigón. GEHO-CEB. 1993.
- [7] Rostan, S. Vida útil de las estructuras de hormigón. Revista Hormigón 36, 2000.
- [8] Durabilidad de las armaduras. DURAR. Edición CYTED, 1997.