

VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS - DÓNDE ESTAMOS Y HACIA DÓNDE VAMOS?

Autor

Paulo G. Yugovich R.¹
Facultad de Ciencias y Tecnología – UCA / e-mail: yugovich@pla.net.py

Palabras claves: construcción, hormigón, durabilidad, estructuras

RESUMEN

Con muchas de nuestras estructuras de hormigón armado rebasando los veinte años de edad, la mayoría construidas en la década del 70 y 80 al impulso del crecimiento económico generado por la construcción de Itaipú, aún no se han realizado trabajos sistemáticos para el estudio de las condiciones de servicio de las mismas, sobre todo desde el punto de vista de la durabilidad. Este tema, motivo de preocupación internacional en los últimos años por el crecimiento del número de estructuras con manifestaciones patológicas, principalmente casos de corrosión de armaduras, ha impulsado a varias instituciones (ACI, FIB, IBRACON) a la redacción de documentos que orienten a los ingenieros en el enfoque de la vida útil de servicio de las estructuras. El estudio de casos particulares locales, con la aplicación de algunos de los conceptos utilizados en la predicción de la vida útil, permite ubicarnos en el contexto, y apoyados en literatura técnica como las citadas, orientar nuestros pasos para lograr estructuras durables y con vidas de servicio previsibles.

¹ Ingeniero Civil y Topógrafo / Profesor Titular del Área de Construcciones

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón ya era conocido y utilizado por los Romanos (Opus Caementicum), quienes demostraron preocupación por la durabilidad de las obras, tal como expresado por Vitruvius en su libro "De Arquitectura", aproximadamente en el año 30 a.C. [1]. Evidentemente que las características de los materiales utilizados (reacciones puzolánicas), sumados a comportamientos estructurales favorables (piezas trabajando a compresión), dimensiones generosas y supervisión técnica apropiada llevaron a tener éxito en sus previsiones, ya que muchas obras romanas subsisten hasta hoy, en condiciones totales o parciales de servicio.

Luego de muchos siglos sin mayores cambios, a fines del siglo XIX y principios del siglo XX los avances de la ciencia y la tecnología y las transformaciones socio económicas impusieron nuevas perspectivas para un bien cada vez mas escaso del hombre, el tiempo. Esas tendencias afectaron también a la construcción civil; y el hormigón, con sus cualidades de fácil moldeo, facilidad de ejecución y relativo bajo costo, viene al encuentro de esas nuevas formas de pensar y actuar, en el sentido de la búsqueda de construir mas rápido, con mas arrojito, y a costos competitivos. La utilización del hormigón armado, con las grandes ventajas estructurales en relación al hormigón simple, aporta sin embargo una cuestión no muy bien considerada en los inicios, que es la natural tendencia del acero de volver a su condición mineral, con lo que la corrosión del acero en el hormigón pasa a constituirse en un problema a considerar seriamente, dados los numerosos casos de obras con degradación prematura [1].

La falta de durabilidad que el hormigón armado presentó en estructuras construidas entre los años 60 a 80 del siglo XX, especialmente las expuestas a ambientes agresivos, denota la dicotomía existente desde los inicios del uso del material, entre los conocimientos adquiridos y la práctica de obra. Esta divergencia fue y es, fruto de la inercia propia del tradicionalismo en la industria de

la construcción, y tiene como causa subyacente a la dualidad existente entre la fácil disponibilidad de los materiales constituyentes, sumado a la aparente simplicidad en la elaboración del hormigón con la complejidad de su constitución interna y sus propiedades, a su vez variables con las condiciones temporales y ambientales [1]. Según Adam Neville, gran parte de los problemas relacionados con la falta de durabilidad de las estructuras actuales se deben a los cambios en las propiedades de los cementos, que se volvieron mas finos para proveer resistencias mas elevadas a tempranas edades, como también la remoción temprana de los encofrados, lo que lleva a la exposición de las superficies de hormigón al medio ambiente siendo aún muy joven. Otro factor importante con relación a la durabilidad del hormigón es el fraccionamiento del conocimiento de las personas envueltas en el proyecto, pues muchos proyectistas no poseen conocimiento adecuado sobre el comportamiento de los materiales, y viceversa, los tecnólogos no tienen mayores conocimientos de ingeniería estructural o de métodos constructivos. Por último, una de las causas principales del deterioro prematuro de las estructuras de hormigón, por lo menos hasta fines de la década del 80 del siglo XX, es la consideración por parte de proyectistas y ejecutores a la resistencia mecánica como principal, cuando no único, parámetro de proyecto, mientras las cuestiones relacionadas a la durabilidad eran minimizadas. En realidad, la cuestión de la durabilidad nunca fue contemplada en forma objetiva en las normas internacionales sobre el hormigón armado. A modo de ejemplo, la literatura técnica en boga en los años 70 del siglo XX decía que *"la mejor garantía de durabilidad radica en la confección de un hormigón lo mas compacto posible, para lo cual deben emplearse masas ricas en cemento, de baja relación agua/cemento y bien consolidadas"* [2], y en el mismo aparece una tabla que recomienda contenidos mínimos de cemento según diferentes grados de agresividad, que se clasifican en ambientes moderados, rigurosos y muy agresivos. Podemos ver que la clasificación de los ambientes es

cualitativa, ya que no se definen parámetros para una calificación objetiva de los mismos. Además, lo de pastas ricas en cemento es relativo, puesto que un contenido elevado de cemento puede tener un efecto contraproducente en la calidad de la microestructura de un hormigón. En otro caso, las normas españolas de hormigón pretensado (EP 77), dicen que la mejor protección para las armaduras es un hormigón de buena resistencia y compacidad, y que estas son más importantes que el espesor del recubrimiento, por grande que este sea [3]. También es opinable esa recomendación, ya que la resistencia y la compacidad no son suficientes para definir la permeabilidad del hormigón y la difusibilidad de los fluidos en el mismo, que hoy día sabemos son los parámetros principales, juntamente con el espesor del recubrimiento, para la durabilidad del hormigón.

En cuanto a durabilidad de las estructuras de hormigón se refiere, en forma general, es aceptada la recomendación de cuidar cuatro factores básicos: La composición o trazo del hormigón, la compactación, el curado y el recubrimiento de las armaduras [4].

2. EL CONCEPTO DE VIDA ÚTIL

Conforme al CEB/FIP Model Code 1990, se entiende por Vida útil el periodo de tiempo durante el cual la estructura es capaz de desempeñar las funciones para las cuales fue proyectada, sin necesidad de intervenciones no previstas [4]. La tendencia actual es preocuparse por la durabilidad de las estructuras, pero ya no solamente en forma cualitativa, sino estableciendo un lapso como referencia, sino estableciendo desde el proyecto el mismo. A pesar de que esta preocupación es una constante en el medio técnico desde los inicios de los años 90 del siglo XX, la misma no se ha podido transformar en una metodología ampliamente aceptada, con resultados cuantitativos predeterminados. Incluso en las actualizaciones de las normativas de los países más avanzados, entre ellas la NBR 6118 (2003), si bien ya son más abarcatantes e incluyen tópicos antes ausentes, como garantía de calidad y

durabilidad de las estructuras, y afirman que la estructura debe mantener la seguridad, estabilidad y aptitud en servicio durante el periodo correspondiente a su vida útil, pero sin especificar cual debería ser esta vida útil. Lo mismo pasa con el ACI 201.2R (2001) que define como hormigón durable aquel que posee la capacidad de resistir el intemperismo, ataques químicos, desgaste por abrasión y cualquier otro proceso de degradación, reteniendo su forma original, calidad y capacidad de utilización, cuando expuesto al ambiente de trabajo. Tampoco se menciona el factor tiempo en la definición. Evidentemente que la complejidad de los fenómenos de deterioro envueltos en la durabilidad de las estructuras de hormigón presenta una gran dificultad a la hora de consensuar acerca del modo de introducir el factor tiempo en la normativa técnica [5].

Como consecuencia de esas falencias observadas en las normas, el medio técnico se ha movilizado para avanzar en la conceptualización objetiva de la vida útil de las construcciones. Entonces se empiezan a definir varios tipos de vida útil o de servicio, como la vida útil desde el punto de vista técnico, funcional o económico. Asimismo, en el ACI 365.1R - 00, se habla de que se necesita un enfoque más holístico para el diseño de las estructuras cuando se basan en consideraciones relativas a la vida útil ó de servicio, debiéndose considerar los efectos del medio ambiente sobre el hormigón, las consideraciones de diseño y de cargas, las interacciones entre los efectos del medio ambiente y de las cargas, aspectos relativos a la construcción y al mantenimiento a lo largo de su vida de servicio [6].

Uno de los trabajos pioneros en América Latina sobre la previsión de la vida útil fue el de Paulo Helene [4], en el cual se mencionan los cuatro métodos para la previsión de la vida útil, a saber: 1) **Con base en las experiencias anteriores**, lo que ha dado resultados dispares, sobre todo en el caso de la experiencia brasileña, debido a la adopción de recubrimientos muy inferiores a los estipulados en las normas americanas y europeas, y sin mayores consideraciones sobre la agresividad del ambiente, aunque es justo decir que tanto el Código Modelo CEB/FIP

de 1990 y el ACI 318/95 también adoptan el mismo método de asegurar durabilidad.

2) **En base a ensayos acelerados**, introducido por los norteamericanos en la ASTM E 632 de 1978, método más fácilmente aplicable al estudio de productos orgánicos y no tan directamente aplicable al proyecto de estructuras de hormigón, por su heterogeneidad y complejidad. Aunque últimamente ha habido un gran avance en los métodos de ensayos acelerados de fundamento electroquímico, en cámaras de carbonatación y de avance de cloruros. 3) **Por métodos deterministas**, basados científicamente en los mecanismos de transporte de los fluidos e iones a través de los poros del hormigón en el caso del periodo de iniciación del proceso de degradación, y en la ley de Faraday en el caso del periodo de propagación, siempre que se trate de corrosión de las armaduras. En realidad, solo existen modelos numéricos y deterministas satisfactorios en temas relacionados a la corrosión de las armaduras, ya que en el caso del deterioro del hormigón por lixiviación, por sulfatos, por reacción álido-álcali o por otros casos, aún no existen métodos satisfactorios de predicción. 4) **A través de métodos estocásticos o probabilistas**, a su vez los más modernos y realistas, introducen para los principios de diseño para la durabilidad conceptos similares a los ya clásicos principios de introducción a la seguridad en el proyecto de estructuras de hormigón, muy discutidos en la década del 70 del siglo XX. Se habla entonces de distribución normal para las acciones agresivas y para las resistencias de la estructura a esas acciones de deterioro. Lo más sencillo y recomendable es combinar métodos deterministas con probabilistas.

3. PROYECTAR PARA LA VIDA ÚTIL

Los pasos siguientes están encaminados a la búsqueda de facilitar a los proyectistas los medios para que puedan proyectar objetivamente la vida útil de servicio de una estructura de hormigón desde el principio, lo que se ha plasmado en documentos como el ACI 365.1R-00 ya citado [6], o el más actual Model Code for Service Life Design, bulletin 34, Fib, del 2006 [7], que tiene un enfoque fuertemente probabilístico, o en los Comentarios Técnicos sobre la NB-1 del IBRACON [8]. En este punto

conviene resaltar, que la NBR 6118:2003, conocida en Brasil como la NB-1, introduce dos capítulos relacionados a la durabilidad de las estructuras, que son el capítulo 6 ("Diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto") y el capítulo 7 ("Critérios de projeto visando a durabilidade"), entre otros puntos nuevos, que ha llevado al IBRACON a redactar el texto antes mencionado [8], para esclarecer la aplicación de la norma citada, que ya tiene aplicación de carácter obligatorio en el territorio del vecino país desde el año 2004.

En cuanto a los criterios de proyecto que buscan la durabilidad, se citan y desarrollan los siguientes puntos:

- a) Prever drenaje eficiente;
- b) Evitar formas arquitectónicas y estructurales inadecuadas;
- c) Garantizar hormigón de calidad apropiada, particularmente en las regiones superficiales de los elementos estructurales;
- d) Garantizar recubrimientos de hormigón apropiados para protección de las armaduras;
- e) Detallar adecuadamente las armaduras;
- f) Controlar la fisuración de las piezas;
- g) Prever espesores de sacrificio o revestimientos protectores en regiones bajo condiciones de exposición ambiental muy agresivas;
- h) Definir un plan de inspección y mantenimiento preventivo.

4. MODELANDO LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL

De entre las formas de deterioro de las estructuras, sin lugar a dudas es la corrosión de las armaduras la más estudiada. Esta circunstancia es debida a la mayor incidencia porcentual de este tipo de fallas en los estudios sobre casos patológicos en las estructuras de hormigón realizados a la fecha, y a los grandes costos envueltos en los procesos de reparación estructural de esos casos. En ese entendimiento, Paulo Helene [4] propone en 1993 un modelo basado en los trabajos de Tuutti (1982), que distingue tres

tipos de vida útil para el caso de corrosión de las armaduras, y son: a) Vida útil de proyecto, o período de tiempo que va hasta la despasivación de las armaduras, denominado período de iniciación, b) Vida útil de servicio o de utilización, que va hasta el momento en que aparezcan síntomas externos como fisuras, manchas ó incluso desprendimientos parciales del recubrimiento de las armaduras; pero el fin de la vida de servicio será dependiente de los condicionamientos estéticos, funcionales o de seguridad impuestos a la estructura, c) Vida útil última o total, que va hasta el colapso parcial o total de la estructura. Además, el modelo propuesto distingue también el concepto de vida útil residual, en cualquiera de los tres casos, que es el tiempo previsto de vida útil a partir de una fecha cualquiera, en que se realiza una inspección y peritaje de la obra.

Para nuestro país cobra especial importancia el modelo propuesto para el caso de corrosión de armaduras causadas por la carbonatación del hormigón, ya que el otro mecanismo preponderante para corrosión, la presencia de cloruros, no es un problema común debido a nuestra mediterraneidad, exceptuando casos de introducción voluntaria de cloruros por la vía de los aditivos aceleradores de fraguado.

5. AVANCES EN LOS ESTUDIOS SOBRE CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN

Desde hace años se plantea la función del avance del frente de carbonatación en una estructura con la conocida fórmula: $x = k \cdot t^{1/2}$; donde "x" es el avance del frente (por ejemplo en mm) en el tiempo "t" (en años), y "k" es un coeficiente de carbonatación del hormigón en cuestión. Pero el coeficiente "k", es una constante compleja, que depende de factores como la difusividad del gas carbónico, del gradiente de concentración del mismo en el ambiente, de los ciclos de mojado/secado del hormigón, de la cantidad de CO₂ retenida en función de la composición del hormigón y de eventuales adiciones en el cemento, entre otros. Por tanto, "k" no es fácil de calcular a priori, siendo lo normal la deducción de "k" a partir de un estudio

sobre un hormigón existente, en un momento dado de su vida, midiendo el avance de la carbonatación por alguno de los métodos disponibles (fenolftaleína, timolftaleína, etc.). Las investigaciones orientadas a profundizar en el conocimiento del parámetro "k", para mejorar los métodos deterministas y estocásticos de predicción de vida útil de proyecto, llevaron a proponer algunas ecuaciones para la carbonatación como la siguiente (Sentler 1984):

$$x^2 = (2D/a) dp \cdot t \dots\dots\dots [6]$$

donde "x" es la profundidad de carbonatación, "D" es el coeficiente de difusión, "a" es la concentración de constituyentes del hormigón que pueden carbonatar, "dp" es el diferencial de presión para el CO₂, y "t" es el tiempo.

O la aún mas compleja:

$$x = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC.0}^{-1} + \varepsilon_1) \cdot C_s} \cdot \sqrt{t} \cdot w(t) \dots\dots\dots [7]$$

donde "x" es la profundidad de carbonatación [mm] en el tiempo "t" [años], "k_e" es una función del medio ambiente, "k_c" es una función del curado del hormigón, "k_t" es un parámetro de la regresión estadística, "ε₁" es un factor de error, "R_{ACC.0}⁻¹" es la resistencia efectiva a la carbonatación de un hormigón, determinado en ensayos acelerados de la misma (ACC-test method), "C_s" es la concentración del CO₂, y "W(t)" es una función del clima. En esta propuesta ya se enlazan los métodos deterministas, con los ensayos acelerados y los probabilísticos. Esas son las tendencias actuales, ya aplicadas en la predicción de la vida útil de grandes estructuras en Norteamérica y Europa.

6. ESTUDIO DE ALGUNOS CASOS LOCALES

Como se comentaba al principio, no tenemos aún estudios suficientes, mucho menos sistemáticos, de lo que acontece con la durabilidad de las estructuras construidas en el Paraguay durante las décadas del 70 y 80. Consideramos necesaria esa investigación, teniendo en cuenta lo acontecido a nivel internacional,

ya mencionado antes, de que se han dado muchos casos de degradación prematura en las estructuras construidas en ese lapso. Ante esa carencia, recurrimos en primera instancia a algunos casos de investigación realizados en la FCYT-UCA como tesis de graduación, y a otros casos en que hemos actuado como consultores en el tema de la durabilidad.

6.1 Primer caso: Corrosión por mala praxis constructiva y fallas en la impermeabilización



Foto N° 1: corrosión en vigas



Foto N° 2: corrosión en vigas en una junta

En este primer caso se pueden observar claramente las fallas constructivas en los recubrimientos del acero. Paralelamente, la impermeabilización de la terraza superior llevaba varios años con deficiencias y no se habían tomado medidas al respecto.

Recién al realizar una inspección de la estructura se pudo constatar el estado de avanzada corrosión en varias vigas y losas. En este caso la vida útil de proyecto de la estructura había terminado varios años atrás, pues el escaso recubrimiento estaba totalmente carbonatado por la lixiviación producida por el escurrimiento de las aguas de lluvia. La estructura no tenía más de 25 años al momento de la revisión y posterior reparación.

6.2 Segundo caso: Corrosión en balcones de hormigón visto por carbonatación



Foto N° 3 : corrosión en balcones de un edificio



Foto N° 4: fisuras debidas a la corrosión de armaduras

En la foto 3 se observa el avanzado grado de corrosión en los parapetos de los balcones de un edificio en Asunción, con 25 años de edad. Algunos elementos presentaban el estado de la foto, con expulsión de recubrimiento. En algunos casos aparecen fisuras (foto 4) y en otros aún no llegaban a mostrar síntomas externos. El estudio realizado muestra una variación significativa en los avances del

frente de carbonatación al realizar las mediciones en diferentes balcones, En la foto 5 se puede ver un avance de 20 mm en algunos balcones y en las fotos 6 y 7 se aprecia un avance total.



Foto N° 5 : Frente carbonatado de unos 20 mm en algunos balcones



Foto N° 6 : Frente carbonatado de unos 40 mm en algunos balcones



Foto N° 7 : Frente carbonatado de 50 mm en algunos balcones (total)

Es decir , en los mejores casos, con una carbonatación de 20 mm a los 25 años de edad, tendríamos un valor de k igual a $4 \text{ mm/año}^{1/2}$, lo que corresponde a una

condición media de calidad de hormigón. Ese valor nos indica que con un recubrimiento nominal de 25 mm (que con la dispersión de valores nos da valores característicos de 15 mm ó menos) el elemento tendría una vida útil de proyecto de aproximadamente 14 años. Ya en los peores casos, con un frente de carbonatación de 50 mm a los 25 años (o antes), el valor de k es igual a $10 \text{ mm/año}^{1/2}$, que corresponde a una calidad mala de hormigón. Ese valor nos indica, para las mismas consideraciones de recubrimiento, que el elemento tendría una vida útil de proyecto de apenas 1 a 1,5 años. En realidad, al principio existía una protección superficial otorgada por un barniz poliuretánico, lo cual hace que esos cálculos sean mas especulativos que reales, pero como no se realizaron trabajos de mantenimiento preventivo en el recubrimiento, el proceso de degradación llegó al punto actual.

También se realizaron cálculos de varianza para diferentes factores, tomando datos de valores de recubrimiento, de lecturas esclerométricas y de avance de carbonatación. Los factores considerados fueron la orientación y el nivel de piso . La orientación para ver el efecto de los vientos predominantes y las lluvias; mientras el nivel de piso para considerar diferentes coladas de hormigón . Los resultados indican que la orientación no es un factor significativo mientras que los niveles de piso si lo son. Es decir, las calidades de hormigón fueron muy diferentes en los distintos pisos, lo que resulta coherente con los resultados de ensayos a la compresión en probetas testigo extraídas de algunos elementos.

6.3 Tercer caso: Corrosión en estructura de hormigón armado por lixiviación

Se trata de una estructura de hormigón armado de un edificio utilizado anteriormente como un supermercado, que luego del cierre del mismo quedó en situación de abandono por varios años. En esas circunstancias, la falla en la impermeabilización de la terraza llevó a filtraciones de agua a través de la losa en determinados sectores. El agua infiltrada produjo la lixiviación del hormigón, y por

ende la pérdida de alcalinidad, que derivó en la aparición de severos síntomas de corrosión de armaduras en algunas losas, como se puede ver en la foto 8.



Foto N° 8 : corrosión en losas por lixiviación

6.4 Cuarto caso: Corrosión en estructura de hormigón armado por carbonatación y presencia de cloruros

En este caso estamos ante la presencia de una estructura prefabricada de hormigón, en la cual se encontraron algunos elementos con presencia de cloruros y con fuerte carbonatación, debida aparentemente a un estado de microfisuración de una de las caras. La presencia de cloruros se debe a la utilización de aditivos aceleradores de fraguado durante la fabricación de algunos elementos, impulsada probablemente por urgencias en el desmoldaje de la pieza y condiciones climáticas desfavorables (clima frío) . La situación de las fotos 9 y 10 corresponde a una edad del hormigón armado de cinco años , por lo que cualquier cálculo de vida útil resulta ocioso en este caso. La resistencia especificada del hormigón era de 25 Mpa a los 28 días, con un contenido mínimo de cemento de 390 Kg/m³. Es decir, buena resistencia y consumo bastante elevado de cemento.

En la misma estructura, en zonas de estacionamiento subterráneo, ocurren casos de corrosión debidos a la carbonatación inducida por la elevada concentración de gases carbónicos y otros, debida a los gases expedidos por los vehículos durante la combustión de la nafta y del gasoil. Ver foto 11 .



Fotos N° 9 y 10 : corrosión por cloruros y carbonatación



Foto N° 11 : corrosión por carbonatación acelerada por atmósfera contaminada

6.5 Quinto caso: Corrosión en estructura de hormigón armado por mala praxis constructiva y falta de mantenimiento

Una estructura que fuera utilizada por mas de veinte años sin presentar mayores

síntomas quedó abandonada durante otros diez años. Durante esos diez años de abandono, las filtraciones de agua a través del techo de tejas, mas las basuras acumuladas encima de la losa (polvo, hojas, etc) que captaban y retenían el agua, desagües taponados etc., ocasionaron que aumenten las filtraciones a través de la losa, y por ende las lixiviaciones del hormigón. Sumado esto a una defectuosa construcción (falta de recubrimiento de las armaduras) y a un diseño inadecuado (losa aliviada con ladrillos comunes – nervios estrechos y con hormigón mal compactado), hicieron que luego de varios años de abandono la estructura presente una sintomatología de severa corrosión de las armaduras (ver fotos 12 y 13).



Foto N° 12 : corrosión por lixiviación



Foto N° 13 : corrosión por lixiviación y diseño defectuoso

7. CONCLUSIONES

Por sus evidentes consecuencias económicas (altos costos en la reparación de las estructuras) y sociales (riesgos de colapsos parciales o totales), concluimos que la importancia de planear, diseñar,

construir y mantener las estructuras de hormigón armado teniendo como objetivos no solamente el aspecto estructural sino también la durabilidad y la consecución de una vida útil predeterminada es indudable. Además, que es necesaria la autocrítica sobre nuestros procedimientos en forma general, para ver donde podemos mejorar con relación al tema en estudio.

8. REFERENCIAS

[1] CEHELLA ISAIA, G. ; “CONCRETO – Ensino, Pesquisa e Realizações” Vol. 1 , Cap. 1 ; IBRACON, Sao Paulo, 2005

[2] JIMÉNEZ MONTOYA, GARCÍA MESEGUER, MORÁN CABRÉ ; “Hormigón Armado” - 8 va. Edición - Edit. Gustavo Gili - Madrid, 1976; p. 114/115

[3] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN; “ Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón pretensado - EP 77” ; España ; 1977; p. 76

[4] HELENE, P. ; “Vida útil das estruturas de concreto”; Anales IV CONPAT; Tomo 1 ; Porto Alegre, 1997 ; pp. 1 a 30

[5] ANDRADE, T. ; “CONCRETO – Ensino, Pesquisa e Realizações”; Vol. 1 , Cap. 25 ; IBRACON, Sao Paulo, 2005

[6] ACI 365.1R-00 ; “Service Life Prediction – State of the Art report”; ACI, 2000

[7] TASK GROUP 5.6 ; “Model Code for Service Life Design - bulletin 34”; fib (CEB-FIB), Lausanne, Suiza , 2006

[8] COMITÉ TÉCNICO CONCRETO ESTRUTURAL ; “Comentários Técnicos e Exemplos de Aplicação da NB-1 (NBR 6118)” ; IBRACON, Sao Paulo, 2007