



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



**MODELOS DETERMINISTICOS DE PREDICCIÓN DE VIDA DE SERVICIO EN EL
CONCRETO ARMADO. PROPUESTA DE CONTENIDO Y EJEMPLO PARA
NORMATIVA MEXICANA**

J.M. Mendoza-Rangel¹, P. Castro-Borges¹

¹Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Unidad Mérida.
Carretera Antigua a Progreso, Km. 6, A.P. 73 Cordemex, C.P. 97310, Mérida, Yucatán, México.

RESUMEN

Aunque a nivel internacional han cobrado auge los modelos deterministas y probabilistas para predecir vida de servicio y vida residual de estructuras de concreto, en México aún no se le da importancia al tema. Este trabajo discute una propuesta de normativa que incluye la utilización de datos empíricos para calcular vida de servicio y vida de servicio residual usando un método determinista (método de los factores). Se mencionan los conceptos que se deben conocer, los datos con los que se debe contar y se describe un método sencillo basado en una mezcla de diversas normativas internacionales pero aplicables a México. Por último se muestra un ejemplo sencillo de cálculo.

Palabras clave: Normativa, vida de servicio, concreto, corrosión.

ABSTRACT

Although deterministic and probabilistic models have acquired importance to predict service life and residual life of concrete structures, research in Mexico is not enough on this regard. This work discusses a standard proposal that includes the use of empirical data to calculate service and residual life using a deterministic method (factors method). Concepts to know, data to take into account and a description of a simple method based on a mixture of diverse international standards but applicable to Mexico are described. Finally a simple example of calculation is showed.

Keywords: Codes, service life, concrete, corrosion.

INTRODUCCIÓN

La predicción de la vida de servicio en el concreto reforzado es un proceso complejo y que consume mucho tiempo. En la actualidad, los métodos de predicción no se han desarrollado dentro de una ciencia exacta debido a los muchos y diferentes factores que deben ser considerados, de ahí el hecho de que la predicción de vida de servicio sea una actividad interdisciplinaria¹.

La vida de servicio puede estar dividida en dos diferentes enfoques principalmente:

1. Enfoque determinista
2. Enfoque probabilista

De acuerdo a Sarja y Vesikari², los modelos de durabilidad determinista son utilizados en diseños de durabilidad determinista donde la dispersión de la degradación (o desempeño o vida de servicio) no es tomada en cuenta. Con valores de parámetros conocidos el modelo alcanza solamente un valor (de degradación, desempeño o vida de servicio) el cual es a menudo el valor principal.

El enfoque probabilista o estocástico se considera esencial en el diseño mecánico de estructuras, ya que la dispersión debida a la degradación es normalmente amplia y el grado de riesgo puede ser mayor. Cuando se utilizan modelos de durabilidad estocásticos, las estructuras son diseñadas para asegurar una confiabilidad mínima con respecto al objetivo de la vida de servicio. Un ejemplo de ambos enfoques se presenta en la figura 1.

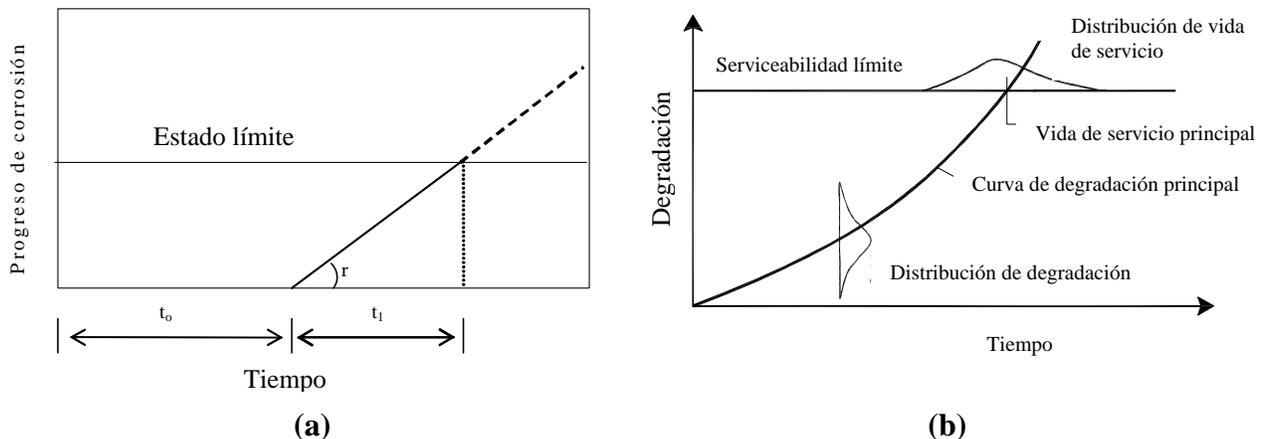


Figura 1.- (a) Enfoque determinista y (b) Enfoque probabilista.

A nivel mundial estos dos enfoques han cobrado auge, sin embargo en México aún no se les ha dado la importancia necesaria. Aunque ya se han realizado algunos esfuerzos, aún no se tiene el suficiente material científico para diseñar por durabilidad, en parte, debido a la falta de



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



especialistas en la materia. En nuestro país se han realizado ya algunas revisiones críticas³ sobre los modelos y enfoques existentes, así como propuestas de nuevos enfoques⁴ con la finalidad de continuar con el trabajo realizado e innovando en nuevas áreas.

El objetivo de este trabajo es discutir el contenido de una propuesta de normativa que incluye la utilización de datos empíricos para calcular vida de servicio y vida de servicio residual usando un método determinista (método de los factores). Se mencionan los conceptos que se deben conocer, los datos con los que se debe contar y se describe un método sencillo basado en una mezcla de diversas normativas internacionales pero aplicables a México. Por último se muestra un ejemplo sencillo de cálculo utilizando datos generados en México.

PROPUESTA DE ORDEN Y CONTENIDO DE LA NORMA

Predecir la vida de servicio es una tarea compleja que necesita de ciertos cuidados y experiencia para eficientarlos. Masters⁵ en 1987 sugirió requerimientos para un sistema de predicción de vida de servicio y entre los más importantes menciona:

1. Se deberá definir explícitamente el problema antes de intentar resolverlo.
2. Se deberá definir vida de servicio tal que a) pueda medirse (cuantitativamente) y b) pueda relacionarse al desempeño en servicio.
3. Se deberá estar abierto a nuevos enfoques y métodos más que aceptar ciegamente los tradicionales.
4. Se deberá utilizar procedimientos simples y sistemáticos teniendo como base la lógica, sentido común y ciencia de materiales.
5. Se deberá estar consciente que a) es imposible simular todos los esfuerzos climatológicos en el laboratorio, y b) no es necesario hacerlo de cualquier manera.

Se aprecia de estas recomendaciones que la observación, la evaluación y el análisis lógico son herramientas necesarias cuando se pretende realizar la predicción de la vida de servicio de cualquier estructura. Como ejemplo, en 1993 el Instituto de la Arquitectura de Japón⁶ (AIJ por sus siglas en inglés) publicó la versión corta de la “Guía Principal para la planificación de Vida de Servicio en edificaciones” en donde presenta los siguientes principios para la predicción de vida de servicio en concordancia con Masters:

- Evaluación del deterioro físico
- Evaluación de la obsolescencia

Para el caso de México, se tienen normas⁷ sobre características del concreto hidráulico para uso estructural del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (ONNCCE), que si bien, contempla a la durabilidad, no incluye modelos de predicción de vida de servicio. Es en base al esquema de ONNCCE que la propuesta de normativa del presente trabajo incluirá un modelo determinístico de predicción de vida de servicio utilizando el método de los factores. Esta propuesta estará conformada por definiciones y



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008

Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



modelos tomados de otras normativas internacionales, pero con resultados obtenidos y aplicables a México.

El formato de la norma ONNCCE es el siguiente:

1. Título de la Norma
2. Prefacio
3. Introducción
4. Índice
5. Objetivo
6. Campo de aplicación
7. Referencias
8. Definiciones
9. Especificaciones

Siguiendo este formato, la propuesta de título sería: “Modelos de predicción determinísticos de vida de servicio en concretos para uso estructural”

En el prefacio se enumerarán a todas aquellas instituciones públicas y privadas que participen en la elaboración y revisión de dicha norma, en la introducción se hará una breve descripción de la importancia de los modelos de predicción en México y el mundo, su aplicación y beneficio en el diseño y construcción de nuevas obras. En el índice se hará una enumeración de los tópicos antes mencionados.

Como propuesta de objetivo se tiene el siguiente: “Esta norma mexicana establece las especificaciones para predecir la vida de servicio en concreto para uso estructural mediante la utilización de un modelo determinístico usando el método de los factores”.

En cuanto al campo de aplicación, éste será aplicable al concreto hidráulico para uso estructural sea industrializado o hecho en obra con medios mecánicos. Las referencias serán a las normas y códigos tanto nacionales como internacionales en las que se base la presente norma para su elaboración, así como a investigaciones y resultados nacionales sobre el tema.

En lo que se refiere a las definiciones, se utilizarán varias de diversos códigos así como otras publicadas por los autores, entre las que destacan para su utilización en los modelos:

- Vida de Servicio Estándar: El tiempo hasta que un estado de deterioro es alcanzado cuando la estructura completa o sus partes, elementos, componentes o equipamiento se han degradado bajo cualquiera de las condiciones especificadas, bajo las circunstancias de diseño “normal”, construcción, uso, mantenimiento y exposición climática. La vida de servicio estándar se predice en base a la experiencia.



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008 Chihuahua; Chih. México Del 12 al 14 de Noviembre



- Vida de Servicio Estimada: La vida de servicio estándar multiplicada por una variedad de factores basados en consideraciones más cuidadosas de diseño actual, construcción, uso, mantenimiento y exposición climática de una construcción específica, parte de construcción, elemento, componente o equipamiento.
- Durabilidad⁸: Capacidad de un material de construcción, elemento o estructura de concreto de resistir las acciones físicas, químicas, biológicas y ambientales vinculadas al efecto del cambio climático global con su entorno durante un tiempo determinado previsto desde el proyecto, manteniendo su serviceabilidad y conservando su forma original, propiedades mecánicas y condiciones de servicio.
- Vida de Servicio: Es el periodo de tiempo durante el cual el desempeño de un material, elemento o estructura de concreto conserva los requerimientos de proyecto en términos de seguridad (resistencia mecánica y estabilidad, seguridad en caso de fuego, seguridad en uso), funcionalidad (higiene, salud y medio ambiente, protección contra el ruido y ahorro energético y confort térmico) y estéticos (deformaciones, agrietamientos, desconchamientos), con un mínimo de mantenimiento que permita controlar los efectos del cambio climático global en su entorno.

Las dos últimas definiciones son propuestas de los autores cuya originalidad radica en adaptar y complementar las definiciones dadas en los códigos y normas internacionales con la intención de unificar criterios, además de incluir dentro de ellas el impacto del cambio climático global, tema por demás importante en la actualidad.

También se definirá que es el método de los factores, para lo cual se utilizará la definición establecida por la norma ISO 15686 parte 1⁹ [ISO 2000], la cual menciona que: “el método de los factores para la estimación de vida de servicio permite hacer la estimación de un componente o ensamble en condiciones específicas. Está basado en una vida de servicio de referencia (normalmente la vida de servicio esperada con una serie de condiciones en servicio bien definidas que aplican a ese tipo de componente o ensamble) y una serie de factores modificando esa relación a las condiciones específicas del caso”.

Será necesario, además de lo mencionado en las normas anteriores, analizar los factores de degradación y procesos. De acuerdo a Sarja y Vesikari, todos los factores de degradación, procesos y efectos posibles deben ser listados, como se ejemplifica en la tabla 1.

Tabla 1.- Factores de degradación y procesos

Factor de degradación	Procesos	Degradación
Mecánico		
Carga estática	Deformación	Deflexión, fractura, falla
Carga cíclica	Fatiga, deformación	Deflexión, fractura, falla
Carga por impacto	Fatiga	Vibración, deflexión, fractura, falla
Biológico		



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Microorganismos	Producción de ácido	Filtraciones
Químico		
Agua blanda	Filtraciones	Desintegración del concreto
Ácido	Filtraciones	Desintegración del concreto
Ácido	Neutralización	Despasivación del acero
Gases acidificantes	Neutralización	Despasivación del acero
Dióxido de carbono	Carbonatación	
Dióxido de azufre		
Dióxido de nitrógeno		
Cloruros	Penetración, destrucción capa pasiva	Despasivación del acero
Despasivación del acero	Corrosión	Expansión del acero, pérdida de diámetro en las barras, pérdida de adherencia.
Tensión/cloruros	Corrosión por tensión	Falla en las prestaciones
Sulfatos	Presión	Desintegración del concreto
Agregados silicatos, álcalis	Reacción del silicato	Expansión, desintegración
Agregados carbonato	Reacción del carbonato	Expansión, desintegración
Físicos		
Cambio de temperatura	Expansión	Encortamiento, alargamiento, deform. rest.
Cambio en la humedad relativa	Contracción, hinchazón	Encortamiento, alargamiento, deform. rest.
Baja temperatura, agua	Formación de hielo	Desintegración del concreto
Sales de deshielo, nieve	Transferencia de calor	Escamas en el concreto
Hielo flotante	Abrasión	Fractura
Tráfico	Abrasión	Surcado, desgaste, rasgado
Corriente de agua	Erosión	Daño superficial
Agua turbulenta	Cavitación	Poros

Una vez definidos los factores que intervienen en la estructura, el paso final del proceso de producir un modelo de predicción de vida de servicio es la cuantificación y formulación. La información obtenida de ensayos, junto con resultados de pruebas de campo, es comúnmente suficiente para construir un modelo de degradación (o desempeño) como los que siguen:

$$\mu(D) = D(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \quad (1)$$

donde:

$\mu(D)$ = degradación principal
 x_1, x_2, x_n = parámetros del material, estructural y ambiental
 t = la edad de la estructura

Un modelo de desempeño se puede fácilmente derivar de un modelo de degradación, ya que, de hecho, el desempeño es lo opuesto a la degradación. La forma general de un modelo de desempeño se puede escribir:

$$\mu(P) = D(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \quad (2)$$



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



donde:

$\mu(P)$ = desempeño principal
 x_1, x_2, x_n = parámetros del material, estructural y ambiental
 t = la edad de la estructura

La vida de servicio principal es aproximada al periodo de tiempo sobre el cual la degradación principal alcanza un máximo permisible de degradación, o sobre el cual el desempeño principal alcanza un mínimo permisible de desempeño. Cuando la máxima degradación, D_{\max} , o el mínimo desempeño, P_{\min} , es conocido, la correspondiente vida de servicio principal se puede trabajar utilizando los modelos de degradación o desempeño:

$$\mu(t_L) = t_L(x_1, x_2, \dots, x_n, D_{\max}) \quad (3)$$

$$\mu(t_L) = t_L(x_1, x_2, \dots, x_n, P_{\min}) \quad (4)$$

donde $\mu(t_L)$ es la vida de servicio principal

Cabe señalar que cuando se determina la vida de servicio principal mediante los modelos de degradación o de desempeño con las fórmulas arriba mencionadas, los resultados no son exactos, sin embargo ofrecen una aproximación muy cercana a la principal.

EJEMPLO

Calculo de la vida de servicio de una estructura por el efecto de la carbonatación

Para efectos de ejemplo, a continuación se usarán datos extraídos de probetas expuestas a un clima tropical marino del norte de Yucatán por 15 años¹⁰. Como ejemplo de un modelo determinista, se utilizará el efecto de la carbonatación para determinar la vida de servicio de una estructura, tomado del manual Lifecon¹¹, pero utilizando datos de investigaciones propias:

En la tabla 2, se resumen los factores necesarios para el procedimiento de cálculo:

Tabla 2.- Factores necesarios para el modelo determinístico para el ingreso de carbonatación.

Factor	Unidad	Formato	Fuente
Profundidad de carbonatación X_c	mm	ND(μ, σ)	Mediciones
Edad del concreto t en años	s	D	Documentación estructural
Cobertura de concreto d_{cover}	mm	ND(μ, σ)	Mediciones

Se da la siguiente información:



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



- Recubrimiento de concreto d_{Rec} , se mide un valor principal de $\mu_{Rec} = 30$ mm y una desviación estándar de $\sigma_R = 8$ mm
- La profundidad de carbonatación X_c se midió en tres puntos a una edad de 15 años. El valor principal es de $\mu_s = 20$ mm.
- Contenido promedio de CO_2 en el aire de 9.4×10^{-4} $KgCO_2/m^3$.

Se calcula el coeficiente de variación de la profundidad de carbonatación mediante la ecuación:

$$CoV_{X_c} = a \cdot \left[\left(\frac{X_c}{\tau} \right)^2 \cdot 10^{11} \right]^b \quad (6)$$

donde:

- CoV: Coeficiente de variación [%]
a: Parámetro de regresión [10^{11b} $m^5/(s \text{ kgCO}_2)$], aquí $a = 68,9$
b: Parámetro de regresión [de signo -]; aquí $b = -0,22$
 $R_{ACC,0m-1}$: Valor principal de la resistencia a la carbonatación inversa [10^{-11} $m^5/(s \text{ kgCO}_2)$]
 X_c : Profundidad de carbonatación medida de ensayos [m]
 τ : Constante de tiempo [$(s \text{ kgCO}_2/m^3)^{0.5}$];

Para calcular este coeficiente de variación, primero calcularemos la constante de tiempo τ con la ecuación:

$$\tau = \sqrt{2 \cdot \Delta C_s \cdot t} \quad (7)$$

sustituyendo:

$$\tau = \sqrt{2 \cdot 9.4 \times 10^{-4} \cdot 15 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 943 \quad (8)$$

sustituyendo este valor en la ecuación (6), tenemos:

$$CoV_{X_c} = 68.9 \cdot \left[\left(\frac{0.020}{943} \right)^2 \cdot 10^{11} \right]^{-0.22} = 30\% \quad (9)$$

el valor principal de la velocidad de carbonatación K se determina de:

$$X_c(t) = K \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



sustituyendo valores para obtener K tenemos:

$$K = \frac{X_c}{\sqrt{t}} = \frac{20}{\sqrt{15}} = 5.16 \quad (11)$$

por lo tanto el valor principal es $\mu_K = 5.16 \text{ mm}/\sqrt{\text{a}}$. La desviación estándar será entonces:

$$\sigma_K = 0.30\mu_K \quad (12)$$

La vida de servicio fijada es de 50 años, con un índice de confiabilidad mínima de $\beta_0 = 1.8$. Este último valor tomado de tablas, cuyos índices varían dependiendo del tipo exposición ambiental, que para este ejemplo es un clima húmedo, raramente seco (XC1) tomado de la norma europea EN 206. El procedimiento de cálculo para saber si se cumple el requerimiento (la predicción de vida de servicio) es el siguiente:

Se calcula una variable de tensión S (profundidad de carbonatación a la edad de $T = 50$ a.

$$\mu_{X_c}(t) = 5.16 \cdot \sqrt{(50)} = 36.5 \quad (13)$$

$$\sigma_{X_c}(t) = 36.48 \cdot 30\% = 10.9 \text{ mm} \quad (14)$$

Haciendo una transformación a un espacio estándar:

$$U_1 = \frac{R-15}{8} \quad U_2 = \frac{S-36.5}{10.9} \quad (15)$$

$$L(U_1, U_2) = R - S = 8U_1 - 10.9U_2 - 21.5 = AU_1 + BU_2 + C = 0 \quad (16)$$

Calculando la distancia de la línea de estado límite desde el origen usando el llamado formato normal Hesse (comparación de coeficientes A, B, C):

$$\beta = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} = -1.6 < 1.8 \quad (17)$$

Esto significa que después de 50 años el índice de confiabilidad decaerá a niveles muy por debajo de la confiabilidad objetivo.

Si se busca la vida de servicio residual, la confiabilidad tiene que estar en $\beta = \beta_0 = 1.8$. El esfuerzo S es igual a la profundidad de carbonatación dependiente del tiempo X_c :



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



$$U_1 = \frac{R-30}{8} \quad U_2 = \frac{S-5.16 \cdot \sqrt{t}}{5.16 \cdot \sqrt{t} \cdot 0.30} \quad (18)$$

Utilizando el método de comparación de coeficientes como el arriba usado:

$$\beta = \frac{(30-5.16\sqrt{t})}{\sqrt{(8)^2 + [1.55\sqrt{t}]^2}} = 1.8 \quad (19)$$

Resolviendo la ecuación (19) tenemos entonces que la vida de servicio es de:

t = 7 años

Esto significa, que la predicción de la vida de servicio es mucho más baja para las condiciones dadas en el modelo de lo que se pretende en realidad en el diseño (50 años). Con esto se puede observar que los modelos de predicción son de gran importancia para poder tomar decisiones oportunas desde el diseño de proyecto. En este caso, existen variables que deberían incorporarse a los modelos deterministas, por ejemplo: el significado del término de vida de servicio a 7 años para una estructura mexicana, la calidad de los materiales para los que fueron creados estos métodos comparada con la nuestra y los ambientes que son diferentes, por decir algunas. A pesar de esto, el uso de este modelo da una idea muy cercana del comportamiento futuro de la estructura y su inclusión en la normativa mexicana sería de mucha utilidad para cálculos rápidos y con un nivel de confiabilidad importante, más aún si se le incorporan variables correspondientes a nuestro clima, materiales y costumbres, lo cual desde luego se está realizando.

CONCLUSIONES

Una normativa mexicana que incluya modelos determinísticos de predicción de vida de servicio es una necesidad imperante que daría a los diseñadores y constructores una herramienta útil y práctica.

El modelo determinístico con el método de los factores no es muy exacto como los modelos probabilísticos, sin embargo da una idea clara y muy cercana del comportamiento de las estructuras en el futuro. Sus principales ventajas son su rapidez y sencillez de cálculo.

AGRADECIMIENTOS



3er Congreso Nacional ALCONPAT 2008
Chihuahua; Chih. México
Del 12 al 14 de Noviembre



Los autores agradecen el apoyo parcial de CONACYT mediante los proyectos: Ciencia Básica 57420 y CIAM 54826 y J.M. Mendoza-Rangel agradece la beca para estudios de doctorado No. 173314. Los autores agradecen a M Balalancán su apoyo en la obtención de datos para uso del modelo discutido aquí.

REFERENCIAS

1. CIB W80 / RILEM 175 SLM: "Service Life Methodologies Prediction of Service Life for Building and Components", Task Group Performance Based Methods for Service Life Prediction, State of the Art Reports, March (2004).
2. A. Sarja, and E. Vesikari: "Durability Design of Concrete Structures", Manuscript of RILEM Report of TC 130-CSL, RILEM Report Series 14, Chapter 7 Durability models. pp: 97-111, E & FN Spon, Chapman and Hall, 165 p., (1996).
3. J.M. Mendoza-Rangel, P. Castro-Borges: "Critical Review of Service Life Concepts of Reinforced Concrete Structures", ECS Transactions, Vol. 3, No. 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 3-8, (2007)
4. P. Castro-Borges, P. Helene: "Service Life of Reinforced Concrete Structures. New Approach", ECS Transactions, Vol. 3, No. 13, ISBN 978-1-56677-540-3, pp. 9-14, (2007)
5. L.W. Masters: "Service life prediction – A state of the art", 4th International Conference on Durability of Building Materials and Components, Singapore, 4-6 November, (1987)
6. Architectural Institute of Japan (AIJ): "The English Edition of Principal Guide for Service Life Planning of Buildings", Architectural Institute of Japan, Japan, (1993).
7. NMX-C-403-ONNCCE-1999: "Construction Industry – Hydraulic Concrete for Structural Use" (in Spanish), México, (1999).
8. J.M. Mendoza-Rangel, P. Castro-Borges, "Validez de los conceptos y modelos vigentes de vida de servicio de estructuras de concreto ante los efectos del cambio climático global. situación actual", Artículo aceptado como Nota Técnica, Materiales de Construcción, (2008).
9. International Organization for Standardization (2000): ISO 15686-1 "Buildings and constructed assets – service life planning – Part 1: General principles". International for Standardization, Geneva, Switzerland, (2000).
10. P. Castro, L. Maldonado, "Initial efforts to evaluate the corrosion problems in the infrastructure of Mexican southeast coastal zones", NACE International, Innovative Ideas for Controlling the Decaying Infrastructure, Victor Chaker Editor, ISBN: 1-877914-83-5, (1995)
11. Lifecon Deliverable D 3.2, Service Life Models, "Instructions on methodology and application of models for the prediction of the residual service life for classified environmental loads and types of structures in Europe", (2003)