

Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro

Service-life prediction of reinforced concrete structures through a chloride diffusion model

Anile Ossorio¹, Raydel Lorenzo^{2}*

¹Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA). Washington Liuz N.º 314 Apto 506, Bairro Centro. CEP 90010-460. Porto Alegre, Brasil.

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Federal de Tocantins. Campus Universitario de Palmas, Tocantins. 109 Norte, Av. NS 15, ALC N.º 14. CEP 77001-090. Tocantins, Brasil.

(Recibido el 27 de agosto de 2013. Aceptado el 25 de marzo de 2014)

Resumen

La mayor parte de los deterioros en las estructuras de hormigón armado se deben a la corrosión. En este artículo se presenta una metodología clara, que permite predecir cuantitativamente la vida útil de las estructuras de concreto armado frente al ataque de iones cloruro a través de la utilización de modelos de difusión de cloruros. Es mostrada la aplicación de la metodología a un caso de estudio en el cual se han seguido las prescripciones de las normas de durabilidad. Los resultados de estimación de la vida útil son contrastados con las recomendaciones utilizadas comúnmente demostrando la necesidad de los análisis de vida útil.

-----*Palabras Claves:* Difusión, cloruros, corrosión, ley de fick, vida útil, hormigón, durabilidad

Abstract

Most of the pathologies presented in the concrete structures are because of the corrosion process. Herein, a methodology that allows doing a quantitative estimation of the service life of concrete structures is presented. This methodology uses chloride diffusion models. The application of the methodology to a study case is presented. In this study case were considered all the prescriptions of the durability standards. The results of the estimations

* Autor de correspondencia: Raydel Lorenzo, e-mail: rlorenzo@uft.edu.br; teléfono: + 55 63 81423627 (R. Lorenzo)

of the service life of the structure are compared with the recommendations commonly used, showing the necessity of service life studies.

-----**Keywords:** Diffusion, chloride, corrosion, fick's law, service life, concrete, durability

Introducción

La corrosión de las armaduras de refuerzo es el principal problema de durabilidad y uno de los problemas aún no resueltos satisfactoriamente por la tecnología del hormigón. Numerosos modelos de vida útil han sido desarrollados basados en un valor umbral del contenido de cloruros para que ocurra el fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo como límite de la vida en servicio de las estructuras. El más difundido y aceptado hoy por la comunidad científica es el modelo de Tutti [1] (ver Figura 1). Este modelo considera un período de iniciación en el que los iones cloruros y la carbonatación avanzan por la masa de hormigón hasta llegar a la armadura y despasivarla y, otro periodo de propagación en el cual la armadura se corroe hasta llegar a un grado de deterioro que compromete la funcionalidad o la seguridad de la estructura. El análisis de la vida útil de las estructuras puede traer consigo el diseño a partir de criterios de durabilidad, y elaborar planes de mantenimiento y reparación basados en una fundamentación más sólida.

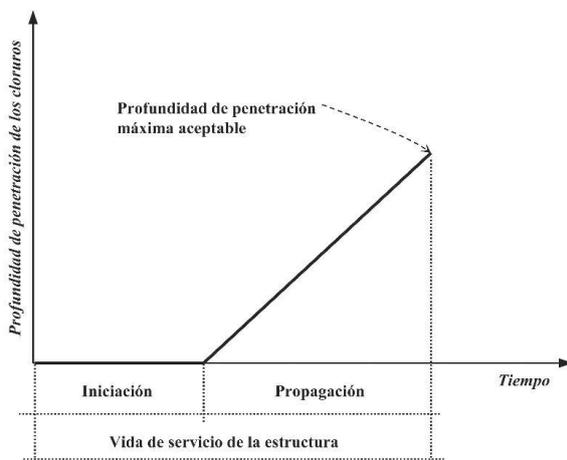


Figura 1 Modelo de vida útil para estructuras de concreto armado [1]

Ante la presencia de cloruros es inevitable la corrosión, sin necesidad de una disminución del pH para provocar la ruptura de la capa pasivante. Esta última se vuelve cada vez más porosa por la acción de los cloruros hasta que desaparece con un nivel crítico de estos [2]. La figura 2 presenta la combinación de contenido de cloruros y humedad relativa que pueden provocar corrosión en las barras de acero de refuerzo.

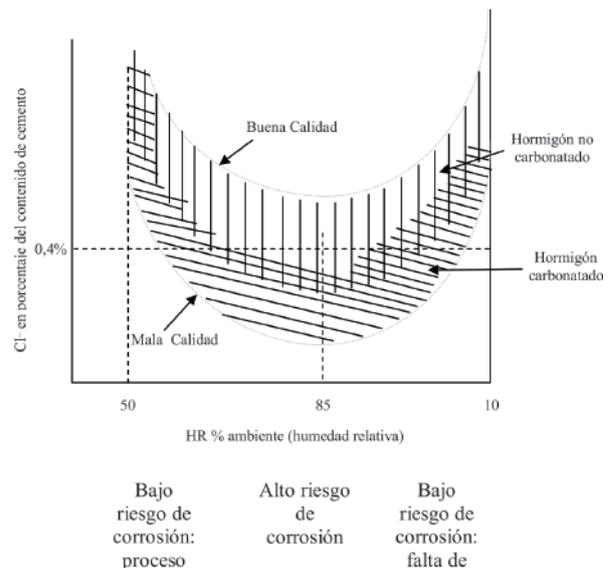


Figura 2 Porcentaje de iones sobre el contenido de cemento para el inicio de la corrosión [2]

Existen varios mecanismos de entrada de los iones cloruros dentro de la masa de hormigón. Los que comúnmente ejercen mayor influencia en la penetración de los iones son la absorción capilar y la difusión. Las succiones que aparecen en la superficie del hormigón no saturado provoca la entrada del agua de la superficie del elemento de concreto y consecuentemente del cloruro que está contiene. Este fenómeno es conocido como absorción capilar y generalmente ocurre en aproximadamente 1 cm de profundidad, siendo

detenido por la discontinuación de la red de poros [3]. La difusión es el transporte de iones estimulado por la diferencia de concentración de la sustancia en cuestión. El efecto combinado de estos dos fenómenos provoca la entrada de los iones cloruros en la masa de hormigón. Los perfiles de cloruros obtenidos en muchos elementos expuestos al aerosol marino en forma natural reflejan que el mecanismo inicial de penetración es de absorción y posteriormente gana fuerzas el mecanismo de difusión.

El fenómeno de la difusión puede ser modelo utilizando la Segunda Ley de Fick [4]. Está expresada matemáticamente como se presenta en la ecuación (1):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

C : Concentración del ión cloruro a una profundidad en un tiempo .

D_c : Coeficiente de difusión del material poroso (parámetro del modelo).

La solución exacta a esta ecuación es mostrada en la ecuación (2):

$$\frac{(C_{max}-C_d)}{(C_{max}-C_{min})} = erf \left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_c \cdot t}} \right] \quad (2)$$

C_{max} : Concentración del ión cloruro en la superficie.

C_d : Concentración del ión cloruro a cierta profundidad.

C_{min} : Concentración del ión cloruro del hormigón antes de ser expuesto.

erf: Función error de Gauss.

Como resultado del proceso de difusión, la concentración de cloruros decrece desde la superficie hacia el interior del hormigón. En una estimación aproximada, puede suponerse que la profundidad de penetración sigue una ley proporcional a la raíz cuadrada del tiempo [5].

En esta investigación solo se abordan para el cálculo del tiempo de llegada de los cloruros a

la armadura de acero los mecanismos de entrada de iones cloruro por absorción capilar y difusión. El primero aunque no se estudia con rigor, no es posible cuantificar en cual medida ocurre en el ensayo que se explicara posteriormente para determinar los parámetros de difusión. Por esta razón de algún modo el coeficiente de difusión va a estar considerando el proceso de absorción capilar que pueda existir.

Modelos de difusión de cloruros

Muchas de las investigaciones a nivel mundial enmarcadas dentro de la temática de vida útil de estructuras de hormigón están encaminadas a desarrollar modelos matemáticos que cuantifiquen realmente la vida útil de las estructuras. La mayoría de los autores que tratan de predecir la vida útil de las estructuras consideran que esta termina en el instante en que ocurre la despasivación del acero de refuerzo. Los modelos de difusión de cloruros se pueden dividir en dos grupos: Modelos de Fick y Modelos de Elementos finitos. El primero de estos dos grupos soluciona de manera operacional la ecuación diferencial que rige el fenómeno de la difusión conocida como segunda ley de Fick. Los modelos de difusión por elementos finitos resuelven de forma numérica la ecuación que rige el fenómeno de difusión, en este trabajo es utilizado un modelo que resuelve operacionalmente la segunda ley de Fick [6].

Modelos simplificados matemáticamente

Se estudiaron detalladamente varios modelos con el objetivo de utilizar para el cálculo el método más exacto que utilice parámetros fácilmente medibles. Algunos de los modelos de difusión referenciados en la literatura son los siguientes:

- Modelo de Mangat y Molloy.
- Modelo de Maage.
- Modelo de Gulikers.
- Modelo de Stanish y Thomas

El modelo de Stanish & Thomas [7] ha sido el seleccionado para esta investigación. Este modelo utiliza el concepto de “edad efectiva” y propone una ecuación para calcular el coeficiente de difusión promedio (D_{AVG}) durante la vida de la estructura, esta es la razón fundamental por la cual se empleará este modelo, ya que de esta forma tiene en cuenta la variabilidad de la difusión en el tiempo.

Las investigaciones desarrolladas por [8] demostraron que los modelos que consideran aproximaciones matemáticas sobreestiman la vida útil de las estructuras, arrojando valores mayores a los que se obtendrían considerando modelos menos aproximados. En [7] se advierte de la necesidad de considerar el coeficiente de difusión de cloruros dependiente del tiempo, de modo que este sea considerado como una función y no como un determinado valor para un tiempo fijo para el cual se evalúe la ley de Fick. De esta forma propusieron el procedimiento matemático que se explica más adelante.

Determinación del coeficiente aparente de difusión de cloruro

La determinación de la difusión de cloruros en el hormigón se basa en la realización de sucesivos ensayos de cloruros totales, este ensayo está normado en la norma ASTM C 1556-04 [9]. El procedimiento en laboratorio sería el siguiente:

- Una vez elaborado el hormigón objeto de estudio y curado para el tiempo que se halla establecido.
- Primero, se colocarán las muestras en una solución de agua con hidróxido de cal Ca (OH₂) en calidad técnica y proporción de 3g/L hasta peso constante, de modo que se mantengan las condiciones de alcalinidad propias del hormigón.
- Segundo, se recubrirán en todas sus caras menos una (en este caso una cara del cilindro) con resina epoxi o parafina de modo que les

brinden una capa impermeable y protectora a las mismas.

- Tercero, se colocarán en una nueva disolución de agua con cloruro de sodio NaCl en calidad técnica y proporción de 165g/L, de modo que el agua sobrepase en todos los casos las muestras, luego se mantendrán como mínimo durante 35 días.
- Cuarto, transcurrido dicho intervalo de tiempo las muestras se sacarán a temperatura ambiente durante 24 horas, comenzándose el proceso de obtención de capas en función de las profundidades según establece la norma ASTM C 1556-04 [9]. Para cada una de las 8 capas que deben ser estudiadas se deberá obtener de 5 a 10g de hormigón para la realización de los ensayos de cloruros totales.

Una vez obtenidos los valores de la concentración de cloruro(%) para cada una de las capas estudiadas, la norma establece la ecuación (3) la cual se debe ajustar por medio de una regresión no lineal al perfil de cloruro obtenido por medio de los ensayos de laboratorio, optimizando los valores del coeficiente aparente de difusión D_a y la concentración de cloruros superficiales C_s , de esta forma se obtiene el coeficiente de difusión de cloruros para el tiempo de exposición o duración del ensayo, (Ej: 35días).

$$C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}} \right) \quad (3)$$

Donde:

$C_{(x,t)}$ -concentración de cloruros medida en los ensayos (%).

C_s - concentración superficial de cloruro (%).

C_i - concentración inicial de cloruro (%).

D_a -coeficiente aparente de difusión de cloruro (m^2/s).

La figura 3 muestra el perfil de cloruros obtenido del ajuste de curva realizado en el programa MATLAB®.

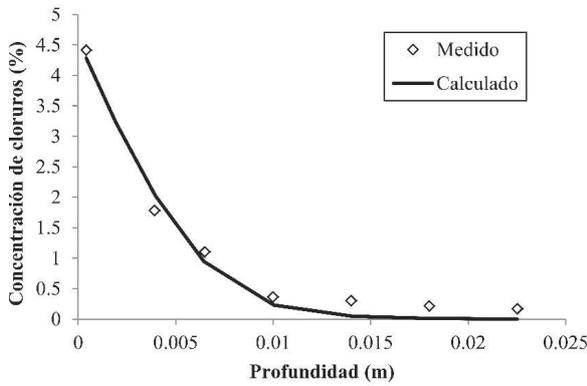


Figura 3 Ejemplo de ajuste de curva realizado en MATLAB® para la obtención de D_a y C_s a partir del perfil de cloruro determinado en el laboratorio para una de las muestras

Coefficiente de Difusión de Cloruro en Función del Tiempo D_{AVG}

El coeficiente de difusión aparente D_a fue determinado para el tiempo de exposición que duró el ensayo. El envejecimiento del hormigón, así como la entrada de los cloruros implican que los poros del mismo sucesivamente se vayan cerrando, tal como lo demuestra la curva de la figura 3, donde se percibe la disminución de la penetración de cloruro con respecto a la profundidad y consecuentemente al tiempo. Por tanto, considerar un valor constante para la difusión de cloruro resulta un error que generalmente sobrestima la vida útil de las estructuras, por lo cual el modelo de Stanish & Thomas [7] considera la variación de este parámetro. La definición de este coeficiente variable implica la realización de un mayor número de ensayos pero sin un aumento en la complejidad de estos.

Para la obtención del coeficiente variable se requiere que a dos juegos de probetas se les determine el coeficiente de difusión de cloruros, siendo el tiempo de exposición a la solución de cloruros diferente para cada juego de probetas. El ensayo puede comenzar a la misma edad y tener diferentes tiempos de exposición, o comenzar

a edades diferentes, con la misma duración de exposición, ejemplo (35 días y otra a los 90 días). El valor de D_{avg} es calculado utilizando las ecuaciones (4) y (5) sugeridas por [7].

$$D_{AVG} = D_{ref} \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^m \tag{4}$$

$$t_{eff} = \begin{cases} \left[\frac{(1-m)(t_2-t_1)}{t_2^{1-m} - t_1^{1-m}} \right] & m \neq 0,1 \\ \frac{t_2-t_1}{\ln \frac{t_2}{t_1}} & m = 1 \end{cases} \tag{5}$$

Donde t_1 es la edad a la que comenzó la exposición de uno de los juegos de probetas y t_2 la edad a la que finalizó. t_{ref} es el tiempo de exposición a la solución para el cual se determinó el valor de D_{ref} que es el D_a pero obtenido para el tiempo de referencia t_{ref} . El parámetro del modelo m es explicado a continuación.

Determinación del coeficiente de variación m

El significado del parámetro m es ilustrado en la figura 4. Este representa la razón de variación del coeficiente de difusión con el tiempo.

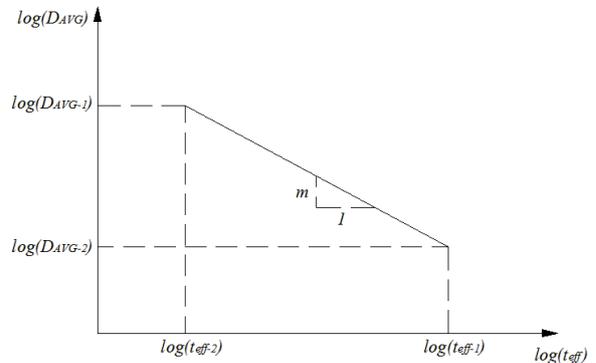


Figura 4 Variación del coeficiente de difusión con el tiempo

Para establecer los parámetros de difusión m y D_{avg} , se seguirá el siguiente procedimiento iterativo:

1. Asumir un valor de m . Como primera aproximación, puede emplearse la ecuación (6) que ha sido propuesta empíricamente por [10] y es función únicamente de la relación agua/cemento.

$$m = 2.5 \frac{a}{c} - 0.6 \quad (6)$$

2. Para cada grupo de probetas (expuesta en dos tiempos diferentes a la solución de sales), se calculará la edad efectiva (t_{eff}) y los valores de D_{AVG} a través de la ecuación (4 y 5), asumiendo un primer valor de m utilizando ecuación (6).

3. Un nuevo valor de m es obtenido como la pendiente de la recta que une los pares ordenados representados en el gráfico de la figura 4.

4. Repetir los pasos 2 al 4 con el nuevo valor de (m).

Cuándo el valor de (m) determinado en el paso 4 converja con el valor de (m) en el paso 2, será el valor a fijar para el hormigón de estudio.

Para cada serie de probetas se requiere que en un mismo gráfico se relacionen los logaritmos en base 10 de $(t_{eff} - 1; D_{AVG} - 1)$ y $(t_{eff} - 2; D_{AVG-2})$, respecto a la relación que siguen los parámetros antes mencionados, sus logaritmos, no tienen una relación lineal, por lo que se requiere que el coeficiente de variación sea determinado, basado en las relaciones logarítmicas de los parámetros de tiempo y difusión. El gráfico lineal obtenido presentará una pendiente decreciente, (tal como se ha indicado desde el inicio, varía el coeficiente de difusión con el tiempo), obteniéndose así un nuevo valor de (m), el proceso se repetirá sucesivamente hasta que se converja en el valor calculado tras la iteración anterior.

Una vez determinado el valor de (m) definitivo estaremos en condiciones de calcular (D_{AVG}) considerando (D_{ref}) y (m) como anteriormente fue descrito.

Caso de estudio

Para evaluar la posibilidad de la aplicación de la metodología aquí descrita y su contrastación

con la utilización de los valores estipulados en la Norma Cubana NC 250: 2005 [11] se realiza un ejemplo de determinación de la vida útil de una estructura. Esta estructura se ha supuesto, será construida con los materiales que serían indicados para cualquier obra sometida a un ambiente de alta agresividad de cloruros según la Norma Cubana NC 250: 2005 [11]. Se realizaron probetas con una dosificación que cumple con los requisitos normados para el tipo de ambiente selecciona y se les ha aplicado la metodología descrita para identificar las propiedades necesarias con vistas a aplicar el modelo de difusión de cloruros enunciado anteriormente.

Materiales

A continuación se realiza una descripción de los materiales utilizados en la elaboración de las probetas de hormigón. Estas probetas son expuestas a una disolución de cloruro de sodio como establece la norma ASTM C 1556-04 [9] para el cálculo del coeficiente de difusión de cloruros. Además es realizado un grupo de ensayos que permite caracterizar el homigón en diferentes tiempos de curado.

Árido grueso

El árido grueso utilizado es de naturaleza caliza, proveniente de la cantera Alacranes, en la provincia de Matanzas, Cuba. La tabla 1 muestra la granulometría obtenida de acuerdo con la norma NC 178:2002. Otras propiedades físicas de los áridos gruesos fueron medidas, as normativas utilizadas para estas están descritas a continuación de conjunto con los valores obtenidos. La densidad y la absorción de agua fue medida utilizando la norma NC 187:2002, siendo 2,58 kg/dm³ y 1,4% respectivamente; la masa unitaria suelta se realizó según la NC 181:2002, siendo de 1,38 kg/dm³; el índice de lajas fue medido según la NC 189:2002, siendo de 11,0%; el porcentaje de partículas que pasan por el Tamiz #200 (74mm) fue determinado siguiendo la NC 182:2002, siendo en este caso de 0,20%.

Tabla 1 Granulometría del árido grueso utilizado

<i>Tamices (mm)</i>	<i>% Pasado</i>
Fondo	0
5	1
9	18
13	61
19	100

Árido fino

El árido fino es también de origen calizo, proveniente de la cantera Victoria II. Esta cantera se ubica en la Ciudad de La Habana en el municipio de Guanabacoa. En la tabla 2 se muestra la granulometría del árido fino.

Tabla 2 Granulometría del árido fino utilizado

<i>Tamices (mm)</i>	<i>% Pasado</i>
Fondo	0
#100	1
#50	5
#30	20
#16	45
#8	79
#4	99

En los ensayos de caracterización física realizados en la arena fina se obtuvieron los siguientes resultados. El peso específico corriente es de 2,49 kg/dm³, la absorción es de 2,3%, la densidad aparente es de 1.44 kg/dm³ y el porcentaje que pasa el tamiz #200 es de 0,5%. Estos ensayos fueron realizados según los procedimientos de las normas mencionadas anteriormente para el caso del árido grueso. El módulo de finura determina fue de 3,52. Tanto el módulo de finura obtenido, como el bajo porcentaje que pasa el tamiz #30 (20%) evidencian que este material presenta una importante falta de finos que puede influir en un alto consumo de cemento durante la fabricación del hormigón.

Cemento

Durante el desarrollo de ésta investigación no se pudieron realizar ensayos en el cemento utilizado, sin embargo, este cemento es ampliamente utilizado en Cuba tanto en investigaciones como en obra y existe caracterizaciones realizadas por otros autores. El cemento utilizado es un cemento portland P-350(35MPa). En la tabla 3 y la tabla 4 se muestran los resultados de la caracterización físico-mecánica y la composición química del cemento.

Tabla 3 Propiedades físico-mecánicas del cemento

<i>Propiedades</i>	<i>Valor</i>
Superficie específica de Blaine (cm ² /g)	3089
Peso específico (kg/dm ³)	3,12
Resistencia a la flexo-tracción a los 28 días (MPa)	7
Resistencia de la compresión a los 28 días (MPa)	41

Tabla 4 Composición química del cemento

<i>Compuestos</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>RI</i>	<i>SO₃</i>	<i>PPI</i>	<i>Cal Libre</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>
%	20,83	4,09	3,85	60,65	1,81	1,46	3,1	3,56	1,29	0,53	0,42

Dosificación empleada y fabricación del hormigón

La dosificación empleada se muestra en la tabla 5. El hormigón fue dosificado en una planta de hormigón y mezclado en camión hormigonera. La intención con esta fabricación era conseguir un hormigón igual a los utilizados en obras reales,

eliminando los controles que se puede tener en un hormigón elaborado en una hormigonera estacionaria en un laboratorio. Esto responde a la intención principal de esta investigación. Los áridos en el momento de fabricación del hormigón se encontraban secos. El aditivo empleado es el superfluidificante N100 RC, de la marca Mapei de 1,16 g/l de densidad.

Tabla 5 Dosificación empleada para el hormigón

<i>Relación agua/cemento A/C</i>	<i>Cemento (kg/m³)</i>	<i>Agua (kg)</i>	<i>Agua efectiva (kg)</i>	<i>Árido Fino (kg/m³)</i>	<i>Árido Grueso (kg/m³)</i>	<i>Aditivo (%)</i>	<i>Asentamiento (cm)</i>
0.5	400	200	214	940	820	0,8	12

Empleando la dosificación de hormigón antes mencionada se realizaron un conjunto de ensayos tanto al hormigón fresco como al hormigón endurecido. En total se produjeron 3 amasadas con tiempos de curado de 3, 7 y 28 días respectivamente, de las cuales se obtuvieron 14 muestras para cada una. Las muestras estaban constituidas por probetas cilíndricas de 10cm de diámetro por 20cm de altura, para un total de 42 probetas.

Caracterización del hormigón utilizado

A continuación son mencionados los ensayos realizados a las probetas. El objetivo perseguido es caracterizar el material y detectar cualquier no homogeneidad en los ensayos, además determinar si existe el comportamiento esperado entre las diferentes propiedades obtenidas por

estos ensayos y el coeficiente de difusión de cloruros. Los ensayos realizados y la normativa seguida para la realización fueron los siguientes:

- Absorción (RED DURAR 1997)
- Absorción capilar (NC 345:2005)
- Porosidad efectiva (NC 345:2005)
- Resistencia a compresión (NC 192:2005)
- Velocidad ultrasónica (NC 231:2002)
- Resistividad (RED DURAR 1997)
- Cloruros totales (NC 272:2003)
- Difusión de cloruros (ASTM-C-1556-04)

Los valores medios obtenidos de los ensayos para tres edades diferentes de curado son presentados en la tabla 6.

Tabla 6 Caracterización del hormigón utilizado para el caso de estudio

<i>Tiempo Curado (días)</i>	<i>Absorción (%)</i>	<i>Absorción Capilar (kg/m²s^{1/2})</i>	<i>Porosidad Efectiva ξ (%)</i>	<i>Resistencia a compresión (MPa)</i>	<i>Velocidad Ultrasonica (m/s)</i>	<i>Resistividad (kΩ.cm)</i>	<i>Difusión de Cloruros (m²/s)</i>
3	6,4	0,030	16,6	28,0	4415	5,24	2,675E-11
7	5,3	0,025	15,2	30,3	4510	8,16	6,413E-12
28	5,0	0,021	14,9	33,8	4590	9,35	5,571E-12

Los valores obtenidos para los ensayos realizados presentan buena concordancia, reflejando estos una mejora en las propiedades del hormigón con el tiempo de fraguado.

Según [12], un elemento de hormigón con los valores de velocidad ultrasónica obtenidos (>4000m/s) es caracterizado como durable o de muy alta calidad. Sin embargo, los valores de resistividad (<10 kΩ.cm) son representativos de un elemento de hormigón armado con alto riesgo de corrosión de las barras de acero.

Los valores obtenidos de coeficiente de difusión de cloruros cumplieron con lo esperado, disminuyendo con el tiempo de curado.

Aplicación del modelo de vida útil al caso de estudio

En este epígrafe es aplicado el modelo de vida útil de Stanish & Thomas a un elemento hipotético contruido considerando el hormigón caracterizado anteriormente.

Los valores expuestos a continuación son los que define la NC 250: 2005 [11] para que una estructura en condiciones similares del caso de estudio tenga una vida útil de 50 años. La misma fija para cada agresividad del ambiente la relación A/C, resistencia mínima a compresión y recubrimiento mínimo.

- Ambiente de agresividad media.
- Relación A/C=0,50.
- Contenido mínimo de cemento=300kg/m³.
- Resistencia mínima f'c=25MPa.
- Recubrimiento mínimo=50mm.
- Vida Útil=50años para edificios de viviendas u oficinas.

Para un ambiente agresivo de cloruros según la norma cumpliendo las especificaciones recomendadas se asegura una vida útil de 50 años.

El ensayo normado en la ASTM C 1556-04 [9], dará como resultado una concentración superficial de cloruros C_s respecto al peso de hormigón y un perfil de cloruros para obtener el coeficiente de difusión aparente D_a . La norma NC-250 [11] brinda el valor umbral de cloruros respecto al peso de cemento. La concentración inicial dentro de la masa de hormigón será tomada como cero en este caso de estudio, ya que para obtener un valor inicial se necesitan ensayos realizados a plazos de 1 año o más para definir un patrón de referencia correcto. A continuación se muestran los valores asumidos:

- Contenido de cloruro en la superficie $C_s=0,375\%$ estabilizado para 10 años respecto al peso del hormigón para ambiente marino con presencia de cloruros.
- Contenido máximo o umbral de cloruros $C(x,t)=0,20\%$ respecto al peso del cemento [11].
- Contenido inicial de cloruros $C_i=0\%$.
- Partiendo de los valores obtenidos de los ensayos para el perfil de cloruro se procede a la determinación del coeficiente de difusión aparente D_a según ajuste de curva.
- Se estima el valor de m con la ecuación (4).
- Se calcula el valor de D_{AVG} considerando días $t_1=7$ días; $t_2=42$ días; $t_{ref}=35$ días.
- Se determina el valor de la función error $erfc(z)$.
- Se determina aplicando el modelo de vida útil el valor estimado de vida útil según los valores existente de cloruros y las correspondientes consideraciones.

Para el mismo caso de estudio analizado a través de la norma NC 250: 2005 [11], para iguales condiciones de agresividad del ambiente y similar elemento estructural, se calcula la vida útil de la estructura aplicando el modelo de vida útil de Stanish & Thomas.

Haciendo uso de la ecuación (6) se estimo un valor de $m=0,65$.

Para el hormigón estudiado fue obtenido del ensayo de difusión de cloruros un valor de $D_a=6,4137E^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ para el tiempo de 35 días y un valor de $D_{AVG}=3,1966 E^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ estimado utilizando el modelo de Stanish & Thomas [7].

A continuación luego de obtener el coeficiente de difusión promedio (D_{AVG}) se muestran las ecuaciones necesarias y la metodología a seguir utilizando el modelo de Stanish & Thomas para calcular la vida útil:

1. Aplicando la ecuación (3), a partir de aquí como corrección a los modelos simplificados y consideración de la dependencia de la difusión con el tiempo se considerará D_{AVG} en lugar de D_a , convirtiéndose la ecuación (3) en la ecuación (7).

$$C(x, t) = C_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{AVG} \cdot t}} \right) \quad (7)$$

A partir del ajuste de curva de concentración de cloruro vs profundidad, se determina el coeficiente de difusión aparente D_a y la concentración superficial C_s , luego se determinará la función error $\operatorname{erfc}(z)$ a través de la ecuación (8), una vez determinada, buscando el miembro izquierdo de la ecuación (9) en la tabla correspondiente a dicha función, se obtiene el valor correspondiente a (z).

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du \quad (8)$$

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{AVG} \cdot t}} \right) \quad (9)$$

2. A partir de la ecuación (8) se pueden obtener las ecuaciones (10 y 11):

$$\operatorname{erfc}(z) = \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{AVG} \cdot t}} \right) \quad (10)$$

$$z = \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{AVG} \cdot t}} \quad (11)$$

Sustituyendo los valores obtenidos en el ensayo en la ecuación (9) y (11) se obtienen las ecuaciones (9a, 11a):

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_{AVG} \cdot t}} \right) = 0,5333 \quad (9a)$$

$$z = \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{AVG} \cdot t}} = 0,4405 \quad (11a)$$

3. Fijar valor de recubrimiento (mm) y calcular (días). Finalmente se despeja el tiempo en la ecuación (11) que es el propósito de este estudio: Considerando un recubrimiento de 40mm según NC-250 [11] para agresividad moderada, se tiene (Ecuación 11b):

$$t = \frac{x^2}{4 \cdot D_{AVG} \cdot z^2} = 20,45 \text{ años} \quad (11b)$$

Considerando un tiempo de vida útil de 50 años según NC-250 [11] para agresividad moderada, se tiene (Ecuación 11c):

$$x = z \sqrt{4 \cdot D_{AVG} \cdot t} = 63 \text{ mm} \quad (11c)$$

Haciendo alusión al diseño estructural y símil con el enfoque de seguridad establecido para este, nótese como las propiedades del material serán tomadas como (Solicitud Resistente), el resto de los factores que dependen del medio externo serán (Solicitud Actuante), para finalmente obtener tiempo fijando el recubrimiento ó viceversa.

Con vistas a la mejor comprensión de lo anteriormente dicho se muestra la figura 5, como resumen de las relaciones existentes entre los parámetros implicados en el modelo.

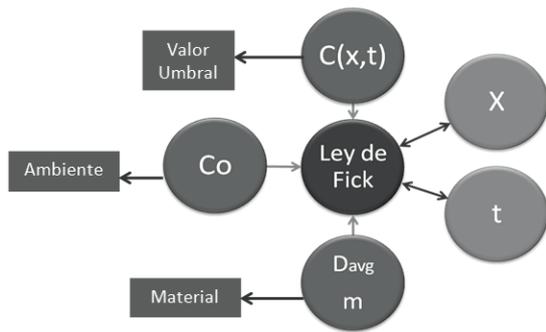


Figura 5 Relaciones entre los parámetros normativos, ambientales y propios del material para utilizar en la segunda ley de Fick

Tal como puede apreciarse, aún cuando el hormigón considerado presentaba la dosificación y mejores propiedades físico-mecánicas que las requeridas por la norma vigente para el cumplimiento de una vida útil no menor de 50 años, el valor obtenido del coeficiente de difusión de cloruro era demasiado alto para el ambiente en que estaría situado el elemento estructural, dando lugar al no cumplimiento de la vida útil estimada.

El gran número de factores que inciden directamente en la durabilidad de un hormigón no puede ser considerado tan solo con fijar la relación a/c , el contenido de cemento y la resistencia a compresión, sino que requiere de muchas otras consideraciones que normalmente no se tienen en cuenta. Un primer paso sería tal como se ha querido investigar en el presente trabajo y ha constituido nuestro punto de partida, la necesidad de la realización del ensayo de difusión de cloruro y el empleo de modelos de vida útil capaces de determinar analíticamente este tiempo.

Conclusiones

Las conclusiones obtenidas de la aplicación del modelo de predicción de vida útil y del caso de estudio ejemplificado en esta investigación son:

- Utilizando modelos de vida útil basados en la segunda ley de Fick, se puede predecir la vida

útil de las estructuras de hormigón armado sometidas a la acción de los iones cloruro.

- De los modelos de vida útil estudiados en el presente trabajo se pudo concluir que, el modelo de Stanish & Thomas resultó el más adecuado para modelar la difusión de cloruro en el hormigón.
- A partir de los resultados experimentales obtenidos se pudo concluir que, los criterios de durabilidad referentes al hormigón, basados en propiedades diferentes al coeficiente de difusión de cloruro, tales como relación a/c , resistencia a compresión, velocidad ultrasónica, porosidad, resistividad, entre otras, no son concluyentes en cuanto a la protección que brinda el material a las barras de refuerzo de los iones cloruro.
- Dado el gran número de factores que intervienen en la durabilidad del hormigón y la dispersión obtenida para los diferentes ensayos al relacionarlos con esta, se refuerza la necesidad de la determinación experimental del coeficiente de difusión de cloruro con vistas a determinar la vida útil de las estructuras.
- La metodología presentada permite obtener la vida útil de estructuras de hormigón armado sometidas a la acción de iones cloruro con una forma conceptualmente semejante a la utilizada para el diseño por resistencia.

Referencias

1. K. Tutti. "Corrosion of Steel in Concrete". Swedish Cement and Concrete Research Institute. Vol. 4. 1982. pp. 7.
2. M. Cordero. *Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros*. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Catalunya. Catalunya, España. 2005. pp. 244.
3. A. Castañeda. *Caracterización de la Corrosión en el Acero de Refuerzo del Hormigón Armado en presencia de Cloruros*. Tesis de Doctorado. ISPJAE. La Habana, Cuba. 2007. pp. 174.

4. K. Alejo. *Modelación Numérica de la penetración de Iones Cloruro en El Hormigón*. Tesis de Grado. ISPJAE. La Habana, Cuba. 2005. pp. 162.
5. P. Bamforth. "Admitting that Chloride are admitted". *Concrete Internacional*. Vol. 28. 1994. pp. 18-21.
6. G. Williamson. "Service Life Modeling of Virginia Bridge Decks". PhD. Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, Estados Unidos. 2007. pp. 194.
7. K. Stanish, M. Thomas. "The use of bulk diffusion tests to establish time dependent concrete chloride diffusion coefficients". *Cement and Concrete Research*. Vol. 33. 2003. pp. 55-62.
8. T. Luping, J. Gulikers. "On the mathematics of time dependent Apparent chloride diffusion coefficient in concrete". *Cement and Concrete Research*. Vol. 37. 2007. pp. 589-595.
9. ASTM C 1556-04, *Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. Norma. American Society for Testing Materials. Pennsylvania, Estados Unidos. 2004. pp. 7.
10. P. Mangat, B. Molloy. "Prediction of long term chloride concentration in concrete". *Materials and Structures*. Vol. 27. 1994. pp. 338-346.
11. NC 250: 2005. *Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural*. Normas Cubanas, Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba. 2005. pp. 22.
12. DURAR Red Temática XV.B. *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. 1st ed. Ed. CYTED. Madrid, España. 1997. pp. 205.