

# Analysis of the Life Cycle Cost of Corrosion Inhibitors for the Protection of Concrete Reinforced Structures

Jorge Luis Amaya, Ph.D.<sup>1</sup>, Mauricio Cornejo, PhD<sup>1</sup> Andrés Rigail-Cedeno, D. Eng<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador  
jorge-luis.amaya@espol.edu.ec, mcornejo@espol.edu.ec, arigail@espol.edu.ec

**Abstract-** Criteria such as (materials) endurance and life-expectancy, or (structural) endurance have a significant impact on the make-up of concrete. That is to say that design and use criteria a factors in determining concrete's useful life. Currently, more and more corrosion inhibitors are used to extend the useful life of a structure. This is analyzed in this paper using the predictive model found in Life-365 Service Life. To carry-out this study use of corrosion inhibitors was modeled and their performance based on a strategic analysis of a structures useful life of a structure taking into account factors such as humidity and salinity (meaning different microenvironments). The impact of the inhibitors in terms of initiating and propagation of corrosion will be compared using the Tuutti model. In this way, this paper's objective is to propose a methodology to evaluate the characteristics for concrete from design taking into account environmental and longevity factors.

**Keywords--** Corrosion, Concrete, Inhibitors, Life of Service, Analysis of Life Cycle Cost, Longevity of Concrete Structures

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.235>  
ISBN: 978-0-9822896-9-3  
ISSN: 2414-6390

# Análisis del costo del ciclo de vida del uso de inhibidores de corrosión para la protección de estructuras de hormigón armado

Jorge Luis Amaya, Ph.D.<sup>1</sup>, Mauricio Cornejo, PhD<sup>1</sup> Andrés Rigail-Cedeno, D. Eng<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador  
[jorge-luis.amaya@espol.edu.ec](mailto:jorge-luis.amaya@espol.edu.ec), [mcornejo@espol.edu.ec](mailto:mcornejo@espol.edu.ec), [arigail@espol.edu.ec](mailto:arigail@espol.edu.ec)

**Resumen – Criterios como la resistencia y tiempo de vida útil o durabilidad de una construcción; tienen un impacto significativo en el diseño de estructuras de hormigón; es decir, en las condiciones de diseño y uso para determinar su ciclo de vida útil. En la actualidad, cada vez se utilizan más y más inhibidores de corrosión para incrementar la vida útil de una estructura; esto es analizado en el artículo usando el modelo de predicción Life-365 Service Life. Para realizar esto, se ha modelado la incorporación de inhibidores de corrosión y su rendimiento según una estrategia de análisis del costo de vida útil de una estructura en un ambiente a condiciones de humedad y salinidad; es decir a diferentes microambientes.**

**Los efectos de los inhibidores en la iniciación y propagación de la corrosión serán comparados utilizando el modelo de Tuutti. De esta manera, el presente artículo tiene como objetivo proponer una metodología para evaluar las características de hormigón desde su diseño considerando criterios de medio ambiente y durabilidad.**

**Palabras Claves — Corrosión, hormigón, inhibidores, servicio de vida, análisis del costo de ciclo de vida, durabilidad de estructuras de hormigón.**

## I. INTRODUCCIÓN

El fenómeno conocido como corrosión en armaduras y estructuras de hormigón es uno de los factores que disminuye la durabilidad; reduciendo de manera significativa su ciclo de vida. Entonces, la corrosión en armaduras y estructuras de hormigón ha tomado importancia en los últimos años debido a que tecnologías tradicionales no han logrado caracterizar completamente este problema; ni solucionar eficazmente los problemas de corrosión. Si bien, el hormigón actúa como pasivador del acero; bajo ciertas condiciones como: i) excesiva humedad, ii) difusión de oxígeno o iii) inclusión de iones agresivos (como cloruros, carbonatos, sulfatos, etc.) se activa y propaga la corrosión en armaduras [1]. Entonces, el proceso de corrosión continúa presente en una estructura de hormigón debido a los fenómenos mencionados; que están estrechamente relacionados con las condiciones climáticas a la que estas armaduras y estructuras están expuestas [2].

Diversos estudios se han encontrado en la literatura acerca del fenómeno de corrosión y cómo actúan en la degradación de armaduras y estructuras de hormigón. Los resultados en general muestran un incremento de la corrosión por acción de cloruros y carbonatación [1, 2]. Por este motivo, durante el diseño de armaduras y estructuras de hormigón se debe considerar el contexto de utilización con una visión global hacia el ciclo de

vida con el fin de añadir un criterio de durabilidad a las propiedades intrínsecas de los materiales. Es decir, elementos y materiales que se adapten a los cambios climáticos permiten incrementar el tiempo de servicio durante el ciclo de vida de la estructura. Adicionalmente el uso de materiales sustentables contribuiría a la disminución de la emisión de CO<sub>2</sub> y su potencial incremento de ciclo de vida de una estructura. De esta manera, las armaduras y las estructuras de hormigón tendrán ciclos de vida más largos, más durables durante su fase de servicio frente a diferentes condiciones climáticas; y, con costos de reacondicionamiento de la estructura menores a largo plazo [1].

## II. ESTADO DEL ARTE

### A. Inhibidores de Corrosión

Con la finalidad de incrementar el tiempo de servicio de armaduras y estructuras de hormigón, nuevos materiales con propiedades diferentes se han desarrollado en los últimos años. Entre estos materiales; algunos están orientados a retrasar considerablemente la corrosión, tomando como referencia la teoría descrita por Tutti “del retardo del proceso de corrosión” [3].

Dentro de las alternativas para detener la corrosión del acero en estructuras de hormigón existen los “inhibidores de corrosión”. Definidos como: “*sustancias químicas que disminuyen la velocidad de corrosión a determinada concentración, sin cambios significativos de cualquier agente generador de corrosión*” [4]. Entonces, parafraseando la definición, un inhibidor de corrosión tiene como objetivo retrasar el inicio de la corrosión: incrementando el límite máximo de cloruros, disminuyendo la velocidad de penetración de cloruros o dióxido de carbono y reduciendo la velocidad de corrosión.

Los inhibidores de corrosión están clasificados como: inhibidores anódicos, catódicos y mixtos. Los *inhibidores anódicos* tienden a disminuir la reacción anódica que ocurre por a) disociación del hierro y b) acción catalizadora de los iones de cloruros, que son los responsables de incrementar la velocidad de disociación del hierro y la corrosión. Estos inhibidores de corrosión anódicos; son utilizados desde hace algunas décadas, como es el caso de los inhibidores en base de nitrito de calcio [5,18]. El nitrito tiene la propiedad de oxidar iones ferrosos y férricos, los cuales son insolubles en una solución alcalina y pasivan la superficie del acero de refuerzo. Siendo un inhibidor anódico, su concentración debe ser mayor

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2016.1.1.235>  
ISBN: 978-0-9822896-9-3  
ISSN: 2414-6390

14<sup>th</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Engineering Innovations for Global Sustainability”, 20-22 July 2016, San José, Costa Rica.

que los cloruros que también reaccionan en el área anódica. Sin embargo, el nitrato de calcio al acelerar el proceso de fraguado incrementa el tamaño de los microporos de la pasta cementosa y por ende incrementa la permeabilidad de iones de cloruros de 2 a 3 veces [6, 11] e incrementa el ataque de iones de sulfatos [17], en términos generales disminuye la resistividad de concreto [10]. Se ha demostrado que la presencia de fracturas tienden a fortalecer la región catódica en el área sin fractura, formándose una marcocelda y disminuyendo notablemente la eficiencia de los nitritos [8, 9].

Los *inhibidores catódicos* se precipitan en soluciones insolubles, incrementan el pH y reducen el transporte de oxígeno en la zona catódica tales como los inhibidores de hidróxido de sodio o carbonato de sodio.

Los *inhibidores mixtos* tienden a reducir las reacciones en zonas anódicas y catódicas. Los aminoalcoholes tales como etanol amina o dimetil etanol amina (Fig.1), controlan principalmente la reacción catódica, bloqueando los sitios donde el oxígeno reacciona con los electrones y se reduce a ion hidroxilo, aunque también son absorbidos las zonas anódicas [6,12]:

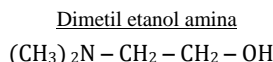
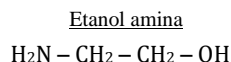


Fig. 1 Composición del Etanol amina y del dimetil etanol amina como inhibidores mixtos usado en las estructuras de concreto reforzado.

Dentro del grupo de inhibidores mixtos destacan también los inhibidores desarrollados a partir de carboxilatos de amina [10]. Estos inhibidores se disocian y son atraídos por las zonas anódicas y catódicas, similar química encontramos en inhibidores comerciales tales como en los inhibidores de ciclohexil amonio benzoato o de disopropil amonio benzoato (Fig.2) [6]:

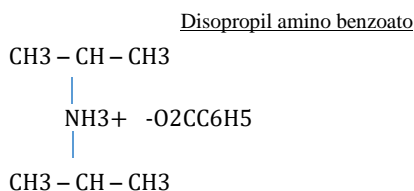
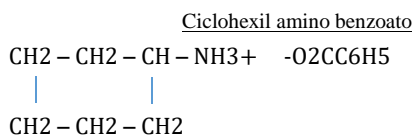


Fig. 2 Composición de los inhibidores ciclohexil amonio benzoato y disopropil amonio benzoato.

Estos inhibidores forman una capa que retrasan la corrosión y principalmente disminuyen la velocidad de corrosión independiente de la concentración de cloruros [10,

11]. Una de las ventajas más notables de estos inhibidores es su comportamiento frente a las fracturas, los inhibidores tradicionales no pueden detener la corrosión cuando la concentración de cloruros es elevada en la fractura como el caso de los inhibidores de nitrato de calcio [9, 10, 18] o bloqueadores de poros [10].

### B. *Análisis del Costo del Ciclo de Vida en Estructuras de Hormigón Armado*

La inversión en infraestructura para el desarrollo de las actividades en cualquier sector es una decisión importante a tomar; ya sea en el sector público o privado. En general, los costos asociados a reparación y mantenimiento entran en juego al momento de tomar la decisión de un tipo de estructura, armazón, edificación u otra infraestructura. En países desarrollados, como en Francia, aproximadamente el 50% de un total de más de 20.000 puentes ubicados a lo largo de las carreteras nacionales requieren reparaciones periódicas [24]. Esta situación es muy similar en el resto de Europa, con aproximadamente 84.000 puentes que requieren constante mantenimiento y reparaciones; con un presupuesto anual de aproximadamente 253 millones de euros (en este costo no se consideran elementos externos al sistema, por ejemplo: la gestión del tráfico o la productividad del uso de un puente) [25, 26].

Para motivar a los diferentes actores del sector de la construcción, un enfoque prometedor es la aplicación de costos objetivos a las tecnologías innovadoras en la etapa inicial de diseño, lo que si se integra los diferentes procesos de transformación a lo largo del ciclo de vida de las estructuras; al igual que los costos. Entonces, la literatura nos lleva hacia la evaluación de estos inhibidores de la corrosión para aplicaciones en la construcción utilizando herramientas como el análisis del ciclo de vida (ACV) y el análisis del costo del ciclo de vida (ACCV) para investigar los aspectos antes mencionados y sacar conclusiones generales.

Utilizando como herramientas las metodologías mencionadas ACV y ACCV en las estructuras que utilizan inhibidores de corrosión, tienen un interés de definir escenarios comparables para poder establecer los parámetros que serán utilizados para comparar con las estructuras sin inhibidores de corrosión. Además, identificar los diferentes procesos, actividades y actores en los escenarios nos dará respuesta a las diferencias que existen entre los costos asociados a cada escenario. Por este motivo los procesos, actividades y actores deben recibir una atención especial durante el análisis del ciclo de vida de las estructuras que utilizan inhibidores de corrosión. Por tal motivo, siendo la construcción de infraestructuras una de las actividades industriales con un alto consumo de materias primas; y en consecuencia, emisiones significativas de CO<sub>2</sub>, es evidente la necesidad de nuevos materiales que generen menos emisiones, con una mayor durabilidad y con un cierto alcance a la sociedad. Con este propósito, se han desarrollado los inhibidores de corrosión; presentados en la sección anterior, como elementos necesarios a considerar en el diseño de nuevos proyectos de construcción.

En la actualidad, la fabricación de materiales de alto rendimiento incluyendo los inhibidores de corrosión son usualmente más costosos, lo que aumenta los costos en los proyectos que consideran este tipo de materiales, si los comparamos con los materiales utilizados en construcciones de estructuras de hormigón reforzado con acero convencional. Sin embargo, es importante estas alternativas para las estructuras con inhibidores se incluyan dentro de un modelo que sirva como herramienta para dar soporte a la toma de decisiones para establecer una oferta con costos competitivos. El modelo propuesto presenta un “mix” entre el potencial técnico (durabilidad), ambiental y económico de los materiales de alto rendimiento a lo largo del tiempo – “ciclo de vida de las estructuras”. De esta manera una visión macro entre los beneficios técnicos, los beneficios ambientales y los costos asociados tanto a su fase de servicio como su ciclo de vida útil nos va a permitir definir el horizonte de planificación de las inversiones en construcciones. Lo que nos hace pensar que existe un mercado actualmente desconocido para estos nuevos materiales que la literatura considera como más eficientes y ecológicos; por su característica de proyectar aún más el horizonte de la fase de utilización o servicio de las construcciones, si consideramos elementos como costos de mantenimiento, desarrollo de la tecnología con un potencial reciclable, etc. [27]

### C. Modelo del Servicio de Vida Útil en Estructuras de Hormigón Armado por Acción de Cloruros

Los mecanismos de corrosión y de servicio de vida útil en estructuras de hormigón armado han sido descrito por Tuutii [12] en dos periodos o etapas: una etapa de inicio ( $t_0$ ) y una etapa de propagación ( $t_p$ ); tal como se observa en la fig. 3. En términos generales, la corrosión se inicia debido a carbonatación cuando el pH en la solución porosa cae a un valor aproximado a 9 o cuando la concentración de cloruros  $Cl_{TV}$  alcanza el 0.05% por peso de concreto en un tiempo determinado [13]. Los factores que influyen en la difusión de estos agentes agresivos son: el espesor de recubrimiento, la relación agua/cemento, y la calidad del hormigón. En el segundo período, se aprecia una pendiente la cual es un indicativo de la velocidad de corrosión, lo que indica que los productos de corrosión empiezan a causar una expansión en el acero y consecuentemente falla por fractura y desprendimiento del recubrimiento de concreto, a partir de esta etapa finaliza el servicio de vida útil de una estructura de hormigón armado. Factores que dependen del medio que envuelve la estructura tales como el ingreso de oxígeno, las condiciones climáticas (humectación, secado) afectan la resistividad del concreto y al tiempo de propagación.

Métodos probabilísticos están siendo usados en el diseño y reparación de estructuras de hormigón armado. Estos métodos proveen un tiempo predictivo como estimación de la etapa inicial de corrosión para un cierto grupo de datos; el resultado no incluye la calidad de construcción o materiales utilizados en un proyecto [11]. Por lo que, el uso de inhibidores de corrosión en estos modelos nos estimará una distribución de tiempo

posible de vida útil según el diseño de la estructura de hormigón [12].

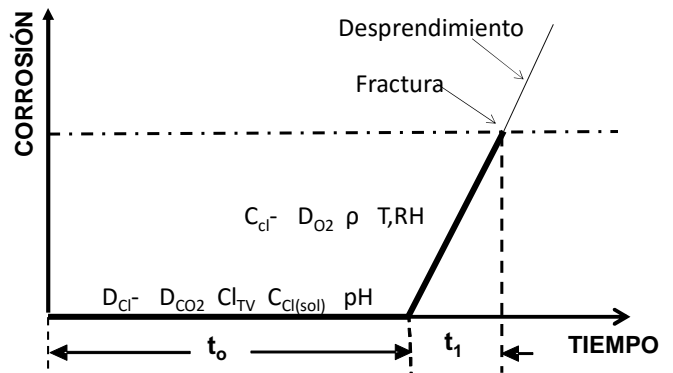


Fig. 3 Servicio de vida útil de estructura de hormigón armado

El modelo de durabilidad para estructuras de hormigón armado en presencia de cloruros se basa en la segunda ley de Fick (1) para determinar la migración de los cloruros:

$$\frac{dC}{dt} = D * \frac{d^2C}{dx^2} \quad (1)$$

donde  $C$  es la concentración de cloruro,  $D$  es el coeficiente de difusión aparente de los cloruros,  $x$  es la profundidad desde la superficie expuesta y  $t$  es el tiempo. Life-365 usa la siguiente relación para determinar el coeficiente de difusión dependiendo del tiempo (2):

$$D(t) = D_{ref} * \left(\frac{t_{ref}}{t}\right)^m \quad (2)$$

donde  $D(t)$  es el coeficiente de difusión en un tiempo determinado,  $D_{ref}$  es el coeficiente de difusión de referencia a un tiempo de referencia de 28 días ( $t_{ref}$  28 días) y  $m$  es el índice de decaimiento de difusión (constante). La ecuación (2) es válida para un coeficiente de difusión en un tiempo menor a 25 años.

Por otro lado; para considerar el efecto de los cambios de temperatura a lo largo del tiempo, Life-365 considera la siguiente ecuación (3):

$$D(T) = D_{ref} * \exp \left[ \frac{U}{R} * \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

Donde  $D(T)$  es el coeficiente de difusión a un tiempo  $t$  y temperatura  $T$ ,  $D_{ref}$  es el coeficiente de difusión de referencia a un tiempo de referencia de 28 días ( $t_{ref}$  28 días) y a una temperatura de referencia de 20 °C ( $T_{ref}$  20 °C),  $U$  es la energía de activación del proceso de acción (35.000 J/mol),  $R$  es la constante de los gases y  $T$  es la temperatura dependiendo del sector geográfico.

Life-365 calcula el tiempo de iniciación,  $t_0$ , de la corrosión usando la ecuación 1 y la difusión de los cloruros,  $D$ , es basado en cálculos utilizando las ecuaciones (2) y (3), mencionadas anteriormente. La condición geográfica determina la concentración superficial de los cloruros. Para este análisis se consideró un ambiente marino de zona intermarial donde

concentración de cloruros en la superficie,  $C_s$ , es 0.8% y el tiempo de alcanzar la concentración superficial,  $t$ , es instantáneo [16]. Este ambiente es el más agresivo en cuanto a la acción de cloruros [20].

### III. MODELOS UTILIZADOS

La presente sección se propone un modelo básico teórico que considera los diferentes estudios referentes a la utilización de inhibidores de corrosión como material utilizado para extender el ciclo de vida útil de las estructuras de hormigón; modificando su ciclo de vida mediante el concepto de durabilidad. De ahí, un modelo inicial considera los costos de materias primas, diseño, construcción, así como los costos adicionales en los que incurre una estructura convencional para extender su ciclo de vida útil (i.e.: mantenimiento, reparación, etc.) Es decir, comparar la inversión del uso de inhibidores presentes a lo largo de la utilización de las estructuras con sus costos adicionales para llegar al largo plazo en condiciones similares.

#### A. Modelo para el Ciclo de Vida para Estructuras de Hormigón con Inhibidores de Corrosión

Estructuras de hormigón reforzado y construcciones en general que utilizan materiales de alto rendimiento como los inhibidores de corrosión. Estos materiales poseen ciertas características que lo diferencian de los materiales de construcción a base de materiales convencionales. Esto es debido a su ciclo de vida extendido (periodo de servicio), y el comportamiento de los materiales de construcción que en

conjunto con los inhibidores de corrosión resulta difícil de simular ante cualquier cambio en las condiciones iniciales de diseño ideal (i.e.: temperatura, humedad, etc.). Por este motivo, una primera aproximación se ha establecido para definir el ciclo de vida de las estructuras de hormigón reforzado o construcciones en general que utilizan inhibidores de corrosión.

Como se describió en la sección I, en la literatura ya existen estudios de análisis de ciclo de vida (ACV) o análisis del costo del ciclo de vida (ACCV) para estructuras o construcciones convencionales; sin embargo, no se encontró estudios que integre inhibidores de corrosión. Entonces existe un interés de este tipo de modelos que permitan hacer estudios comparativos; que al mismo tiempo permitan a los responsables en el diseño, tomar decisiones en función de las ventajas técnicas, ambientales y económicas que pueda tener una solución u otra.

La fig. 4 define un modelo para representar el ciclo de vida para estructuras de hormigón o construcciones; este proceso, al igual que el ciclo de vida de cualquier producto comprende varias etapas. Este modelo (fig. 4) inspirado de Amaya [29], se puede utilizar para modelar escenarios que consideren el reacondicionamiento de las estructuras o construcciones y el reciclaje como fin de vida. Un ciclo de vida clásico puede ser obtenido, así como escenarios más complejos para casos en los que se disponga con elementos que tengan varios escenarios al mismo tiempo; es decir, un “mix” entre la reutilización de ciertos elementos, el reacondicionamiento de otros y el reciclaje. De esta manera, las fases del ciclo de vida se han

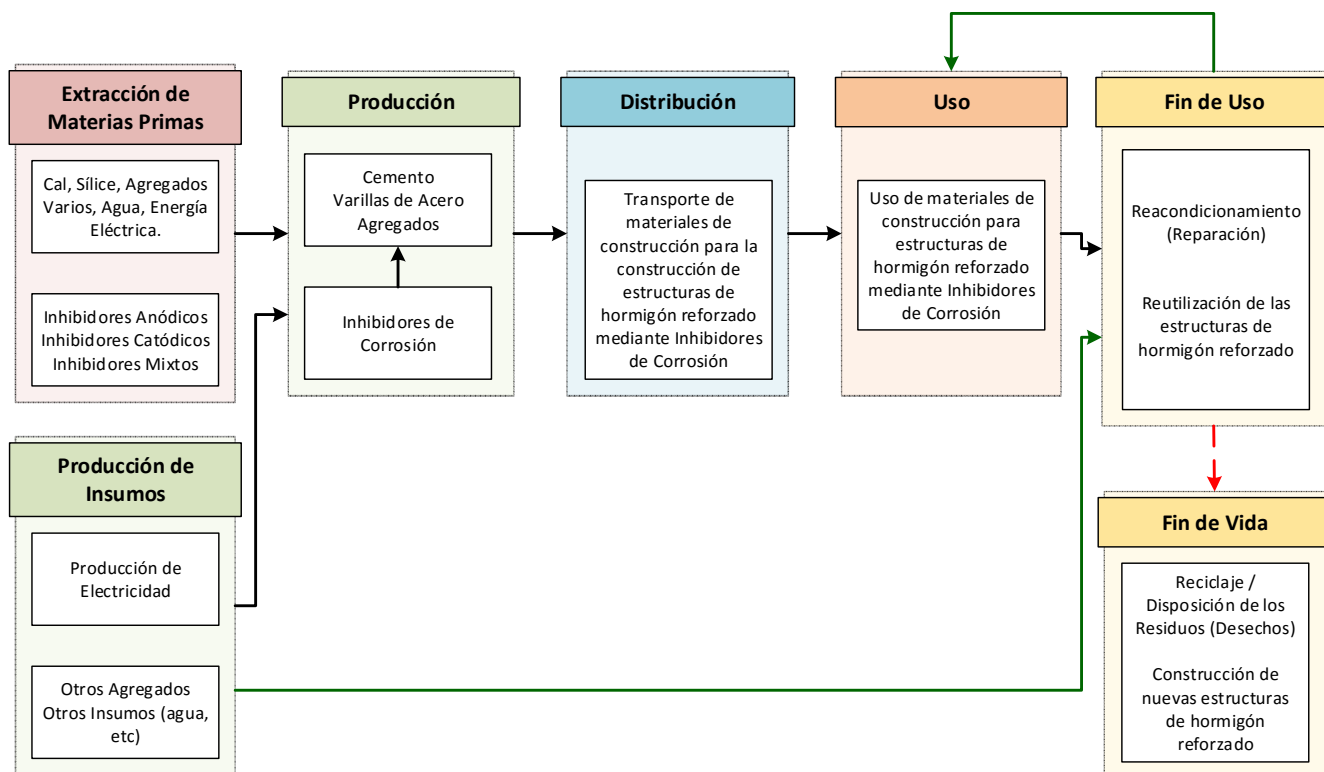


Fig. 4 Modelo del ciclo de vida para estructuras de hormigón o construcciones con inhibidores de corrosión

definido tomando de manera no exhaustiva las fases que los responsables del diseño de estructuras identifican para analizar las causas reales de los posibles problemas durante su funcionamiento, impactos ambientales y reducción de costos. De aquí; 5 fases sugiere la norma ISO 14044, por lo que se ha considerado para modelar el ciclo de vida desde el punto de vista del responsable de diseño: 1) extracción de materia prima y transformación, 2) producción de los materiales de construcción e insumos, 3) distribución de los materiales de construcción, 4) uso de los materiales en estructuras o construcciones, 5) fin de uso/fin de vida de los materiales de construcción, con 2 opciones (recondicionamiento y reciclaje).

**B. Modelo para el Costo del Ciclo de Vida para Estructuras de Hormigón con Inhibidores de Corrosión**

En países industrializados existen controles y estadísticas de las inspecciones de sus construcciones y estructuras de hormigón reforzado; de ahí es común considerar el estado o condición de dichas estructuras comparándolo con la inspección precedente. En la práctica, la condición inicial de las estructuras va a ser un parámetro de clasificación muy general, que al mismo tiempo va a depender de varios parámetros para poder registrar y comparar. Sin embargo, en países en vía de desarrollo difícilmente se cuenta con estos planes de control e inspección de las condiciones de las estructuras de hormigón y construcciones en general.

La literatura propone diferentes metodologías para modelar los costos asociados a las construcciones y estructuras de hormigón. Sin embargo, muy pocos estudios de materiales de construcción con inhibidores de corrosión, parten del concepto global del ciclo de vida. Es decir, la mayoría de estudios parten directamente del costo inicial de los materiales de construcción y lo comparan directamente con el beneficio que se puede obtener en la durabilidad de la estructura. Entonces, se logra demostrar que una prolongación de la fase del ciclo de uso de las estructuras es posible, pero sin tener una clara comparación para verificar si en el resto de las fases del ciclo de vida (fig. 4) los costos continúan representando un beneficio. Por este motivo, esta sección tiene como objetivo considerar el modelo de ciclo de vida de las estructuras de hormigón y construcciones agregando los costos asociados a cada una de las fases del ciclo de vida y apuntar a minimizar desde los costos debido al diseño de la estructura, los costos asociados a la construcción (i.e. materia prima, energía, etc.), los costos asociados al

funcionamiento (i.e. mantenimiento, reparaciones, reacondicionamiento), y finalmente los costos asociados al fin de vida (i.e. reciclaje, disposición de los residuos, etc.).

Como se ha mencionado anteriormente, para determinar un modelo que estime el costo de las intervenciones en estructuras de hormigón con inhibidores de corrosión, es importante evaluar los detalles de los diferentes tipos de intervenciones a lo largo de la fase de utilización para diversos períodos de tiempo. Para ilustrar esto, un esquema (fig. 5) se ha construido considerando las tres opciones mencionadas anteriormente: el diseño del ciclo de vida de la estructura, la fase de utilización de la estructura y su fin de vida. Cada una de estas opciones tiene una influencia diferente sobre el rendimiento y el costo, como se describe mediante un modelo de la degradación y servicio de vida útil para estructuras de hormigón y construcciones.

Dicho modelo de la degradación de las estructuras en función de los daños percibidos a lo largo del tiempo aparece en la fig. 6 de manera teórica. Aquí nos indica que existen límites daños o degradación; para las diferentes fases a considerar cuando se realiza un análisis del costo del ciclo de vida. Es decir, existe un límite de degradación sin daño, donde no se requiere de una intervención por lo que costo de intervención cero. Pero luego, al superar este límite de degradación sin daño, será necesario de realizar una o varias intervenciones dependiendo de la severidad de degradación. Entonces, para tener en cuenta si se realiza una intervención o no, la fig. 6 propone determinar a qué nivel la estructura se encuentra de la capacidad de servicio: estructura a la condición inicial, estructura con propagación de la fractura, o estructura a condición luego de una intervención. Finalmente, también se identifica un límite de daño total. Luego que la degradación supera este límite, la construcción se realizará desde cero. De esta manera, cada uno de los escenarios que se logran identificar mediante el análisis del ciclo de vida de las estructuras de hormigón y construcciones son comparables desde una perspectiva ambiental y desde una perspectiva de reducción de costos. Es decir, los costos en los que incurre diseñar, utilizar (manteniendo una capacidad de servicio de la estructura de hormigón) y valorizar el fin de vida de la estructura, pueden ser comparables mediante el uso de los mismos escenarios que el responsable del diseño define mediante el modelo del análisis de ciclo de vida.

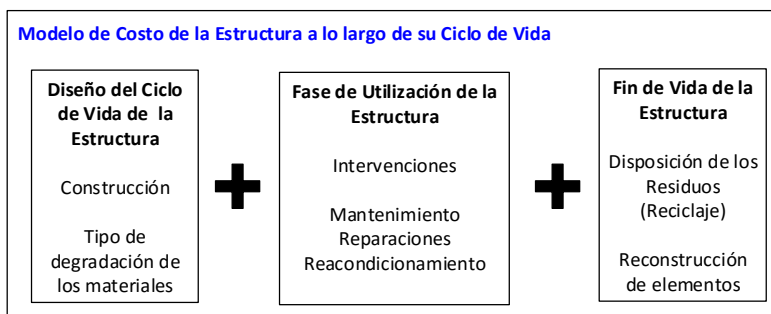


Fig. 5 Modelo de Costos para el diseño, utilización y fin de vida para estructuras de hormigón

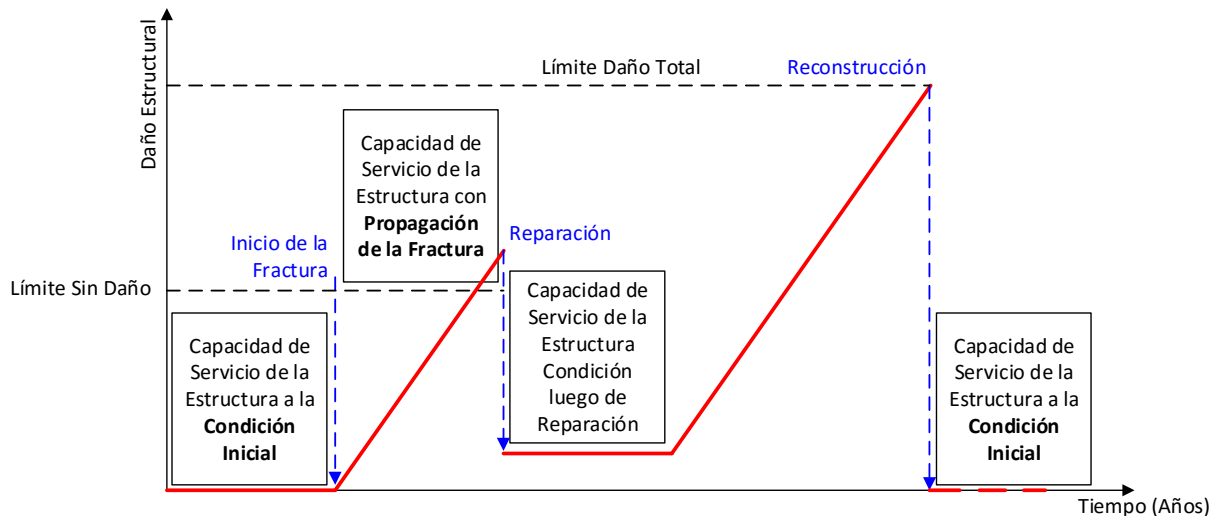


Fig. 6 Degradación y servicio de vida útil para estructuras de hormigón y construcciones

### C. Diseño de los escenarios para analizar la vida útil de estructuras y construcciones

Para analizar el efecto de los inhibidores de corrosión se construirán escenarios diferentes para cuatro tipos de inhibidores de corrosión. De esta manera, se va a comparar materiales de construcción con inhibidores diferentes haciendo ya una larga proyección en cuanto a su ciclo de vida útil y los costos asociados a su ciclo de vida utilizando el programa Life-365. Ya luego la última sección presenta una discusión de estos resultados y como podrían ser mejorados mediante los modelos propuestos en las secciones anteriores.

La Tabla I muestra el diseño de hormigón y tipo de estructura. Las características de cada uno de los inhibidores de corrosión utilizados se muestran en la Tabla II. De ahí, se pueden utilizar ciertos valores de referencia; tales como el valor de la difusión ( $D_{ref}$ ) a los 28 días y el índice de decaimiento de la difusión  $m$ , propuestos por el programa Life-365 y es de  $8.87 \times 10^{-12}$  y 0.20, respectivamente. Sin embargo, otros estudios han mostrado que existe un sobre dimensionamiento de la difusión de cloruros comparados con datos de campo [13] o con otros modelos de simulación [14]. Por tal motivo estos valores fueron adaptados según los parámetros determinados por Robertson [15], quien realizó algunos ensayos de permeabilidad de cloruros en hormigones en zonas intermariales.

TABLE I  
DISEÑO DE HORMIGÓN Y TIPO DE ESTRUCTURA [10]

<b>Tipo de Cemento</b>	Cemento Portland
<b>Composición</b>	> 90% Clinker
<b>Relación a/c</b>	0.42
<b><math>D_{28}</math> (<math>m^2m/s</math>)</b>	$5.50 \cdot 10^{-12}$ [15]
<b><math>m</math></b>	0.38 [13]
<b>Límite de cloruros (<math>C_{th}</math>) % por peso de hormigón</b>	0.05
<b>% acero de refuerzo por peso de hormigón</b>	1.2
<b>Columna circular</b>	50 cm de ancho con un espesor de recubrimiento de 5.45 cm y un largo de 35 m

TABLE II  
CARACTERÍSTICAS DE LOS INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Descripción	Tipo de Inhibidor	Límite Máximo de Cloruros ( $C_{th}$ )	Dosificación Volumen Hormigón ( $l/m^3$ )
Nitrito de calcio (NC)	Inorgánico, anódico	0.24	15
Butil Oleate (BO)	Orgánico, sellado de poros	0.12	5
Aminoalcohol (AA)	Orgánico, mixto	0.12	10
Carboxilato de amina (CA)	Orgánico, mixto	0.18	1

## IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

El modelo probabilístico de Life-365 está basado en las ecuaciones indicadas en el modelo del servicio de vida útil en estructuras de hormigón por acción de cloruros, presentado en la sección II. Ya en la simulación, se consideró el ambiente marino más agresivo como es la zona intermarial, en cuanto a la concentración superficial de cloruros. Los resultados de Life-365 son una estimación probabilística que permite una comparación entre alternativas, sin considerar la acción de los inhibidores frente a fisuras o alteración del espesor de recubrimiento por carbonación o calidad de los materiales de construcción; al igual que los procesos de homogenización y curado. Dichos factores pueden variar los tiempos de iniciación y propagación a similares niveles de concentración de cloruros dependiendo la situación geográfica. En la tabla III se ilustran los periodos de iniciación, propagación y vida útil. El tiempo de iniciación es directamente relacionado con el valor límite de concentración de cloruros de cada sistema, mientras que el tiempo de propagación disminuye de la tasa de corrosión del tiempo propagación.

TABLE III  
DISEÑO DE VIDA ÚTIL, TIEMPO DE INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN  
AMBIENTE I

Tipo	Periodo de iniciación $t_i$ (años)	Periodo de propagación $t_p$ (años) [i]	Periodo de vida útil $t_v$ (años)
Hormigón Base (HB)	5.2	10	15.2
Nitrato de calcio (NC)	19.7	10	29.7
Butil Oleate (BO)	9.5	10	19.5
Aminoalcohol (AA)	9.5	10	19.5
Carboxilato de amina (CA)	13.9	50	63.9

Existen muchos parámetros que influyen en el tiempo de propagación, Life-365 no considera cambio en tiempo de propagación con el uso de inhibidores de corrosión, a excepción de los inhibidores de carboxilato de amina los cuales incrementan en promedio 5 veces este periodo [16] o un 80% en reducir la velocidad de la corrosión [17, 18]. La acción migratoria de estos inhibidores permite actuar más eficientemente luego de iniciada la corrosión, inclusive en presencia de fisuras, comparados con los otros inhibidores de corrosión de contacto [19].

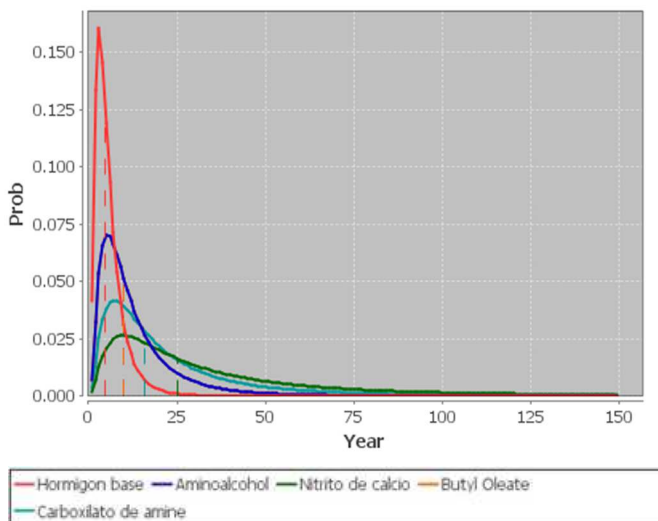


Fig. 7 Probabilidad del periodo de inicio de la corrosión por año,

Los tiempos de inicios son probabilísticos y considera un 50% de probabilidad para cada periodo de iniciación de cada mezcla. La fig. 7 presenta las curvas de probabilidad de iniciación, donde el punto más alto de cada línea es el periodo de iniciación más probable, pero no necesariamente la media. Las alternativas con los inhibidores de corrosión tienen una distribución más ancha, pico más bajo pero un servicio de vida más elevado. Es decir, la alternativa sin aditivos tiene un mayor servicio de vida a sentido determinístico, es así que la incertidumbre es mayor que la predicción del servicio de vida útil del sistema de hormigón base.

La fig. 8 muestra la función de probabilidad acumulada. La alternativa sin adiciones también muestra un sentido probabilístico de un mayor servicio de vida.

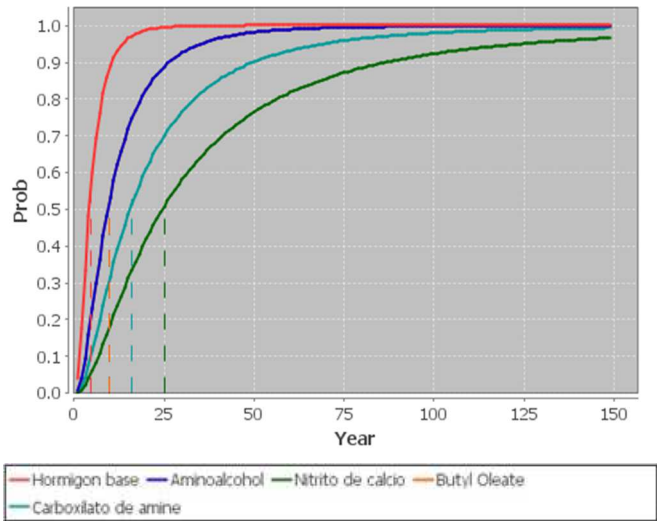


Fig. 8 Probabilidad acumulada del periodo de inicio de la corrosión por año

En lo que respecta al modelo de análisis del costo del ciclo de vida, Life-365 está basado en el costo para estimar el costo del ciclo de vida, Life-365 sigue la guía y la terminología en la norma ASTM E-917. Dicha normativa, estandariza la estimación del ciclo de vida costo de los sistemas de construcción. Esto incluye un cálculo de costos en la inversión inicial y los costos operacionales. Para esta, en cada cálculo, se define un año base, el período de estudio, las tasas de inflación, etc. De ahí se calcula el valor presente de los costos futuros. Se reporta los resultados en valor presente (en dólares constantes) como en dólares actuales; y finalmente se realiza un análisis de la incertidumbre y análisis de sensibilidad. Entonces, los resultados de Life-365 son una estimación probabilística que permite una comparación entre alternativas, sin considerar los costos asociados al fin de vida de las estructuras; aquellos costos por disposición de desechos de los materiales de construcción durante el mantenimiento y reparaciones, y los costos de reacondicionamiento de cualquier área de la estructura o construcción. Según sean seleccionados los procesos de reacondicionamiento o del método de disposición de los desechos, los costos del ciclo de vida de las estructuras varían significativamente.

La tabla IV ilustra los costos estimados para cada fase que considera Life-365 y por cada potencial tipo de estructura de hormigón utilizando los mismos inhibidores de corrosión definidos anteriormente.

De lo que se puede obtener como resultado usando Life-365, el uso de inhibidores de corrosión disminuye el costo a lo largo del ciclo de vida útil de una estructura; siendo el de menor costo la estructura con inhibidor de Carboxilato de amina (CA), a lo largo de un periodo pre-establecido de vida útil de 150 años.



TABLE IV  
ESTIMACIÓN DE COSTOS SEGÚN LIFE-365

Tipo	Costo de Construcción (\$)	Costo en Reparación (\$)	Costo del Ciclo de Vida (\$)
Hormigón Base (HB)	1,328	26,500	27,828
Nitrito de calcio (NC)	1,500	24,071	25,571
Butil Oleate (BO)	1,431	26,293	27,724
Aminoalcohol (AA)	1,465	26,293	27,758
Carboxilato de amina (CA)	1,500	16,222	17,722

La fig. 9 presenta las curvas del valor acumulado presente para el periodo de estudio de 150 años. Aquí también se logra observar una menor inversión a lo largo del tiempo para mantener el valor la estructura con inhibidor de Carboxilato de amina (CA). Finalmente, la fig. 10 también nos da una estimación de los costos mensualidades para el periodo de estudio.

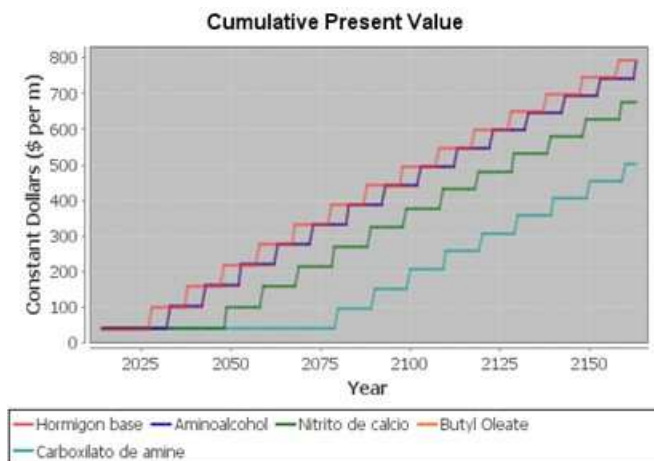


Fig. 9 Servicio de vida útil de estructura de hormigón armado



Fig. 10 Servicio de vida útil de estructura de hormigón armado

## V. CONCLUSIONES

Life-365 muestra que el uso de inhibidores de corrosión incrementan el servicio de vida útil de una estructura. El periodo de iniciación es afectado por el uso de inhibidores de corrosión, sin embargo los inhibidores migratorios muestran además un incremento en el periodo de propagación. En zona intermarial se sugiere el uso de inhibidores de corrosión para extender la vida útil y disminuir el costo de ciclo de vida de una estructura. El inhibidor Carboxilato de amina (CA) muestra un incremento sustancial comparado con los diseños Nitrito de calcio (NC), Aminoalcohol (AA) y el Butil Oleate (BO). El uso de Carboxilato de amina (CA) al inicio de una construcción incrementa el servicio de vida de una estructura y disminuye el ciclo de costo de vida útil. Modelos probabilísticos como el Life-365 requieren de mayor precisión y comparación con datos experimentales.

El modelo propuesto queda como una metodología a integrar a futuro en herramientas como Life-365. Todas las personas involucradas en el diseño de productos pueden utilizar este modelo para incluir sus propios datos para la fase de fin de vida de las estructuras. Entonces, con ese modelo, los diseñadores serán capaces de representar y diseñar el ciclo de vida de cualquier estructura.

Finalmente, los daños estructurales acumulados incurridos por accidentes deben ser incluidos en el modelo propuesto, ya que estos conllevan a una modificación de las propiedades estructurales; y sin ninguna reparación inmediata después de los eventuales accidentes.

## REFERENCIAS

- [1] E. Bastidas-Artega, M Stewart. Damage risks and economic assessment of climate adaptation strategies for design of new concrete structures subject to chloride-induced. *Structural Safety*, 52, 40-53, (2015)
- [2] S. Talukdar, N. Banthia. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change: Development of a service lifespan model. *Construction and Building Materials*. 40, 775-782 (2013)
- [3] Tutti, K. "Corrosion of steel in concrete", Swedish Cement and Concrete Institute, Stockholm, Sweden, CBI-report Fo4, 429 pp (1982)
- [4] T.A Soylev, M Richardson, Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 22, 609-622 (2008)
- [5] Gaidis J., Chemistry of corrosion inhibitors, *Cement & Concrete Composites*, vol 26, 181-189 (2004)
- [6] I Kondratova, P Montes T.W. Bremner. Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs with corrosion inhibitors. *Cement & Concrete Composites*, 25, 483-490 (2003)
- [7] Z Li, B Ma, J Peng, M Qi, The microstructure and sulfate resistance mechanism of high-performance concrete containing CNi, *Cement & Concrete Composite*, 22, 369-377 (2000)
- [8] P Montes, T Bremner, D Lister, Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment
- [9] Stehly R. Report of Cracked Beam Testing AET Job no. 05-1171
- [10] A. Eydelnant, B Miksic, L Gelner, V Ukrainczyk, Migration Corrosion Inhibitors for reinforced concrete, Reporte, Junio 10, 1993.
- [11] M Nagayama, K Shimozaawa, Long-term testing of MCI-2020, General Building Research Corporation of Japan, Reporte, April 1999.
- [12] B. Elsener, Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete, State of the Art Report, European federation of Corrosion, 2001.

- [13] Life Service life Prediction Model, Computer Program for Prediction the Service Life and Life-Cycle costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, [www.life-365.org](http://www.life-365.org)
- [14] E. Bentz. Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides. *ACI Materials Journal*, 100(5), 2003, 391-397
- [15] M. Ehelen, M. Thomas and E. Bentz. Life-365 Service Life Prediction Model version 2.0 Concrete International, 2009, 41-47.
- [16] M. Safehian and A. Ramezani-pour. Prediction of RC structure service life from field long term chloride diffusion. *Computers and Concrete*, 15, (4), 2015, 589/606.
- [17] S. Tange, Y. Tao, C. Andrade, Z. Li, Recent durability studies on concrete structure. *Cement and Concrete Research*, 78, 143-154, 2015.
- [18] J. Ropert and I Robertson, Performance of corrosion inhibiting admixtures in Hawaiian concrete in a marine environment. Final Project Report UHM/CEE/12-04, September 30, 2012.
- [19] <http://www.cortecmci.com/leed/LIFE-365%20Inputs%20for%20MCI.%205.27.15.pdf> Accesado ultima vez: 01/12/2016
- [20] P. Faustino, A. Bras, T. Ripper, Corrosion inhibitor's' effect on design service life of RC structures *Construction and Building materials* 53, 360-369, 2014.
- [21] M Nagayama, K Shimozawa, Long-term testing of MCI-2020, General Building Research Corporation of Japan, Reporte, April 1999.
- [22] Stehly R. Report AET Job No. 05-00597, Mayo 10, 2000.
- [23] K. Sideris, N Anagnostopoulos, Durability of normal strength self-compacting concrete and their impact on service life of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 41, 491-497, 2013.
- [24] W. Radomski, 2002, *Bridge Rehabilitation*, Imperial College Press London.
- [25] L.C. Hollaway, 2010, Polymers, fibers, composites and the civil engineering environment: a personal experience, *Advance Structures Engineering*, 5 (2010), pp. 927-960.
- [26] Pantura, 2011, D 5.3-Needs for Maintenance and Refurbishment of Bridges in Urban Environments.
- [27] N. Hofstra, D. Huisingh, 2014, Eco-innovations characterized: a taxonomic classification of relationships between humans and nature, *Journal of Cleaner Production*, 66 (2014), pp. 459-468.
- [28] Chiua C.K., Jean W.Y. and Chuanga Y.T., 2013, Optimal design base shear forces for reinforced concrete buildings considering seismic reliability and life-cycle costs, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 36 (4), 458-470.
- [29] Amaya J., Zwolinski P., Brissaud D., Environmental benefits of parts remanufacturing: the truck injector case, 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering Proceedings; (2010)