

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Predicción del tiempo de servicio de estructuras de concreto sometidas a ambientes con cloruros en zonas costeras del Ecuador usando el software Life-365

## **PROYECTO DE GRADUACIÓN PARCIAL**

Previo la obtención del Título de:

**Magister en Ingeniería Civil**

**Con mención en Construcción y Saneamiento.**

Presentado por:

Jessica Patricia Chilibingua Cando

Fabián Andrés León Sánchez

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## DEDICATORIA

A Dios, Mis Padres Anibal y Matilde, mi abuelita María, mis hermanas/os, por todo el apoyo brindado durante el camino a mi éxito, a mi hijo Sebastián por ser el motor de mi vida. A mis maestros por los conocimientos impartidos durante este proceso académico.

Jessica

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por haberme dado sabiduría, inteligencia y fuerzas. A mis padres, Fabian y Gina por brindarme su apoyo incondicional y durante todo este camino, a mis hermanos que han sido mi incentivo para no rendirme y a mis maestros por impartir sus conocimientos durante todo este periodo académico.

Fabián

## **AGRADECIMIENTOS**

Nuestro más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en especial al PhD. Mauricio Cornejo Martínez, Tutor del Proyecto de Grado, por compartir sus conocimientos, su apoyo y paciencia en el desarrollo del proyecto.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Jessica Patricia Chilibuquina Cando y Fabián Andres León Sánchez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

---

Jessica Patricia  
Chilibuquina Cando  
**Teléfono:** 0998513448  
**Email:**  
jchilibu@espol.edu.ec

---

Fabián Andres León  
Sánchez  
**Teléfono:**  
0981709656  
**Email:**  
faanleon@espol.edu.ec

# EVALUADORES

.....  
**Msc. Nadia Rosaura Quijano Arteaga**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**PhD. Mauricio Heriberto Cornejo Martínez**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Debido a su durabilidad, el concreto es el material de construcción más popular. Sin embargo, debido a su exposición al medio ambiente, es susceptible a agentes externos como el ion cloruro, que corroe el acero de refuerzo y provoca grietas en el concreto, debilitando su estructura.

En esta investigación, con el objetivo de predecir el tiempo de servicio de dos estructuras de concreto, ubicadas en la provincia de Guayas y Manabí, se han establecido mediante la revisión bibliográfica de estudios realizados en el Ecuador y países similares al nuestro, condiciones de análisis tales como: la relación  $a/c$ , la temperatura de las zonas de estudio, la concentración de cloruros, entre otros, los cuales influirán en la difusión de los iones cloruros y por ende en la determinación del tiempo de servicio de la estructura.

El tiempo de servicio de la estructura de concreto se determina mediante el uso del Software Service Life 365, que se basa en el modelo matemático de la segunda Ley de Fick, en circunstancias que favorecen la difusión de iones cloruro en el concreto base y con el uso de inhibidores de corrosión, permitiendo la intervención en la estructura para su reparación brindando mayor durabilidad en la misma durante la etapa temprana de corrosión y su propagación.

Los resultados obtenidos definen que, las estructuras concreto a una relación  $a/c$  de 0.40 con una resistencia de 300 kg/cm<sup>2</sup>, definidas a concentraciones de cloruros de 0.60 y 0.20 %wt. en zonas ubicadas en el perfil costero y alejadas de este, respectivamente, presentan un tiempo de vida útil promedio de 16.55 años, a partir del cual debe efectuarse su primera reparación para evitar el deterioro de estas estructuras. Además, se determinó que, el valor del umbral crítico de los cloruros en el cual se da inicio la corrosión del acero de refuerzo en la estructura, es del 0.05% wt.

**Palabras Clave:** cloruros, corrosión, concreto, service life 365.

## **ABSTRACT**

*Due to its durability, concrete is the most popular construction material. However, due to its exposure to the environment, it is susceptible to external agents such as chloride ions, which corrode the reinforcing steel and cause cracks in the concrete, weakening its structure.*

*In this investigation, with the objective of predicting the service time of two concrete structures, located in the provinces of Guayas and Manabí, analysis conditions have been established through the bibliographic review of studies made in Ecuador and countries similar to ours, such as the w/c ratio, the temperature of the study, the concentration of chlorides, among others, which will influence the diffusion of chloride ions and therefore in the determination of the service time of the structure.*

*The service time of the concrete structure is determined by using the Service Life 365 Software, which is based on the mathematical model of Fick's second Law, in circumstances that favor the diffusion of chloride ions in the base concrete and with the use of corrosion inhibitors, allowing intervention in the structure for its repair, providing greater durability during the early stage of corrosion and its propagation.*

*The results obtained define that the concrete structures at a w/c ratio of 0.40 with a resistance of 300 kg/cm<sup>2</sup>, defined at chloride concentrations of 0.60 and 0.20% wt. in areas located on the coastal profile and far from it, respectively, have an average useful life of 16.55 years, after which their first repair must be carried out to avoid the deterioration of these structures. In addition, it was determined that the critical threshold value of chlorides in which the corrosion of the reinforcing steel in the structure begins, is 0.05% wt.*

*Keywords: chlorides, corrosion, concrete, service life 365.*



# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	ii
ÍNDICE GENERAL .....	iii
ABREVIATURAS .....	v
SIMBOLOGÍA .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
CAPÍTULO 1.....	1
1.1    Introducción .....	1
1.2    Antecedentes.....	2
1.3    Justificación .....	4
1.4    Objetivos.....	5
1.4.1    Objetivo General .....	5
1.4.2    Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
2.1    Marco teórico.....	6
2.1.1    Vida útil .....	6
2.1.2    Corrosión del acero de refuerzo.....	7
2.1.3    Iones cloruro .....	8
2.1.4    Formas de ingreso de los iones cloruro al concreto.....	10
2.1.5    Transporte de ion cloruro en el concreto.....	11
2.1.6    Durabilidad del concreto .....	12
2.1.7    Resistencia a la compresión del concreto.....	15

2.1.8	Recubrimiento de concreto especificado para agentes corrosivos .....	18
2.1.9	Inhibidores de corrosión.....	18
2.1.10	Leyes de difusión de Fick.....	19
2.1.11	Life – 365 Model .....	22
CAPITULO 3.....		25
3.1	Metodología.....	25
3.1.1	Parámetros de estudio.....	25
3.1.2	Población de estudio.....	25
3.1.3	Software Life 365 .....	25
3.1.4	Predicción del tiempo de servicio.....	28
CAPÍTULO 4.....		29
4.1	Resultados y discusión.....	29
4.1.1	Revisión Bibliográfica.....	29
4.1.2	Casos de estudios .....	32
4.1.3	Interpretación y análisis de resultados.....	33
CAPÍTULO 5.....		43
5.1	Conclusiones y Recomendaciones.....	43
BIBLIOGRAFIA.....		45
ANEXOS.....		48

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials
CYTED	Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo

## SIMBOLOGÍA

a/c	relación agua - cemento
A/B	relación agua - aglutinante
m	metro
mm	milímetro
°C	grados centígrados
Kg/m <sup>3</sup>	kilogramo/metro cúbico
% wt. Conc.	porcentaje en relación al peso del concreto
m*m/sec	milímetro cuadrado/segundo
yrs	años
f'c	resistencia especificada a la compresión del concreto
fy	resistencia especificada a la fluencia del refuerzo
C <sub>l</sub>	Cloruros libres
C <sub>f</sub>	Cloruros fijos
C <sub>t</sub>	Cloruros totales
D <sub>28</sub>	Coeficiente de difusión a los 28 días
C <sub>f</sub>	Umbral de cloruro
t <sub>i</sub>	Periodo de iniciación
t <sub>p</sub>	Periodo de propagación
t <sub>v</sub>	Periodo de vida útil

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Concentración de iones sobre el contenido de cemento para el inicio de la corrosión. (Cordero, 2005).....	3
Figura 2.2 Modelo de vida útil para estructuras de concreto armado. (Tuutti, 1982).....	6
Figura 2.3 Tipos de corrosión en armaduras y factores que los provocan. (Feliu & Andrade, 1989).....	8
Figura 2.4 Representación del proceso de difusión (González, 2014) .....	11
Figura 2.5 Esquema del fenómeno electroquímico de la corrosión por cloruros (Pérez, 2010) .....	11
Figura 2.6 Tipos de exposición marina (IECA, 2013) .....	15
Figura 2.7 Perfiles de cloruro en el concreto (Khitab, 2005).....	20
Figura 2.8 Predicción de la corrosión con penetración de cloruros en el concreto (Khitab, 2005) .....	21
Figura 3.9 Pestaña proyecto.....	26
Para la exposición del concreto en el sitio de análisis, se ingresaron los datos de concentración de cloruros y temperaturas de forma manual, conforme las condiciones de nuestro estudio. ....	26
Figura 3.10 Pestaña exposición .....	26
Figura 3.11 Pestaña de mezcla de concreto .....	27
Figura 3.12 Gráficos de iniciación .....	27
Figura 3.13 Pestaña características del concreto .....	28
Figura 3.14 Informe de vida útil del proyecto.....	28
Figura 4.15 Perfil de concentraciones de cloruros en el concreto a diferentes relaciones a/c. (Zhang et al., 2018).....	29
Figura 4.16 Perfil de concentraciones de cloruros en el concreto a diferentes tiempos de exposición, relación a/c=0.40. (Ju et al., 2022).....	30

Figura 4.17 Perfil de distribución de concentraciones de cloruros en el concreto de cemento tipo I. (Alawi Al-Sodani et al., 2021) .....	31
Figura 4.18 Variación del Tiempo de servicio de la estructura – Caso 1.....	34
Figura 4.19 Reporte tiempo de servicio Caso 1.....	35
Figura 4.20 Escala de concentración de cloruro de la mezcla de concreto sin inhibidor & con inhibidor, Caso 1.....	36
Figura 4.21 Concentración de cloruros en el punto de inicio, por la parte inferior de la estructura. Caso 1 .....	36
Figura 4.22 Variación del Tiempo de servicio de la estructura – Caso 2.....	37
Figura 4.23 Reporte tiempo de servicio Caso 2.....	38
Figura 4.24 Escala de concentración de cloruro de la mezcla de concreto sin inhibidor & con inhibidor, Caso 2.....	39
Figura 4.25 Concentración de cloruros en el punto de inicio, por la parte inferior de la estructura. Caso 2 .....	39
Figura 4.26 Comparación del tiempo de servicio, según la ubicación del proyecto. .	40
Figura 4.27 Comparación tiempo de servicio, concreto base. ....	41
Figura 4.28 Comparación tiempo de servicio, concreto con nitrito de calcio. ....	42
Figura 4.29 Comparación del tiempo de servicio a 0.20 y 0.60 %wt. conc.....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Valor crítico de cloruros en concretos reforzados (Del Valle et al., 2001).....	10
Tabla 2.2 Categorías y clases de exposición (ACI-318, 2019) .....	12
Tabla 2.3 Factores que afectan el ataque del concreto por parte de los agentes químicos (Perdomo, 2011).....	14
Tabla 2.4 Resistencia a la compresión del concreto, relación agua/cemento. ....	16
Tabla 2.5 Requisitos para el concreto según la clase de exposición (ACI-318, 2019) ..	16
Tabla 2.6 Recubrimientos recomendados (ACI-318, 2019).....	18
Tabla 4.7 Proporción de mezcla de concreto experimental (Zhang et al., 2018).....	29
Tabla 4.8 Proporción de mezcla de concreto experimental (Ju et al., 2022) .....	30
Tabla 4.9 Tiempo de servicio de la estructura (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021) & (Hidalgo, 2016).....	31
Tabla 4.10 Tiempo de servicio de la estructura, caso 1 (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021) .....	32
Tabla 4.11 Registro temperatura media – Caso 1 (Climate Data, 2022) .....	32
Tabla 4.12 Segundo caso de estudio (Hidalgo, 2016).....	33
Tabla 4.13 Registro temperatura media – Caso 2 (Weather Atlas, 2022) .....	33
Tabla 4.14 Datos de ingreso – Caso 1 .....	33
Tabla 4.15 Iteraciones variación concentración superficial – Caso 1 .....	34
Tabla 4.16 Datos de ingreso – Caso 2 .....	37
Tabla 4.17 Iteraciones variación concentración superficial – Caso 2 .....	37
Tabla 4.18 Tiempo de iniciación y vida útil de la estructura.....	41

# CAPÍTULO 1

## 1.1 Introducción

En el área de la construcción, el concreto por su durabilidad y facilidad de uso es uno de los materiales más utilizados en comparación con otros materiales; pero, debido a su exposición en el ambiente, este se encuentra vulnerable a diversos agentes, siendo uno de ellos el ion cloruro causante de la corrosión en el acero de refuerzo y, por ende, la durabilidad de las estructuras. El deterioro de las estructuras de concreto ha generado gran interés de investigación para establecer un monitoreo y predicción de la vida útil del concreto, así como, de los costos que representa la reparación de estas. (Pereira, 2016)

La corrosión del acero de refuerzo provocada por la carbonatación del hormigón y la presencia de iones de cloruro es la causa más frecuente del deterioro del hormigón armado. Su deterioro también está ligado a malas técnicas constructivas, como el uso de agua y áridos contaminados con cloruros, sulfatos y otros elementos agresivos, con insuficiente revestimiento de acero de refuerzo, uso de relaciones agua/cemento excesivamente altas, y no compactación y curado del concreto. (González, 2014)

Los iones cloruros causan la corrosión del acero de refuerzo y provocan una falla prematura en el desempeño de las estructuras de concreto armado. Los métodos de diseño prescriptivos convencionales o los métodos totalmente probabilísticos no pueden garantizar un desempeño explícito en la etapa de diseño. (Yang et al., 2016).

Este trabajo procura proporcionar un enfoque general de este fenómeno y su afectación en la vida útil de las estructuras de concreto, para ello se utilizará el software Life 365, que nos determinará la vida útil de la estructura, bajo el desarrollo de dos fases de la corrosión, el periodo de iniciación y el tiempo de propagación, la cual establece el tiempo



necesario para que los iones cloruro rompan la capa protectora del acero de refuerzo y originen su corrosión.

## **1.2 Antecedentes**

La corrosión de las armaduras en la década de 1960 – 1970, era un tema de interés marginal debido a la limitación del número de entornos construidos; sin embargo, en la década de 1970. El estudio de este fenómeno fue más riguroso a partir de la utilización de técnicas electroquímicas. Ya, en la década de 1980, se dio inicio al estudio de la “vida útil” de las estructuras, pero no es hasta la década siguiente que fue tomando interés a través de la conformación de los Comités de la RILEM y el Programa Iberoamericano sobre Corrosión de CYTED que ampliaron dicho conocimiento, generando mucho interés investigativo a partir del siglo XXI. (Andrade, 2018)

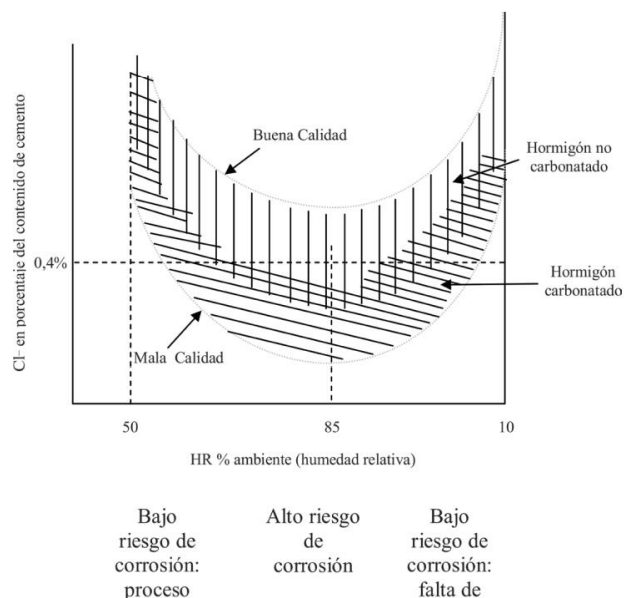
El entorno en el que se ubica la estructura determina la categoría de exposición para la selección de materiales, las consideraciones de diseño y los requisitos de construcción para minimizar la posibilidad de deterioro prematuro de la estructura provocado por los efectos ambientales. El grado de mantenimiento preventivo también tiene un impacto en la durabilidad de una estructura. (ACI-318, 2019)

La resistencia del concreto a la penetración de fluidos está determinada en gran medida por la composición de los materiales cementosos y la relación agua – cemento, los cuales influyen en su duración. Según la normativa ACI-318, los concretos expuestos en las categorías C0, C1 y C2, cuyos iones de cloruro inducen a la corrosión del refuerzo, generan una reducción en el área de la sección del refuerzo que puede conducir a una fractura del acero. (ACI-318, 2019)

El principal problema de durabilidad y uno de los problemas que la tecnología del concreto aún no ha abordado suficientemente es la corrosión de las barras de refuerzo (Cordero, 2005). Con base en el valor umbral para el contenido de cloruro que causa corrosión en el acero de refuerzo, se han desarrollado diversos modelos de vida útil, siendo el modelo de Tuutti el más popular por su investigación “Corrosion of Steel in concrete”, que considera dos etapas del proceso de corrosión: la etapa de iniciación,

durante la cual los iones de cloruro y la carbonatación avanzan a través de la masa de concreto hasta llegar a la armadura y romper su capa protectora, y la etapa de propagación, durante la cual la armadura se corroe hasta alcanzar un estado de deterioro que ponga en peligro la integridad estructural o la seguridad. (Ossorio & Lorenzo, 2014)

Además de la disminución del pH que provoca la destrucción de la capa de pasivación, la corrosión por cloruro es inevitable, pues por la acción de los cloruros, éste se vuelve progresivamente más poroso hasta que un nivel crítico de éstos hace que desaparezca (Cordero, 2005). La figura 1.1 explica cómo la humedad relativa y el contenido de cloruro pueden causar corrosión en las barras de acero de refuerzo (Ossorio & Lorenzo, 2014).



**Figura 1.1 Concentración de iones sobre el contenido de cemento para el inicio de la corrosión. (Cordero, 2005)**

En la actualidad existen varios softwares que determinan en las estructuras de concreto el periodo de vida útil cuando están expuestos en ambientes con cloruros, siendo uno de ellos el software Life 365, el cual permite predecir el periodo de servicio del elemento, considerando características propias de este (recubrimiento,  $f'c$  del concreto,  $f_y$  del acero de refuerzo, uso de aditivos inhibidores de corrosión) y características propias del entorno (temperatura, % de presencia de cloruros, entre otros), y además permite determinar los costos de mantenimiento que se generarían a largo plazo si el elemento

de concreto armado posee o no aditivos que mejoren su resistencia a la corrosión. (Life-365™ Consortium III, 2020)

### **1.3 Justificación**

Durante varios años las estructuras de concreto han presentado un descenso de su vida útil al encontrarse construidos en ambientes salinos, pues debido a varios factores que influyen en la propagación de diversos agentes agresivos; entre ellos la penetración de iones de cloruro en su estructura, ha generado la rotura de la capa protectora del acero de refuerzo, afectando sus propiedades mecánicas y por ende su vida útil. (Hidalgo, 2016)

El estudiar el comportamiento de la corrosión según su nivel de agresividad por el contenido de los cloruros en el acero de refuerzo, ha creado el interés de varios investigadores en predecir el tiempo de servicio de las estructuras de concreto, a través de la aplicación de modelos matemáticos y software que sirvan de apoyo para simular varios tipos de escenarios. (González, 2014)

La utilización del software Life 365, permite establecer un tiempo predictivo de la etapa inicial de corrosión y su propagación dentro de la durabilidad de las estructuras de concreto (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021). El proyecto brinda un enfoque de evaluación de diferentes estructuras de concreto ubicadas en ambientes salinos y la incidencia de cloruros en las ciudades costeras del Ecuador; permitiendo la toma de acciones preventivas para una mayor durabilidad de estas.

En el Ecuador, no se presentan estadísticas que identifiquen los costos que se incurren para el mantenimiento y reparación de estructuras de concreto. Sin embargo, en los Estados Unidos, la Administración Federal de los Estados Unidos mostró a través de un estudio realizado, que este país invierte anualmente 137.9 billones de dólares en el sector industrial debido a la corrosión, de los cuales 22.6 billones pertenecen a reparaciones de infraestructura. Estos gastos han representado aproximadamente 3.1% del producto interno bruto. (Pereira, 2016)

En España la tercera patología de mayor incidencia encontradas entre las diferentes patologías analizadas en los 844 casos es la corrosión, representando el 15% y, las fisuras y deformaciones excesivas el 2 y 22%, respectivamente. Mientras que, en el sur de Brasil, del análisis efectuado a 1512 casos de diagnósticos con diferentes patologías, la incidencia de la corrosión en el acero de refuerzo representa el 40% del total de los daños. (Cordero, 2005)

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Predecir el tiempo de servicio de estructuras de concreto debido al grado de corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto expuestas a cloruros, usando el software Life 365.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar información bibliográfica de estructuras de concretos situados en ambientes salinos y su corrosión por el grado de agresividad en el contenido de cloruros.
- Modelar estructuras de concreto a través de uso del software Life 365 bajo diversos escenarios para su comparación en el tiempo de servicio.
- Estimar el tiempo de vida útil en estructuras de concreto expuestos a ambientes salinos a través del grado de penetración del ion cloruro.

# CAPÍTULO 2

## 2.1 Marco teórico

### 2.1.1 Vida útil

Se define al periodo durante el cual una estructura mantiene todos los aspectos necesarios para su integridad estructural, que incluye la seguridad, funcionalidad, resistencia y estética, sin incurrir en costos de mantenimiento imprevistos. (Cordero, 2005)

Tuutti propuso un modelo simplificado para la corrosión del acero de refuerzo, que se muestra en la figura 2.2, en la que el tiempo se representa en abscisas y la profundidad de penetración de los cloruros en ordenadas. Por su simplicidad descriptiva, este modelo es cualitativo porque establece un período de iniciación, el tiempo que tardan los iones de cloruro en atravesar el revestimiento, llegar al refuerzo y provocar la rotura de la capa protectora, y un período de propagación, que incluye la acumulación gradual de deterioro. hasta que alcance un nivel inaceptable. (Ossorio & Lorenzo, 2014)

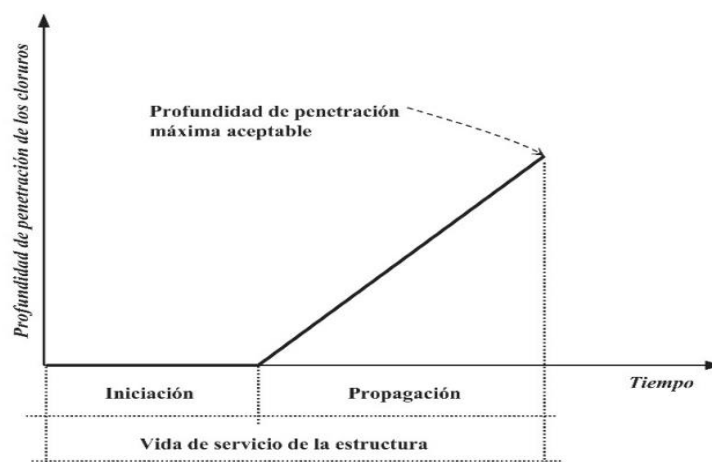


Figura 2.2 Modelo de vida útil para estructuras de concreto armado. (Tuutti, 1982)

### **2.1.2 Corrosión del acero de refuerzo**

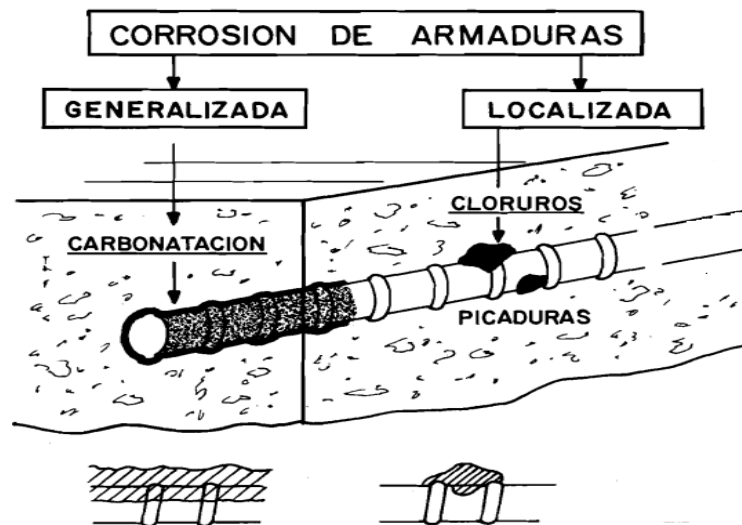
El concreto solo y en combinación con el acero de refuerzo proporcionan una estructura con propiedades mecánicas adecuadas para su uso previsto, facilitando una vida útil más prolongada en la mayoría de sus aplicaciones. El efecto protector del concreto sobre el acero de refuerzo es muy importante para prolongar la vida útil de las estructuras de concreto, pues al ser este un material denso y resistente a la corrosión forma una barrera física entre la armadura y el exterior. Además, al poseer una alta alcalinidad ( $\text{pH} > 12$ ), al combinarse con una cierta cantidad de oxígeno forma una capa pasivante sobre el acero, protegiéndolo de la corrosión. (González, 2014)

El concreto a pesar de ser denso y resistente, no es impermeable porque tiene una red de poros que, a pesar de estar desconectados entre sí, permiten que algunos elementos externos atraviesen su estructura y lleguen al acero.

Una vez que se elimina la capa pasivante que protege al acero de refuerzo, este comienza a corroerse, iniciando así la corrosión en el acero de refuerzo. Básicamente, existen dos razones por las cuales esta capa puede destruirse. (Feliu & Andrade, 1989)

- El concreto se ha elaborado con materiales contaminados por cloruros, o porque existe una concentración de cloruros en la superficie del acero, procedentes del exterior y atravesando la red porosa.
- Cuando el concreto reacciona con sustancias ácidas, su alcalinidad se reduce.

La concentración de cloruro causa en el acero una corrosión localizada, mientras que, la corrosión se localiza se genera cuando la capa pasivante se destruye al disminuir el pH, como se evidencia en la figura 2.3.



**Figura 2.3 Tipos de corrosión en armaduras y factores que los provocan. (Feliu & Andrade, 1989)**

### 2.1.3 Iones cloruro

Los cloruros son sustancias con un átomo de cloro en su estado de oxidación más bajo posible, -1. La importancia de este elemento en las estructuras de concreto se encuentra relacionada con la vida útil de las mismas, pues facilitan el inicio de la corrosión del acero de refuerzo. (González, 2014)

La rotura de la capa protectora del acero de refuerzo se genera por la presencia de los iones cloruro en el concreto, facilitando el inicio de la corrosión del acero de refuerzo. Estos iones se encuentran naturalmente en el ambiente, siendo una fuente de ellos el mar, donde se encuentra aproximadamente como cloruro de sodio, cloruro de magnesio o cloruro de potasio. Los cloruros provocan la despasivación de la armadura en regionales localizadas hasta provocar la rotura en un punto en el acero de refuerzo. (González, 2014)

Los cloruros pueden encontrarse en el concreto debido a que se hallan en los materiales utilizados para mezclarlo (agua, aditivos, cemento, etc.). Además, se encuentran en ambientes marinos o cuando se utilizan sales en climas fríos o pueden infiltrarse desde el exterior quitando el hielo de caminos o puentes. En general, todas las normativas

establecen límites en la cantidad de cloruros en el concreto; sin embargo, esto varía según muchos factores como el tipo de cemento, la relación de cemento, la relación a/c, el contenido de humedad, etc., por lo que es un desafío establecer un límite seguro del contenido de cloruro por debajo del cual el riesgo de despasivación es mínimo en el acero de refuerzo. (Feliu & Andrade, 1989)

En el concreto los iones cloruro están presentes de dos maneras, como cloruros libres,  $C_l$ , que inciden directamente en el inicio de la corrosión en la fase acuosa del concreto; y, como cloruros fijos,  $C_f$ , presentes en la matriz del cemento que participan finalmente en el proceso de corrosión, mientras que la suma de estos dos, determinan los cloruros totales,  $C_t$ , que se localizan en la solución de poro capilar y unidos a la superficie sólida del concreto debido a interacciones con los productos de hidratación del cemento, respectivamente. El contenido de cloruros en una muestra de concreto se determina a través de varios procedimientos normalizados por la ASTM, siendo el ensayo estándar C1218 “*Método de prueba estándar para cloruro soluble en agua en mortero y concreto*” y C1152 “*Método de prueba estándar para cloruro soluble en ácido en mortero y concreto*”, las cuales determinan el contenido de cloruros libres y totales, respectivamente. (González, 2014)

Generalmente, el ion cloruro libre es el responsable del inicio de la corrosión, donde el valor del umbral necesario para iniciar la corrosión se proporciona especialmente en términos de cloruros totales y ocasionalmente en términos de cloruros libres. Sin embargo, la unión de iones cloruros es un fenómeno muy importante, pues la capacidad de un material para unir estos, determinará cuánto contenido libre está disponible para causar daño. (Khitab, 2005)

Hay cuatro compuestos principales en el cemento Portland,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ , Silicato tricálcico ( $C_3S$ ) y Silicato bicálcico ( $C_2S$ ), de los cuales el aluminato ( $C_3A$ ) y aluminoferrita ( $C_4AF$ ), son responsables de unión química de los cloruros; pero, el aumento del contenido de sulfato tiende a reducir esta unión ya que los sulfatos tienen una mayor tendencia a unirse con el aluminato que con los cloruros, estos compuestos son los principales parámetros que afectan la unión química del cloruro.



Mientras que, la unión física depende del contenido de productos hidratados como C-S-H, es decir, calcio, silicato e hidrato, siendo un producto de hidratación, la reacción de dos silicatos de calcio ( $C_3S$  y  $C_2S$ ). En resumen, el total de cloruros enlazados es la suma de los enlazados químicamente y los enlazados físicamente. (Khitab, 2005)

**Tabla 2.1 Valor crítico de cloruros en concretos reforzados (Del Valle et al., 2001)**

PAIS	NORMA	LIMITE MAS DE C1-	REFERIDO A
USA	AC1 318	$\leq$ a 0.15% en ambiente de C1	cemento
USA	AC1 318	$\leq$ a 0.3% en ambiente normal	cemento
USA	AC1 318	$\leq$ a .1% en ambiente seco	cemento
INGLATERRA	CP-110	$\leq$ a 0.35% al menos en un 95%	cemento
AUSTRALIA	AS 3600	$\leq$ al 0.22%	cemento
NORUEGA	NS 3474	$\leq$ al 0.6%	cemento
ESPAÑA	EH 91	$\leq$ al 0.40%	cemento
EUROPA	EUROCODIGO 2	$\leq$ al 0.22%	cemento
JAPON	JSCE-SP 2	$\leq$ al 0.6 Kg/m <sup>3</sup>	concreto
BRASIL	NBR 6118	$\leq$ al 0.05%	agua

#### 2.1.4 Formas de ingreso de los iones cloruro al concreto

La presencia de los iones cloruros puede deberse a dos razones:

La primera se debe durante el proceso de preparación de la mezcla de concreto el agua de amasado contenga iones cloruros, o por la contaminación con el agregado fino (arena) o formen parte del aditivo (Moreno, 2010).

El segundo caso es el ingreso de agua salada en ambientes marinos desde el exterior en diferentes proporciones hasta alcanzar el acero de refuerzo donde inicia el deterioro y comienza el periodo de propagación. Este ingreso estará relacionado con el transporte de fluidos en un medio poroso, por lo que es necesario comprender los distintos sistemas que intervienen (Moreno, 2010).

### 2.1.5 Transporte de ion cloruro en el concreto

A partir de numerosos estudios sobre el patrón de movimiento de varios iones de cloruro en una matriz porosa, se desarrollan los modelos para predecir la vida útil de las estructuras de concreto. Por lo general, la difusión es el proceso por el cual los iones de cloruro se mueven de un área de mayor concentración a un área de menor concentración cuando están presentes. (González, 2014)

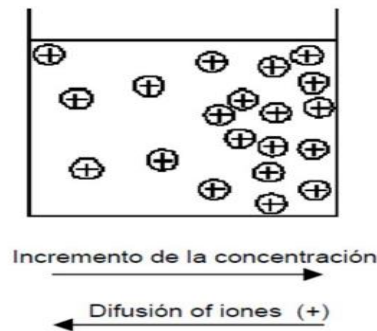


Figura 2.4 Representación del proceso de difusión (González, 2014)

Desde la superficie del concreto hasta el acero de refuerzo (figura 2.5) los iones de cloruro de fuentes internas y externas ingresan a través del agua en la estructura porosa. Como resultado, forman diminutos ánodos de metal activo que están rodeados por áreas de cátodo de metal pasivo, penetrando los diversos puntos débiles del acero a través de picaduras y destruyendo localmente la capa pasiva del acero (Pérez, 2010)

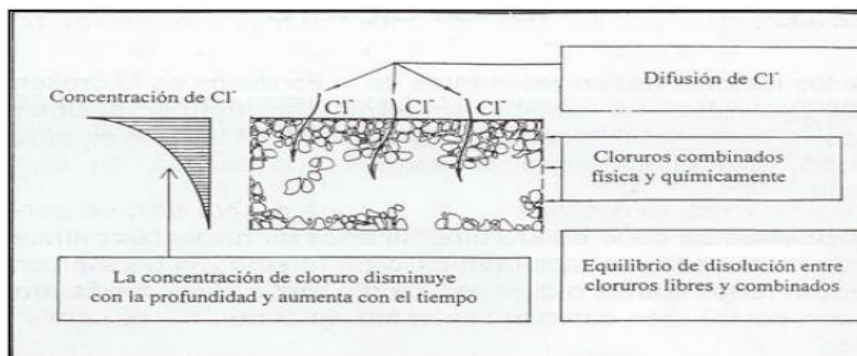


Figura 2.5 Esquema del fenómeno electroquímico de la corrosión por cloruros (Pérez, 2010)

Dado que el agua con cloruros entra en el concreto por succión capilar al principio del periodo de humectación y vuelve a entrar en el mismo, evaporándose durante el periodo de secado, dejando los cloruros en el interior del elemento, los ciclos de mojado y secado del agua con cloruros en la superficie del concreto dan como resultado un aumento de éstos en la capa superficial. La repetición de este procedimiento puede elevar el nivel de iones de cloruro en las regiones de secado y humectación del concreto. (Pérez, 2010)

En general, la despasivación del acero de refuerzo a causa de iones de cloruro depende de dos parámetros:

- Coeficiente de difusión del concreto, el cual varía en función del tamaño y distribución de los poros del concreto.
- La capacidad del concreto para fijar o combinar cloruros.

### 2.1.6 Durabilidad del concreto

Según el (ACI 201.2R-01 & O, 2001), define a la durabilidad como: *“La capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente.”*

El concreto se encuentra expuesto a diferentes ambientes los cuales afectan la durabilidad del concreto, es por ello que el (ACI-318, 2019), establece la asignación de categorías y clases de exposición, basadas en la severidad de la exposición.

**Tabla 2.2 Categorías y clases de exposición (ACI-318, 2019)**

<b>Categoría</b>	<b>Clase</b>	<b>Condición</b>
Congelamiento y deshielo ( <b>F</b> )	<b>F0</b>	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.
	<b>F1</b>	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad.
	<b>F2</b>	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto frecuente con la humedad.

	<b>F3</b>	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo que estará en contacto frecuente con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes.	
Sulfato ( <b>S</b> )		Sulfatos solubles en agua ( $SO_4^{2-}$ ) el suelo, % en masa	Sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) disuelto en agua, ppm
	<b>S0</b>	$SO_4^{2-} < 0.10$	$SO_4^{2-} < 150$
	<b>S1</b>	$0.10 \leq SO_4^{2-} < 0.20$	$150 \leq SO_4^{2-} < 1500$
	<b>S2</b>	$0.20 \leq SO_4^{2-} \leq 2.00$	$1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10000$
	<b>S3</b>	$SO_4^{2-} > 2.00$	$SO_4^{2-} > 10000$
En contacto con el agua ( <b>W</b> )	<b>W0</b>	Concreto seco en servicio	
	<b>W1</b>	Concreto en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	<b>W2</b>	En contacto con el agua donde se requiera baja permeabilidad	
Protección del refuerzo para la corrosión ( <b>C</b> )	<b>C0</b>	Concreto seco o protegido contra la humedad.	
	<b>C1</b>	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	<b>C2</b>	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen.	

*“La durabilidad del concreto se ve afectada por la resistencia de concreto a la penetración de fluidos. Esto es afectado primordialmente por la relación a/mc y la composición de los materiales cementantes utilizados en el concreto. Para una relación a/mc dado, la utilización de ceniza volante, cemento de escoria de alto horno, humo de sílice o una combinación de estos materiales normalmente aumento la resistencia del concreto a la penetración de fluidos y aumenta su durabilidad.” (ACI-318, 2019)*

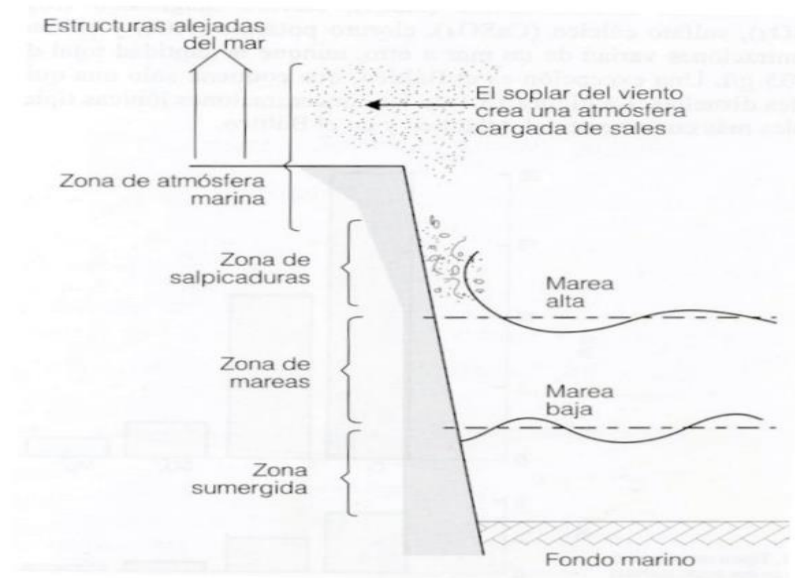
La Tabla 2.3 muestra los elementos que influyen en la resistencia al deterioro del concreto, siempre que se tenga el debido cuidado a la hora de decidir los componentes y dosificar la mezcla.

**Tabla 2.3 Factores que afectan el ataque del concreto por parte de los agentes químicos (Perdomo, 2011)**

Factores que aceleran o agravan el ataque	Factores que mitigan o demoran el ataque
1. Elevada porosidad a:	1. Concreto denso obtenido mediante:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevada absorción</li> <li>• Permeabilidad</li> <li>• Vacíos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Correcta dosificación de la mezcla</li> <li>• Contenido unitario de agua reducido</li> <li>• Mayor contenido de material cementicio.</li> <li>• Incorporación de aire</li> <li>• Compactación adecuada</li> <li>• Curado efectivo</li> </ul>
2. Fisuras y separaciones debido a:	2. Tensiones de tracción reducidas en el concreto atribuibles a:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración de tensiones</li> <li>• Choque térmico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de armadura de tracción de tamaño adecuado correctamente ubicada</li> <li>• Inclusión de puzolana (para reducir el aumento de la temperatura</li>   <li>• Colocación de materiales adecuados en las juntas de contracción</li> </ul>
3. Lixiviación y penetración de líquidos debido a:	3. Diseño estructural:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de líquidos</li> <li>• Formación de charcos</li> <li>• Presión hidráulica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizar las áreas de contacto y turbulencia</li> <li>• Proveer membranas y sistemas con barreras protectoras para reducir la penetración.</li> </ul>

Cuando el concreto se encuentra expuesto en ambientes marinos (figura 2.6), estos se identifican en varias zonas dependiendo a la distancia en que se encuentra la estructura de concreto con respecto al mar.

- **Zonas de atmósfera marina:** El concreto aquí nunca toca el agua. Por otro lado, la brisa marina y la niebla salina le aportan sal. A medida que se aleje del mar, el nivel de cloruro disminuirá. La sal puede viajar muchos kilómetros tierra adentro, dependiendo de las características de la costa y de los vientos dominantes.
- **Zonas de salpicaduras:** Por encima de la línea de marea alta, esta área está directamente mojada por el agua de mar de las olas y la espuma.
- **Zonas de mareas:** Entre la marea alta y la baja, se ubica esta zona. Todos los días, el concreto se sumergirá periódicamente.
- **Zona sumergida:** El área donde el concreto siempre está sumergido es el área debajo de la marea baja.
- **Zona enterrada:** Corresponde al fondo marino, donde no existen distinciones claras entre las zonas; púes, todos se superponen. (IECA, 2013)



**Figura 2.6 Tipos de exposición marina (IECA, 2013)**

### 2.1.7 Resistencia a la compresión del concreto

Se define como la capacidad del concreto para soportar una carga por unidad de área, está determinada por su resistencia a la compresión simple, que es su principal característica mecánica y se representa en  $\text{kg/cm}^2$ , MPa y Psi.

El (ACI 211.1-91, 2002) determina a través de la variación, relación agua/cemento las resistencia a la compresión simple del concreto, bajo las siguientes condiciones.

**Tabla 2.4 Resistencia a la compresión del concreto, relación agua/cemento.**

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua/cemento	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Además, el (ACI-318, 2019) determina los límites permisibles de la relación a/c para lograr la baja permeabilidad y durabilidad deseadas. Las especificaciones fundamentales de relación a/mc máxima, resistencia a la compresión mínima especificada y recubrimiento mínimo deben tenerse en cuenta para el hormigón de clase de exposición C2.

**Tabla 2.5 Requisitos para el concreto según la clase de exposición (ACI-318, 2019)**

Clase de Exposición	Relación a/c máxima [1][2]	f'c Mínimo MPA	Requisitos mínimos adicionales			Límites en los materiales cementantes
			Contenido de aire			
F0	N/A	17	N/A			N/A
F1	0.55	24	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			N/A
F2	0.45	31	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			N/A
F3	0.40 <sup>[3]</sup>	35 <sup>[2]</sup>	Tabla 19.3.3.1 para concreto o Tabla 19.3.3.3 para concreto lanzado			Aditivo cloruro de calcio
			Tipos de material cementante <sup>[4]</sup>			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150M	ASTM C 595M	ASTM C 1157M	
S0	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción

S1	0.50	28	II <sup>[5][6]</sup>	Tipos con designación (MS)	MS	Sin restricción	
S2	0.45	31	V <sup>[6]</sup>	Tipos con designación (HS)	HS	No se permite	
S3	Opción 1	0.45	31	Tipos con designación (MS)	Tipos con designación (HS) más puzolanas o cemento de escoria <sup>[7]</sup>	HS más puzolanas o cemento de escoria <sup>[7]</sup>	No se permite
	Opción 2	0.40	35	V <sup>[8]</sup>	Tipos con asignación (HS)	HS	No se permite
W0	N/A	17	Ninguna				
W1	N/A	17	26.4.2.2(d)				
W2	0.50	28	26.4.2.2(d)				
			<b>Contenido máximo de iones de cloruro (Cl<sup>-</sup>) soluble en agua en el concreto, porcentaje por masa de materiales cementantes <sup>[9][10]</sup></b>			<b>Requisitos adicionales</b>	
			<b>Concreto no preesforzado</b>	<b>Concreto preesforzado</b>			
C0	N/A	17	1.00	0.06	Ninguno		
C1	N/A	17	0.30	0.06			
C2	0.4	35	0.15	0.06	Recubrimiento de concreto <sup>[11]</sup>		

<sup>[1]</sup> La relación a/c se basa en todos los materiales cementantes y materiales cementantes suplementarios en la mezcla de concreto.

<sup>[2]</sup> Los límites de la relación a/c máxima no aplica a concreto liviano.

<sup>[9]</sup> La masa de materiales cementantes suplementarios utilizada para determinar el contenido de cloruros en el cemento no debe exceder la masa del cemento portland.

<sup>[10]</sup> Los criterios para determinación del contenido de cloruros se presentan en 26.4.2.2.

<sup>[11]</sup> El recubrimiento de concreto debe cumplir con 20.5



### 2.1.8 Recubrimiento de concreto especificado para agentes corrosivos

El (ACI-318, 2019) recomienda en condiciones de exposición extrema o en ambientes corrosivos el aumento del recubrimiento de concreto, para la prevención de la corrosión cuando el concreto este expuesto a cloruros.

**Tabla 2.6 Recubrimientos recomendados (ACI-318, 2019)**

Elemento estructural	Concreto	Recubrimiento recomendado
Muros y losas	Concreto liviano	≥ 50 mm
Otros miembros		≥ 65 mm
Muros y losas	Concreto prefabricado	≥ 40 mm
Otros miembros		≥ 50 mm

### 2.1.9 Inhibidores de corrosión.

Un inhibidor es una sustancia que, adicionada a un determinado medio reduce de manera significativa en el acero de refuerzo la corrosión, debido a la formación de una capa protectora sobre la superficie del acero, esta genera una disminución en la velocidad de las reacciones anódicas o catódicas que producen que los elementos corrosivos se paralizen, evitando que estos lleguen hasta el acero de refuerzo. (ACI 222R-01, 2001)

En función a la forma de actuar, existen tres tipos de inhibidores. (Pérez, 2010)

- **Inhibidores anódicos:** El más popular es el nitrito de calcio porque reduce la velocidad de reacción del ánodo, lo que garantiza la estabilidad de la capa pasiva, que es propensa a romperse en circunstancias específicas de corrosión. Con la ayuda de este aditivo, la corrosión del acero puede ocurrir a una tasa máxima del 5%.
- **Inhibidores catódicos:** Los más comunes tiene como base el hidróxido de sodio y carbonato de sodio, estos aditivos provocan una reducción en la reacción en el cátodo al ser absorbidos por la superficie del acero, pues actúan como barrera para la reducción del oxígeno.

- **Inhibidores mixtos:** Estos aditivos deben agregarse al agua de amasado, ya que funcionan en ambientes alcalinos como el concreto, pues actúan en las regiones del ánodo y el cátodo, brindando doble protección y formando una capa adsorbente fuertemente adherida sobre la superficie de la mezcla de acero. Las sustancias más utilizadas son el dicromato de potasio, el cloruro de estaño, el cromato de zinc o de plomo, el hipofosfito de calcio, el benzoato de sodio, la estilanilina y el nitrito de sodio y calcio, siendo estos últimos los más recomendados.

### 2.1.10 Leyes de difusión de Fick

La difusión del ion cloruro en los poros del concreto, llenos de agua da como resultado un aumento gradual de la concentración a lo largo del tiempo con respecto a la profundidad. Por ende, el coeficiente de difusión depende de la geometría de la estructura porosa.

Para un medio poroso saturado, la primera ley de difusión de Fick se describe a continuación:

$$J_e = D_e \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.1)$$

Donde:

Je: Flujo efectivo

De: Coeficiente de difusión efectivo.

La segunda ley de Fick analiza la difusión de cloruro en función al contenido de cloruros totales, este modelo es unidimensional, pues considera la concentración superficial del concreto y el coeficiente de difusión aparente como parámetros constantes, para la determinación del perfil de cloruro en un medio poroso saturado. (Khitab, 2005)

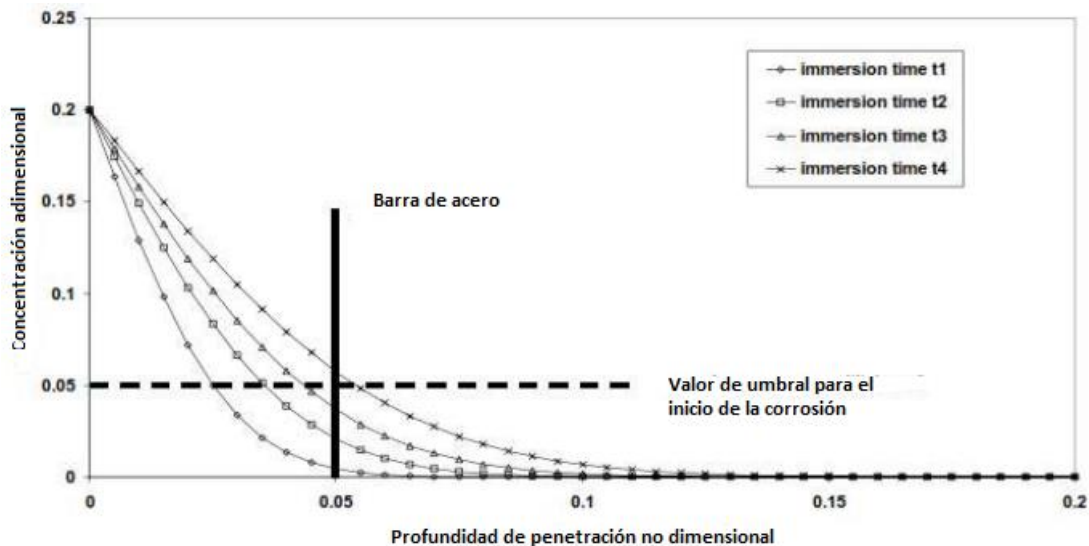
(2.2)

$$C = C_i + (C_s - C_i) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4D_a(t - t_{ex})}} \right)$$

Donde:

- C: Concentración total de cloruro.
- x: Profundidad desde la superficie expuesta.
- t: tiempo de exposición.
- C<sub>i</sub>: Concentración inicial de cloruro total.
- C<sub>s</sub>: Concentración total de cloruro en la superficie.
- t: Edad del material.
- t<sub>ex</sub>: Edad del material en la exposición.
- D<sub>a</sub>: Coeficiente aparente de difusión de cloruro.

Siempre que el concreto esté en contacto con una solución salina, presentes en ambientes costeros, los iones cloruro penetran en él. Esta penetración aumenta con el tiempo de exposición, como se puede apreciar en los perfiles de cloruro (Figura 2.7) obtenidos al final del tiempo (t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>, t<sub>3</sub> y t<sub>4</sub>), durante el cual una estructura imaginaria estuvo en contacto con una solución salina de exposición.



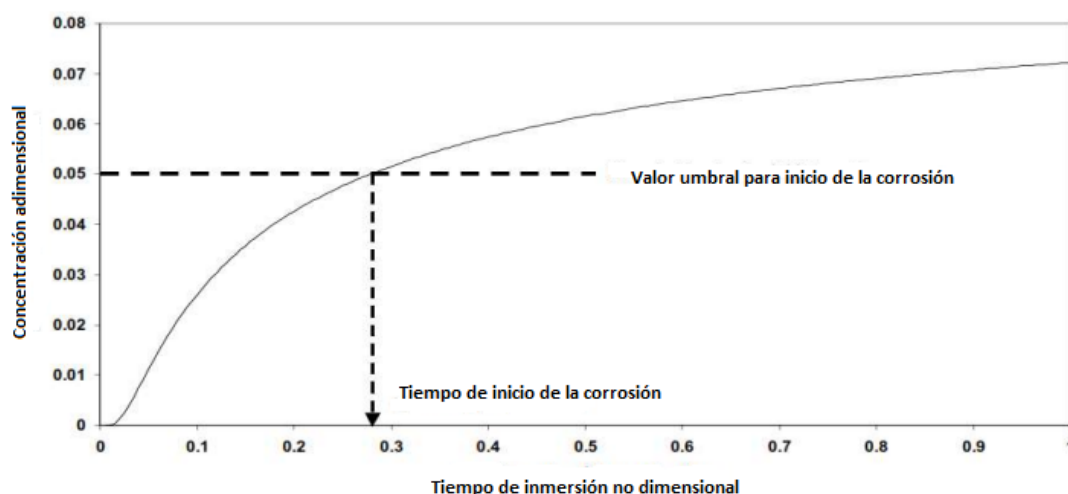
**Figura 2.7 Perfiles de cloruro en el concreto (Khitab, 2005)**

La concentración de cloruros en la barra de acero se incrementa con el aumento del período de inmersión hasta que se alcanza un tiempo en el que la concentración supera

un determinado valor umbral (0.05 por ejemplo), lo que induce el inicio de la corrosión de la barra de acero, este tiempo se alcanza entre los tiempos de inmersión,  $t_3$  y  $t_4$ .

Por lo tanto, utilizando esta técnica, se puede calcular la vida útil de una estructura de concreto, que está expuesta al ambiente costero, frente a la corrosión del refuerzo inducida por cloruro.

Otra demostración de esta técnica es presentar la concentración de cloruro directamente en la barra de acero en lugar de en función de la profundidad de penetración desde la superficie expuesta. Si las concentraciones de cloruro en las barras de acero son determinadas en varios períodos de inmersión, obtenemos lo que se muestra en la Figura 2.8.



**Figura 2.8 Predicción de la corrosión con penetración de cloruros en el concreto (Khitab, 2005)**

En esta figura se puede observar que la concentración de cloruro en la barra de acero supera el valor umbral de 0,05 en el momento de la inmersión, algo menos de 0,3. Por lo tanto, este tiempo corresponde al período de iniciación de la corrosión.

Los modelos basados en las leyes de Fick, toman en cuenta la penetración del ion cloruro a través de los materiales cementosos; es decir, se desprecia la influencia de otros iones en el transporte de cloruro.

### 2.1.11 Life – 365 Model

Este software, utiliza el modelo de la segunda ley de difusión de Fick.

$$\frac{dC}{dt} = D_a \frac{d^2C}{dx^2} \quad (2.3)$$

El coeficiente de difusión aparente de cloruro  $D_a$  es una función tanto del tiempo como de la temperatura, y el software utiliza la siguiente relación para tener en cuenta los cambios en la difusión que dependen del tiempo.

(2.4)

$$D_a(t) = D_{a,r} \left( \frac{t_r}{t} \right)^\sigma$$

Donde:

$D_a(t)$ : Coeficiente de difusión aparente

$t$ : Tiempo

$D_{a,r}$ : Coeficiente de difusión

$t_r$ : Tiempo de referencia (28 días en Life-365)

$\sigma$ : Constante (dependiendo de las proporciones de la mezcla).

El software selecciona valores de  $D_r$  y  $\sigma$  en función de los detalles del diseño de la mezcla de concreto. Además, el usuario puede introducir el valor del coeficiente de difusión aparente. Para evitar que el coeficiente de difusión disminuya indefinidamente con el tiempo, la ecuación solo es válida hasta 30 años. Más allá de este tiempo, se asume el valor constante durante el resto del período de análisis.

Además, en los cambios dependientes de la temperatura en difusión, el software Life-365 utiliza la siguiente ecuación.

$$D_a(T) = D_{a,r} \exp \left[ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.5)$$

Donde:

$D_a(T)$ : Coeficiente de difusión.

$D_{a,r}$ : Coeficiente de difusión.

$T_r$ : Temperatura de referencia.

$E_a$ : Energía de activación del proceso de difusión (35000J/mol).

$R$ : Constante de los gases.

$T$ : Temperatura absoluta.

En el modelo tr se refiere a 293K (20°C). La temperatura T del concreto varía con el tiempo según la ubicación geográfica seleccionada por el usuario. Si la ubicación requerida no se puede encontrar en la base de datos del modelo, el usuario puede ingresar los datos de temperatura necesarios.

La solución se lleva a cabo usando una implementación en diferencias finitas de la segunda ley de Fick; mientras que, para un caso base, donde el cemento Portland simple se considera sin protección especial contra la corrosión aplicada, el modelo asume los siguientes valores:

$$D_{28} = 10^{-12.06 + 2.40(a/cm)} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2.6)$$

Donde:

$m$ : 0.2

$C_{cr}$ : 0.05 (% masa de concreto), valor crítico de la concentración de cloruro para el inicio de la corrosión.

$D_{28}$ : Coeficiente de difusión a los 28 días

$a/cm$ : relación agua – material cementante

Las relaciones anteriores se basan en una base de datos de las pruebas de difusión realizadas en la Universidad de Toronto. El software Life-365 aplica un factor de reducción al valor de  $D_{PC}$  calculado para el cemento Portland, en función de la cantidad de humo de sílice (% SF) en el concreto. La relación es válida solo hasta un 15% de humo de sílice. El efecto del humo de sílice en  $C_{cr}$  o  $\sigma$  se desprecia en el modelo.

$$D_{SF} = D_{PC} \exp(-0.165SF) \quad (2.7)$$

El modelo modifica el valor de  $\sigma$  dependiendo de las cantidades de cenizas volantes (%FA) o escoria (%SG) según la siguiente ecuación, cuya relación es válida hasta niveles de reemplazo de 50% de cenizas volantes o 70% de escoria.

(2.8)

$$\sigma = 0.2 + 0.4 \left[ \frac{FA}{50} + \frac{SG}{70} \right]$$

El software Life-365, para la determinación de los perfiles de cloruro y el tiempo de corrosión, se hace necesario el ingreso de los siguientes datos:

1. Composición de la mezcla de concreto,
2. Ubicación geográfica,
3. Tipo de estructura (unidimensional o bidimensional),
4. Condiciones de exposición,
5. Profundidad de la cubierta de concreto a las barras de acero.

# CAPITULO 3

## 3.1 Metodología

### 3.1.1 Parámetros de estudio

La investigación se enfocó en predecir el tiempo de vida útil de las estructuras de concreto situadas en ambientes con cloruros, para ello a través de la revisión bibliográfica se estableció los parámetros de estudio para el análisis computacional con el software service life 365.

Se definió de la revisión bibliográfica, que de los estudios experimentales realizados en otras zonas de condiciones similares al Ecuador y obtenidos del perfil de concentraciones de cloruros, el contenido de cloruros existentes en el concreto para condiciones de la relación agua – cemento, temperatura y dimensiones del elemento requeridos para nuestro análisis.

### 3.1.2 Población de estudio.

Se realizó el análisis del edificio Txopituna y Blue Bay, ubicadas en la ciudad de Manta, provincia de Manabí y en la ciudad de Samborondón, Isla Mocoli, provincia de Guayas, respectivamente, los mismos que fueron definidos a través de la revisión bibliográfica realizada en estudios efectuados en el Ecuador.

De ellas se obtuvo el tipo y dimensiones de la estructura; así como, las propiedades mecánicas del concreto y acero de refuerzo.

### 3.1.3 Software Life 365

A través del uso del software Life 365 con licencia libre, descargado desde la página web (<http://www.life-365.org/>), se procedió con la identificación del proyecto, seleccionamos el tipo de estructura y dimensiones; así como, las condiciones económicas, de requerirse.



Se definió el número de alternativas, título y clasificaciones de estas alternativas que se examinaron y compararon, como es el Caso base y Alternativa1.

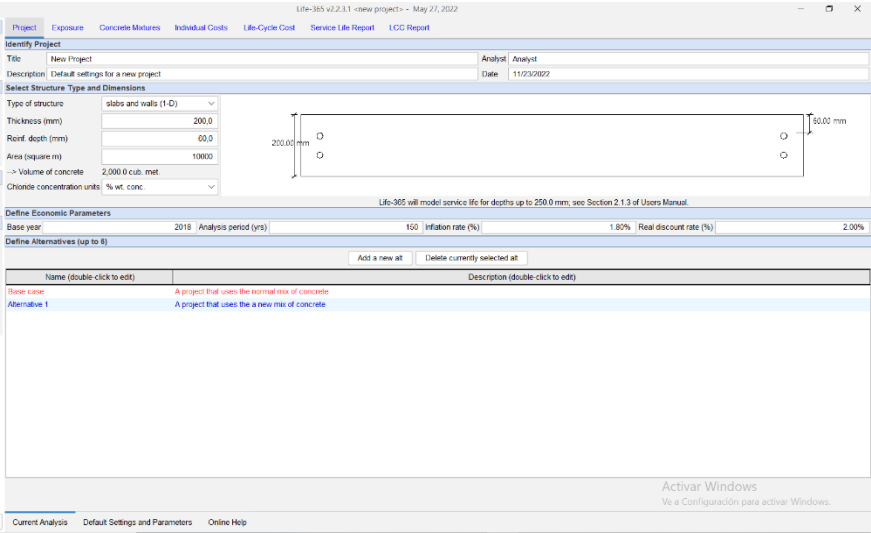


Figura 3.9 Pestaña proyecto

Para la exposición del concreto en el sitio de análisis, se ingresaron los datos de concentración de cloruros y temperaturas de forma manual, conforme las condiciones de nuestro estudio.

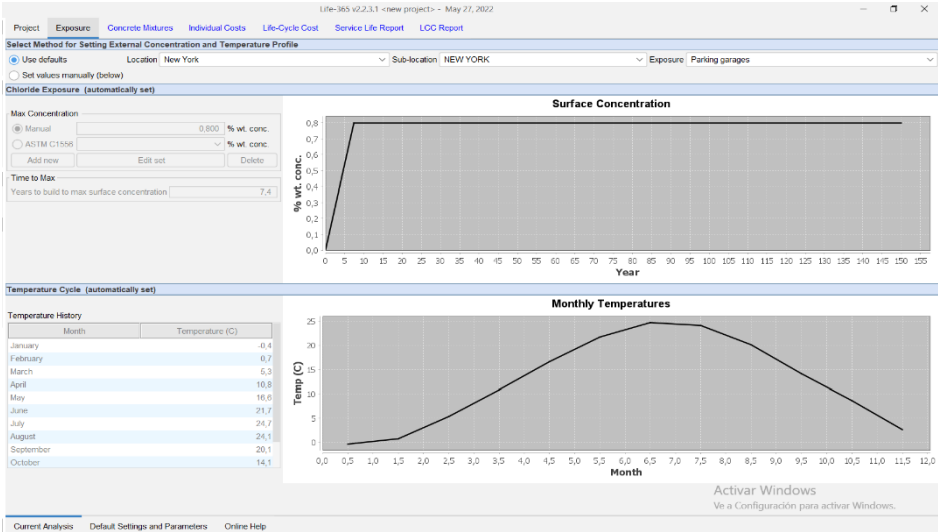


Figura 3.10 Pestaña exposición

Para la vida útil de la estructura, se estableció la mezcla de concreto y la protección contra la corrosión, para determinar la vida útil en términos del periodo de iniciación y propagación del componente.

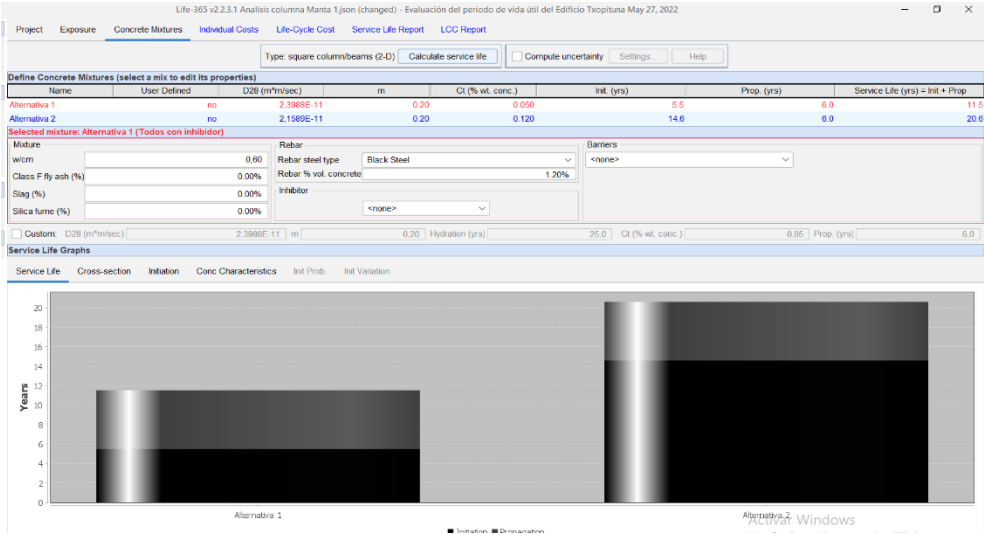


Figura 3.11 Pestaña de mezcla de concreto

En la pestaña iniciación del software, se graficó la concentración de cloruros en el punto de inicio y en la profundidad del acero de refuerzo..

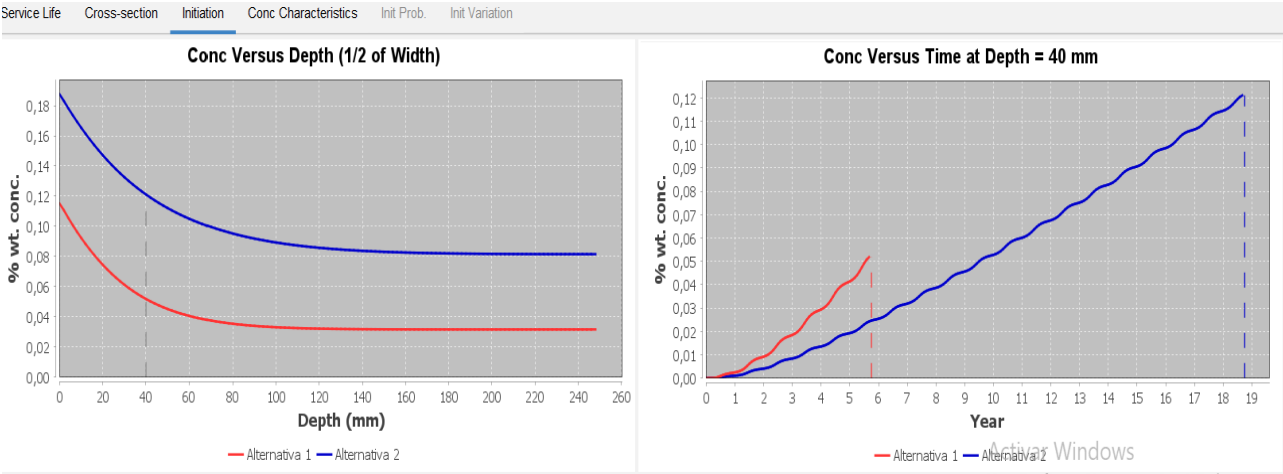


Figura 3.12 Gráficos de iniciación

Los dos diagramas obtenidos representan cómo la difusividad estimada del cloruro de concreto varía durante los periodos de iniciación, por la mezcla; y, la variación de las condiciones de la superficie del concreto durante el mismo tiempo.

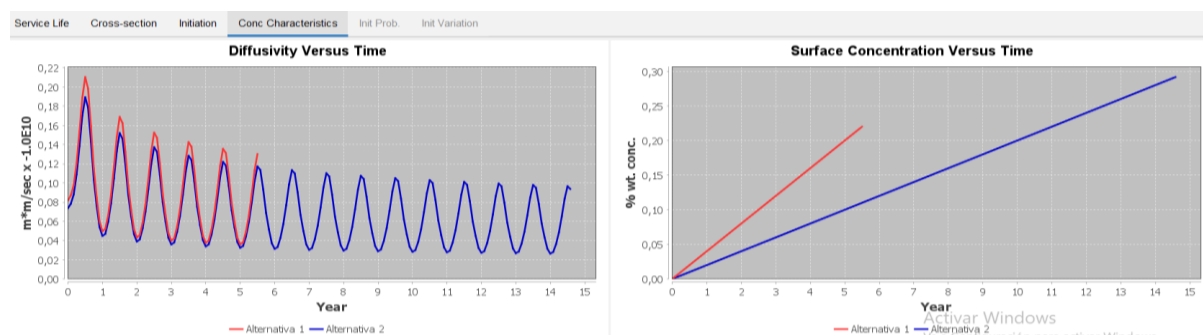


Figura 3.13 Pestaña características del concreto

### 3.1.4 Predicción del tiempo de servicio

Se obtuvieron los informes predefinidos del proyecto, que señalan los parámetros utilizados en este estudio para la predicción del tiempo de servicio, información relevante en la evaluación de la durabilidad de estructuras situadas en ambientes de cloruros.

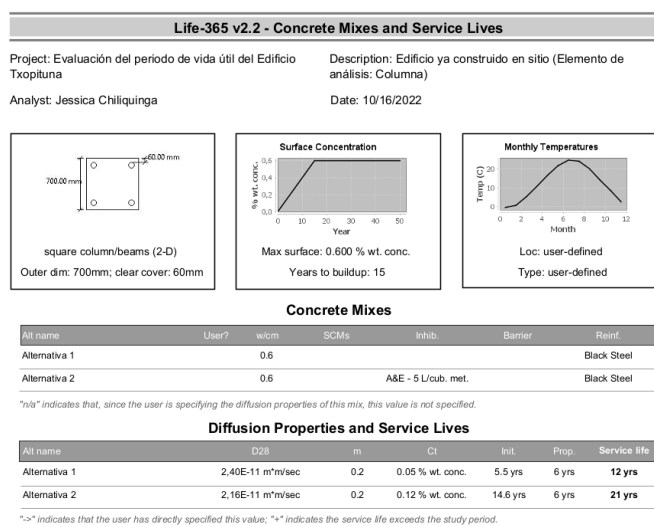


Figura 3.14 Informe de vida útil del proyecto

Con la reportes extraídos del software Life 365, se graficó la concentración de los cloruros con respecto al tiempo de servicio de las dos estructuras, que permitan establecer el grado de afectación de las mismas bajo la exposición a los cloruros.

# CAPÍTULO 4

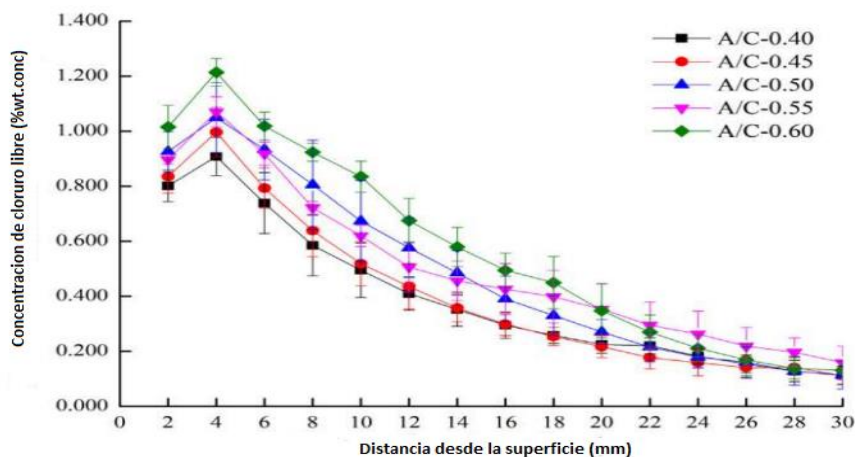
## 4.1 Resultados y discusión

### 4.1.1 Revisión Bibliográfica

(Zhang et al., 2018) a través de pruebas de exposición de campo de testigos cilíndricos, para una relación a/c de 0.40, cuya proporción de mezcla del concreto experimental se detallan en la tabla 4.7., en un ambiente natural de mareas, ubicada en la ciudad de Zhoushan, provincia de Zhejiang, China, donde la temperatura media anual y la salinidad media en esta zona es de unos 20 °C y 27‰, respectivamente. Se obtiene el perfil de concentraciones de cloruro en la probeta ensayada a 600 días para la relación a/c de 0.40, la misma que se encuentran graficada en la figura 4.15.

**Tabla 4.7 Proporción de mezcla de concreto experimental (Zhang et al., 2018)**

Relación a/c	A/B	Materiales (kg/m <sup>3</sup> )		
		Cemento	Agregado	Arena
0.40	0.40	475	1174	552

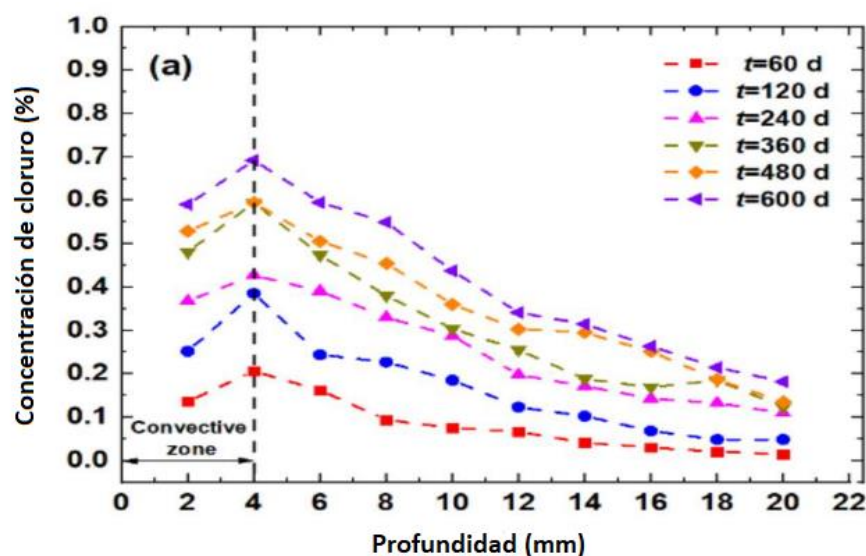


**Figura 4.15 Perfil de concentraciones de cloruros en el concreto a diferentes relaciones a/c. (Zhang et al., 2018)**

(Ju et al., 2022) con los ensayos realizados en laboratorio de probetas de concreto con una relación a/c de 0.40, cuya proporción de mezcla del concreto experimental se detallan en la tabla 4.8, para una temperatura ambiente y humedad relativa de 25°C y 70%, respectivamente. Se obtiene el perfil de concentraciones de cloruros en el concreto ensayado a 600 días para la relación a/c de 0.40, la misma que se encuentran graficada en la figura 4.15.

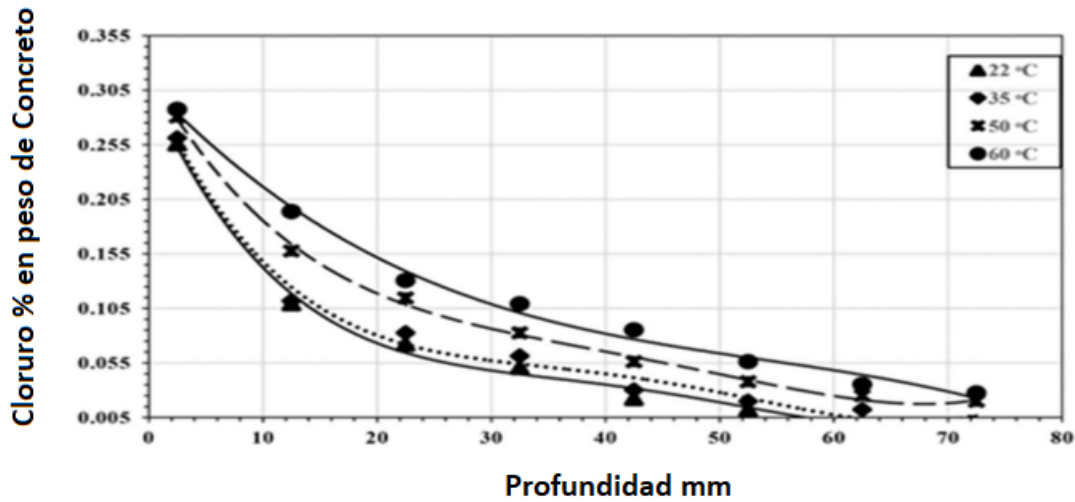
**Tabla 4.8 Proporción de mezcla de concreto experimental (Ju et al., 2022)**

Relación a/c	Materiales (kg/m <sup>3</sup> )			
	Agua	Cemento	Agregado	Arena
0.40	195	488	1116	601



**Figura 4.16 Perfil de concentraciones de cloruros en el concreto a diferentes tiempos de exposición, relación a/c=0.40. (Ju et al., 2022)**

(Alawi Al-Sodani et al., 2021) a través del estudio realizado, evaluaron la difusión de cloruro en concreto de cemento Tipo I bajo condiciones de campo y laboratorio. Las muestras de concreto de laboratorio fueron elaboradas con una relación a/c de 0.40 y expuestas a cuatro temperaturas (22, 35, 50 y 60°C) por 365 días, para la obtención del perfil de distribución de concentraciones de cloruros en el concreto de cemento tipo I.



**Figura 4.17 Perfil de distribución de concentraciones de cloruros en el concreto de cemento tipo I. (Alawi Al-Sodani et al., 2021)**

En el Ecuador, se ha identificado que el tiempo de servicio de estructuras de concreto en diversos casos de estudios realizados para la ciudad de Manta, provincia de Manabí, es de 13.6 años (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021), mientras que, para la ciudad de Samborondón, provincia de Guayas, el tiempo de servicio de la estructura es de 26.1 años (Hidalgo, 2016), como se identifica en la tabla 4.3.

**Tabla 4.9 Tiempo de servicio de la estructura (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021) & (Hidalgo, 2016).**

Proyecto	Edificio Txopituna	Edificio Blue Bay
Ubicación geográfica	Manta, Manabí	Samborondón, Guayas
Tipo de estructura	Square column/beams (2 -D)	Square column/beams (2 -D)
Ancho	<b>700 mm</b>	<b>60 cm</b>
Recubrimiento	<b>60 mm</b>	<b>3 cm</b>
Concentración superficial Cs (% wt. Conc.)	0.600	0.19
Relación a/mc	0.40	0.42
Tiempo de máxima concentración de cloruros (años)	15	50
Cantidad de aditivos minerales o inhibidores	Sin inhibidor	Sin inhibidor
Tiempo de servicio (años)	<b>13.6</b>	<b>26.1</b>

#### 4.1.2 Casos de estudios

Para el presente estudio se ha seleccionado dos casos de estudios de los ya establecidos en la revisión bibliográfica, con la finalidad de establecer el tiempo de servicio de dichas estructuras con la variación de las concentraciones de cloruros definidas en el estudio de (Zhang et al., 2018) por encontrarse en condiciones de temperatura similares a las zonas de estudio.

##### Caso 1. Edificio Txopituna

El edificio se encuentra ubicado en la ciudad de Manta, provincia de Manabí a una distancia aproximada de 800 m del perfil costanero (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021), cuya temperatura anual media se describe en la tabla 4.11.

**Tabla 4.10 Tiempo de servicio de la estructura, caso 1 (Guanoluisa & Tenempaguay, 2021)**

Proyecto	Edificio Txopituna
Ubicación geográfica	Manta, Manabí
Tipo de estructura	Square column (2 -D)
Ancho (mm)	<b>700</b>
Recubrimiento (mm)	<b>60</b>
Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	300
Relación a/mc	0.40

**Tabla 4.11 Registro temperatura media – Caso 1 (Climate Data, 2022)**

Mes	Temperatura °C
Enero	24.6
Febrero	24.9
Marzo	25.3
Abril	25.0
Mayo	24.4
Junio	23.5
Julio	23.1
Agosto	22.9
Septiembre	22.8
Octubre	22.9
Noviembre	23.2
Diciembre	23.9

## Caso 2. Edificio Blue Bay

Edificio ubicado en la Isla Mocoli, cantón Samborondón, provincia de Guayas a una distancia aproximada de 103.86 km del perfil costanero (Hidalgo, 2016), cuya temperatura media anual se establece en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12 Segundo caso de estudio (Hidalgo, 2016)**

Proyecto	Edificio
Ubicación geográfica	Samborondón, Guayas
Tipo de estructura	Square column (2 -D)
Ancho (mm)	<b>600</b>
Recubrimiento (mm)	<b>30</b>
Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	300
Relación a/mc	0.40

**Tabla 4.13 Registro temperatura media – Caso 2 (Weather Atlas, 2022)**

Mes	Temperatura °C
Enero	25.8
Febrero	25.7
Marzo	25.7
Abril	26.0
Mayo	25.4
Junio	25.0
Julio	25.0
Agosto	25.3
Septiembre	26.0
Octubre	26.1
Noviembre	26.3
Diciembre	26.5

### 4.1.3 Interpretación y análisis de resultados

#### Caso 1. Edificio Txopituna

**Tabla 4.14 Datos de ingreso – Caso 1**

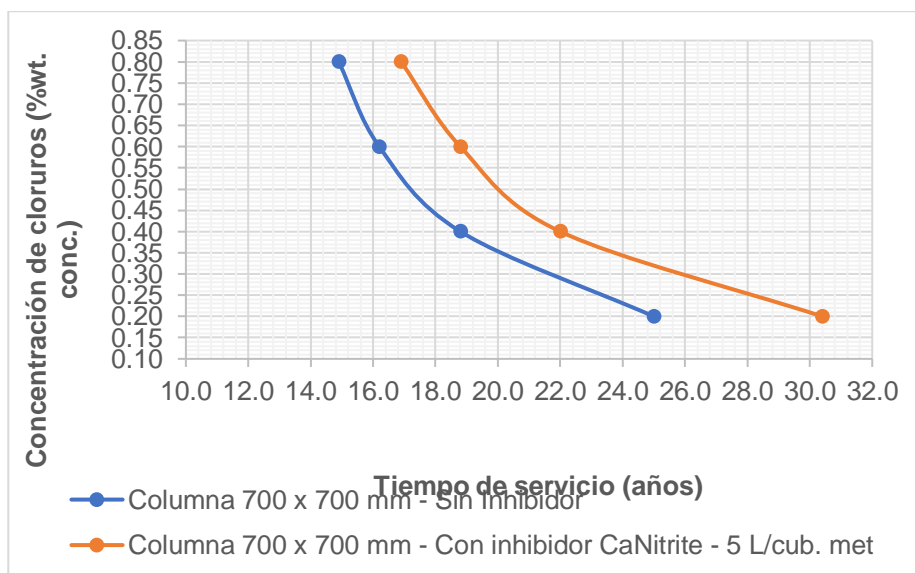
Proyecto	Edificio Txopituna
Ubicación geográfica	Manta, Manabí
Tipo de estructura	Square column (2 -D)
Ancho (mm)	<b>700</b>
Recubrimiento (mm)	<b>60</b>
Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	300
Relación a/mc	0.40



Tiempo de máxima concentración de cloruros (años)	25
---	----

**Tabla 4.15 Iteraciones variación concentración superficial – Caso 1**

Parámetro		Iteración 01	Iteración 02	Iteración 03	Iteración 04
Concentración superficial Cs (% wt. Conc.)		0.200	0.400	0.600	0.800
Distancia desde la superficie (mm)		23.8	12.5	8.0	5.5
Tiempo de servicio (años)	Sin inhibidor	25.0	18.8	16.2	14.9
Tiempo de servicio (años)	Con inhibidor Ca Nitrite - 5 L/cub. met	30.4	22.0	18.8	16.9

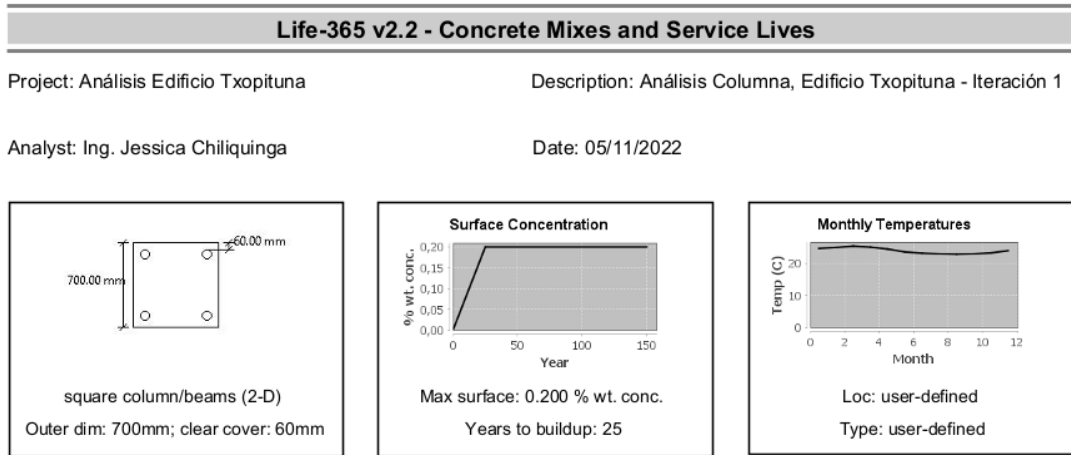


**Figura 4.18 Variación del Tiempo de servicio de la estructura – Caso 1.**

De los resultados se determina que el tiempo de servicio de una estructura de concreto va disminuyendo con respecto al incremento del porcentaje de concentración de cloruros, esto debido a que cuanto mayor sea esta concentración, más rápida será su velocidad de difusión del ion cloruro en el concreto. Sin embargo, con la utilización del inhibidor de corrosión su tiempo aumenta por la protección que brinda al acero de refuerzo ante la penetración del ion cloruro.

Del software Life 365, para una concentración del 0.200 %wt. conc., se determina que para una columna cuadrada sin inhibidor y con inhibidor de Ca Nitrite-5L/cub. met., el periodo de iniciación comienza a partir del año 19 y 24.4, respectivamente;

y, al considerar el periodo de propagación de 6 años, se establece un tiempo de servicio de 25.0 y 30.4 años, respectivamente, tiempo en el cual debe realizarse la primera reparación.



#### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

*"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.*

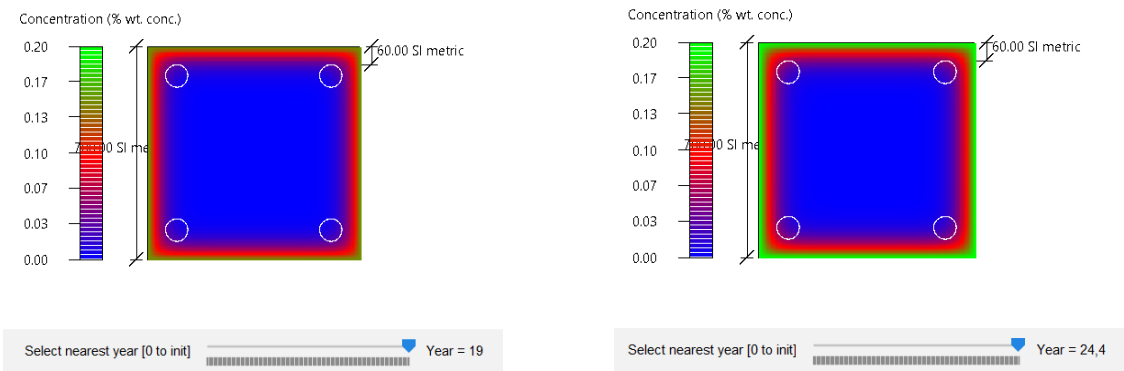
#### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	19 yrs	6 yrs	<b>25 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	24.4 yrs	6 yrs	<b>30.4 yrs</b>

*">" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.*

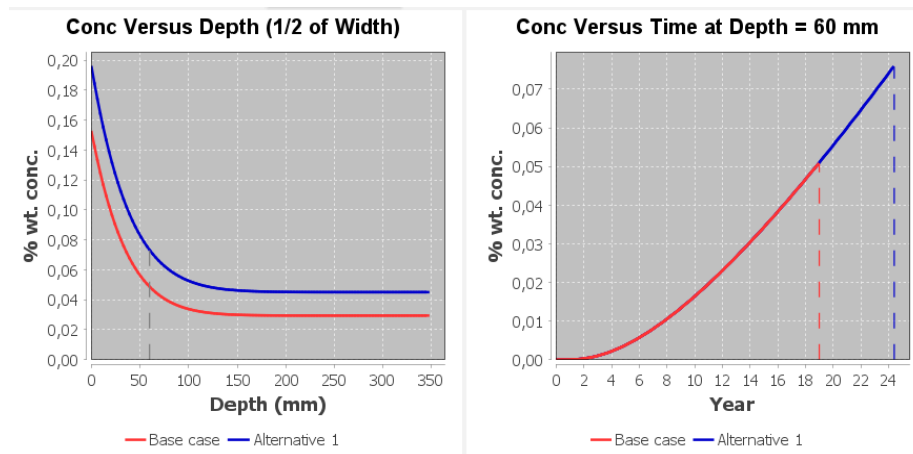
**Figura 4.19    Reporte tiempo de servicio Caso 1**

En la sección transversal del elemento sin inhibidor y con inhibidor de Ca Nitrite-5L/cub. met. (Fig. 4.19) muestra la concentración de cloruro de la mezcla de concreto en el punto de inicio de la corrosión, que para la figura del lado izquierdo es del 0.05% de peso de concreto y para el lado derecho es del 0.07 % de peso de concreto, respectivamente.



**Figura 4.20 Escala de concentración de cloruro de la mezcla de concreto sin inhibidor & con inhibidor, Caso 1**

La concentración de cloruros en el punto de iniciación del 0.05% de peso del concreto se da a una la profundidad de la barra de acero de refuerzo de 60 mm con un tiempo de iniciación de 19 años para una estructura sin inhibidor.



**Figura 4.21 Concentración de cloruros en el punto de inicio, por la parte inferior de la estructura. Caso 1**

## Caso 2. Edificio Blue Bay

Tabla 4.16 Datos de ingreso – Caso 2

Proyecto	Edificio Blue Bay
Ubicación geográfica	Samborondón, Guayas
Tipo de estructura	Square column (2 -D)
Ancho (mm)	600
Recubrimiento (mm)	30
Resistencia a la compresión del concreto (kg/cm <sup>2</sup> )	300
Relación a/mc	0.40
Tiempo de máxima concentración de cloruros (años)	25

Tabla 4.17 Iteraciones variación concentración superficial – Caso 2

Parámetro		Iteración 01	Iteración 02	Iteración 03	Iteración 04
Concentración superficial Cs (% wt. Conc.)		0.200	0.400	0.600	0.800
Distancia desde la superficie (mm)		23.8	12.5	8.0	5.5
Tiempo de servicio (años)	Sin inhibidor	16.9	12.7	11.1	10.2
Tiempo de servicio (años)	Con inhibidor Ca Nitrite - 5 L/cub. met	20.9	14.8	12.7	11.5

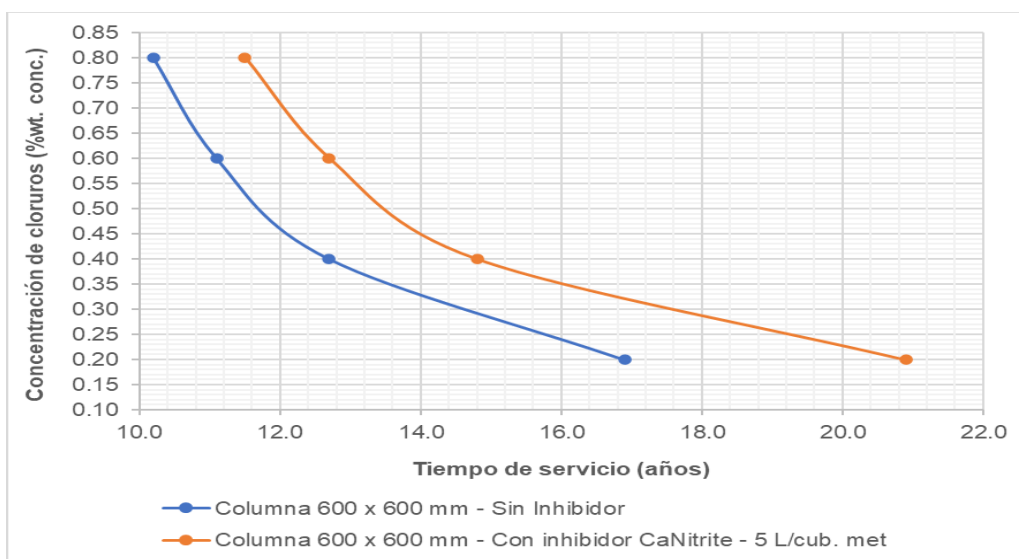
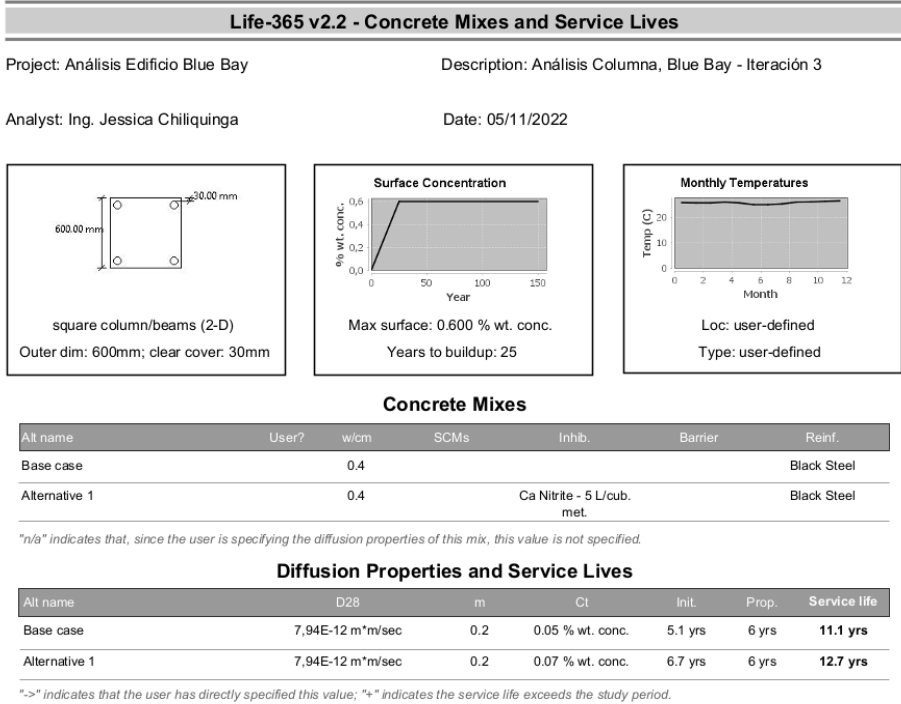


Figura 4.22 Variación del Tiempo de servicio de la estructura – Caso 2.

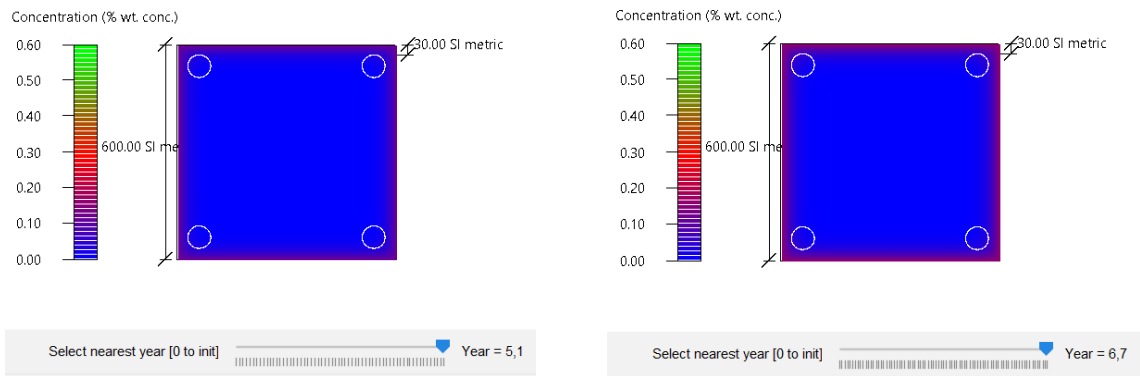
De los resultados se determina que el tiempo de servicio de una estructura de concreto va disminuyendo con respecto al incremento del porcentaje de concentración de cloruros. Sin embargo, con la utilización del inhibidor de corrosión su tiempo aumenta por la protección que brinda al acero de refuerzo ante la penetración del ion cloruro.

Del software Life 365, para una concentración del 0.600 %wt. conc., se determina que para una columna cuadra sin inhibidor y con inhibidor de Ca Nitrite-5L/cub. met., el periodo de iniciación comienza a partir de del año 5.1 y 6.7, respectivamente; y, al considerar el periodo de propagación de 6 años, se establece que el tiempo de servicio de la estructura es de 11.1 y 12.7 años, respectivamente.



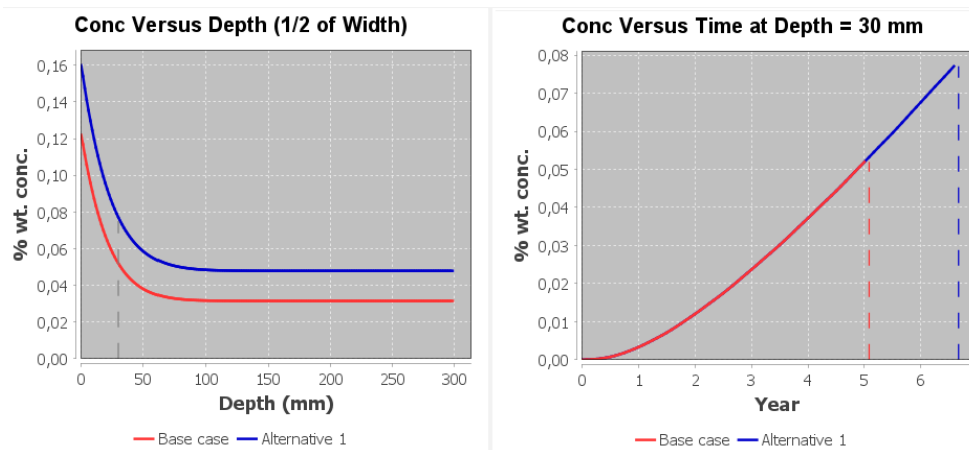
**Figura 4.23    Reporte tiempo de servicio Caso 2**

En la sección transversal del elemento sin inhibidor y con inhibidor de Ca Nitrite-5L/cub. met. (Fig. 4.24) muestra la concentración de cloruro de la mezcla de concreto en el punto de inicio de la corrosión, que para la figura del lado izquierdo es del 0.05% de peso de concreto y para el lado derecho es del 0.07 % de peso de concreto, respectivamente.



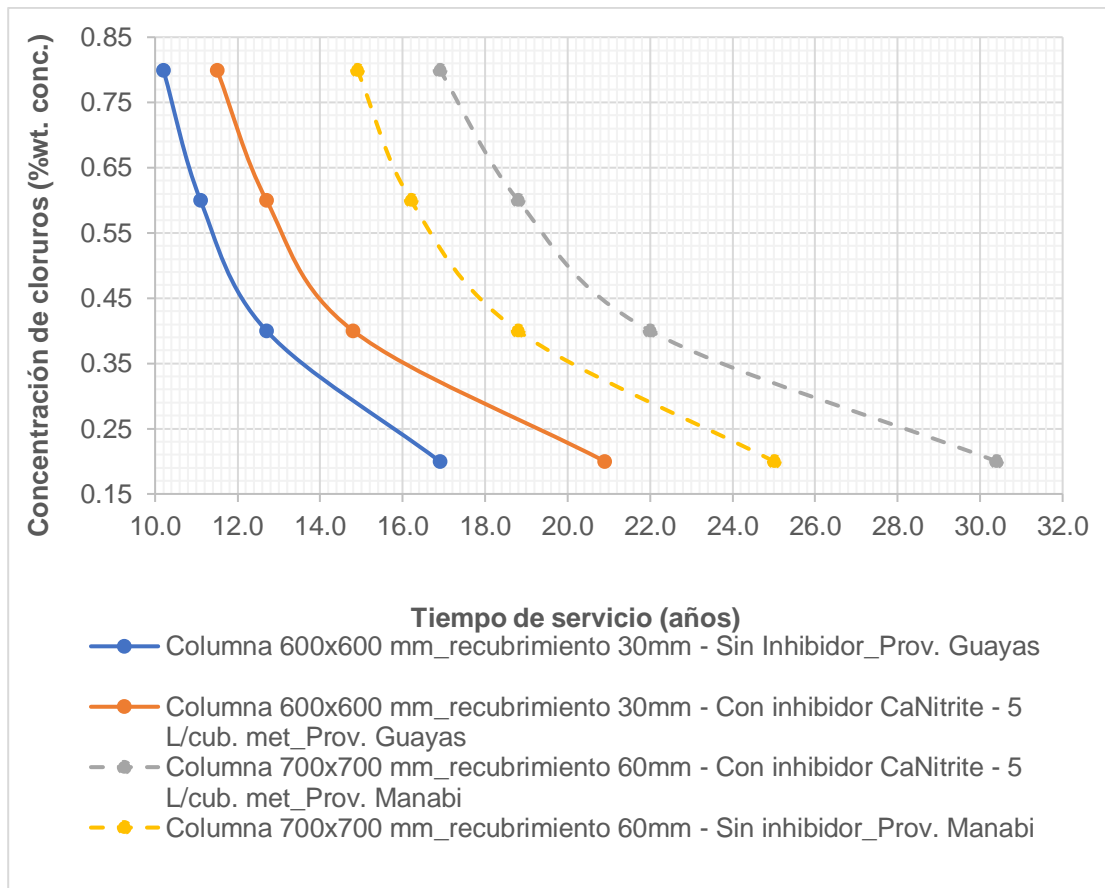
**Figura 4.24 Escala de concentración de cloruro de la mezcla de concreto sin inhibidor & con inhibidor, Caso 2**

La concentración de cloruros en el punto de iniciación del 0.05% de peso del concreto se da a una la profundidad de la barra de acero de refuerzo de 30 mm con un tiempo de iniciación de 10.9 años para una estructura sin inhibidor.



**Figura 4.25 Concentración de cloruros en el punto de inicio, por la parte inferior de la estructura. Caso 2**

Con el propósito de efectuar un análisis del tiempo de servicio con respecto a la ubicación del proyecto, la temperatura de cada zona y su distancia con el perfil costero, se efectua una comparación de los resultados obtenidos a través de los dos casos de estudio, misma que se encuentra representada en el siguiente grafico.



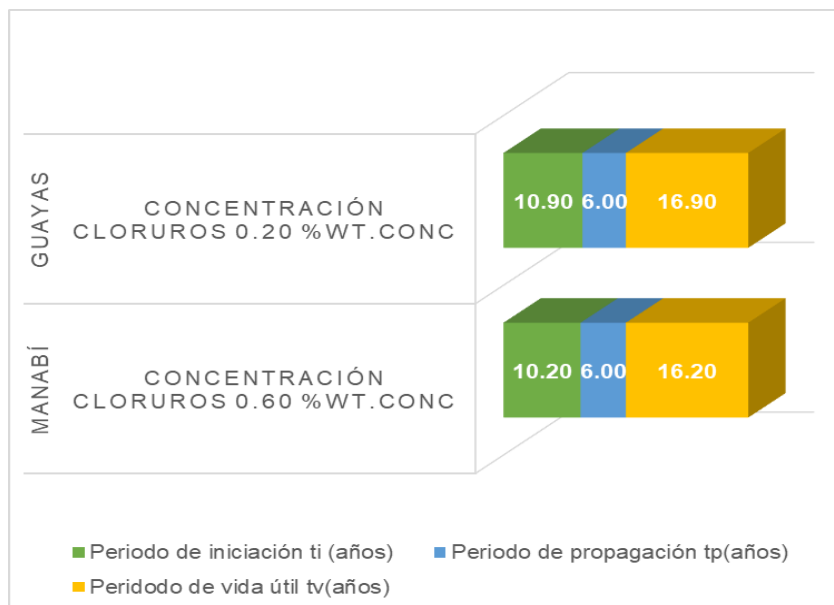
**Figura 4.26 Comparación del tiempo de servicio, según la ubicación del proyecto.**

La estructura ubicada en la ciudad de Manta, provincia de Manabí, presenta mayor tiempo de servicio con la variación de concentraciones superficiales del ión cloruro de 0.20 a 0.60 %wt. conc., debido a que la profundidad de ingreso de los cloruros es mayor (60 mm) con respecto a la estructura ubicada en la isla Mocoli, provincia de Guayas, generando mayor tiempo para producir la despasivación de acero de refuerzo y su corrosión.

Tomando en cuenta la ubicación de los proyectos, definimos el porcentaje de concentración de iones cloruros con respecto a la distanciancia existente al perfil costanero ecuatoriano, obteniendo el tiempo de servicio de la estructura en la tabla 4.18.

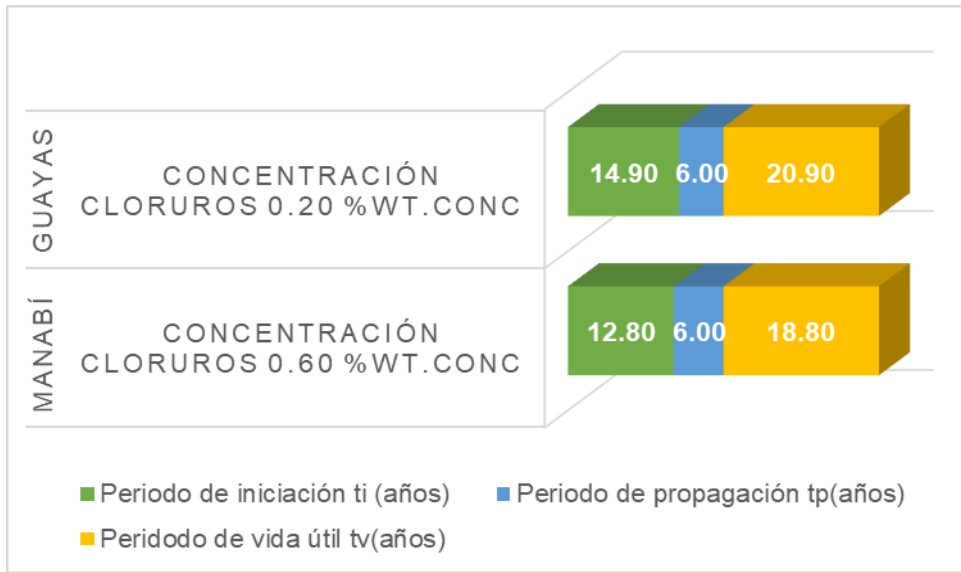
**Tabla 4.18 Tiempo de iniciación y vida útil de la estructura**

Ubicación	tipo	Concentración superficial Cs (% wt. Conc.)	Periodo de iniciación ti (años)	Periodo de propagación tp (años)	Periodo de vida útil tv (años)
Manabí	Concreto base	0.600	10.2	6	16.2
	Nitrito de calcio		12.8	6	18.8
Guayas	Concreto base	0.200	10.9	6	16.9
	Nitrito de calcio		14.9	6	20.9

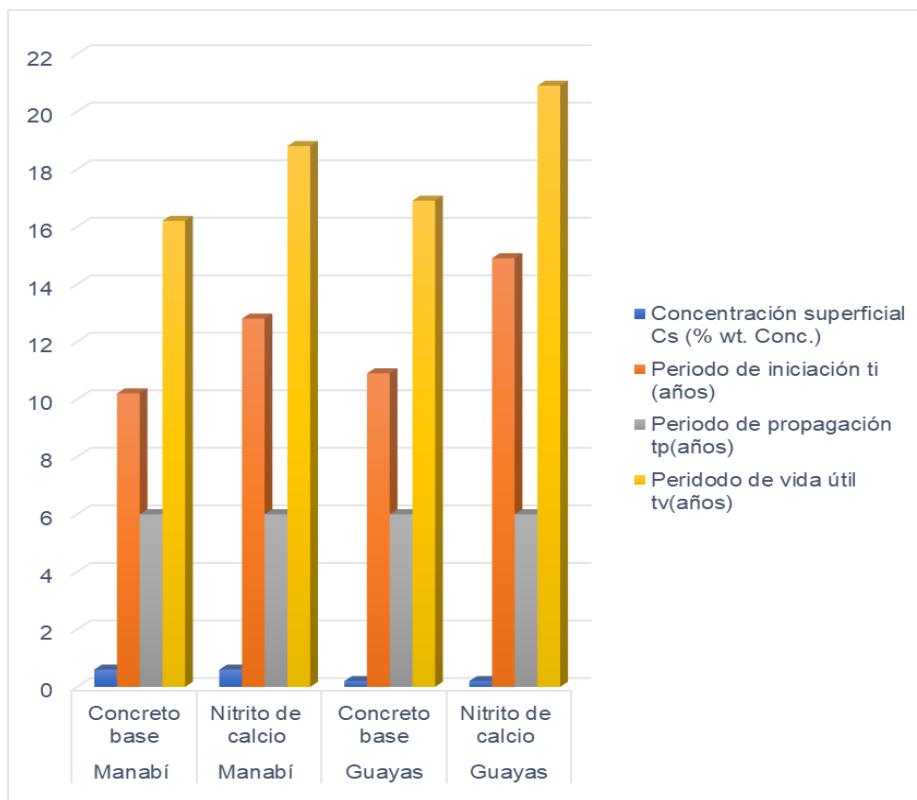


**Figura 4.27 Comparación tiempo de servicio, concreto base.**





**Figura 4.28 Comparación tiempo de servicio, concreto con nitrito de calcio.**



**Figura 4.29 Comparación del tiempo de servicio a 0.20 y 0.60 %wt. conc.**

Las estructuras definidas en el caso de estudio, en un periodo promedio de 16.55 años deberan ser intervenidas para su reparación que permita precautelar la durabilidad de dichas estructuras y por ende, ampliar su tiempo de servicio.

# CAPÍTULO 5

## 5.1 Conclusiones y Recomendaciones

- La penetración del ion cloruro en el concreto es un proceso muy complejo, influyendo su difusión, succión capilar y proceso de permeabilidad.
- El ingreso de cloruros en el concreto genera un proceso de deterioro de las estructuras de concreto afectando su resistencia y, por ende, disminuyendo su durabilidad y el tiempo de servicio.
- La identificación del tiempo de servicio oportuna de las estructuras a través del software Life 365, permite la intervención en la misma para la reparación necesaria que permita un mayor periodo del tiempo de servicio; además, de la consideración de productos anticorrosivos o inhibidores de corrosión a aplicarse en las barras de acero de refuerzo del concreto, que incrementan su tiempo de servicio y durabilidad de las estructuras.
- Las condiciones de ubicación geográfica de las estructuras, así como la relación a/c, la concentración de cloruros con respecto al porcentaje de peso del concreto (% wt. Conc.), el recubrimiento y la utilización de los inhibidores de corrosión, definen la variación del tiempo de servicio de las estructuras.
- Las estructuras de concreto que se ubican cerca del perfil costero ecuatoriano, cuya concentración de cloruros es mayor a una menor profundidad de la superficie del concreto, su tiempo de vida útil es menor con respecto a las estructuras más alejadas de la zona costera.
- Las estructuras de concreto a una relación a/c de 0.40 con una resistencia de 300 kg/cm<sup>2</sup>, definidas a concentraciones de cloruros de 0.60 y 0.20 %wt. Conc. en zonas ubicadas en el perfil costero y alejadas de este, respectivamente, presentan un tiempo de vida útil promedio de 16.55 años, a partir del cual debe efectuarse su primera reparación para evitar el deterioro de estas estructuras.
- El porcentaje de concentración de iones cloruros crítico para el inicio de la corrosión de acero de refuerzo de las estructuras en estudio es del 0.05% wt. Conc. y con un coeficiente de difusión de  $7.94 \text{ E-}12 \text{ m}^2/\text{sec}$ .
- Es importante establecer procedimientos de mantenimiento y reparación en todas las estructuras de concreto, más aún en aquellas que se ubican en zonas

costeras, donde la exposición a iones cloruros es mayor, con la finalidad de preservar la durabilidad y funcionalidad de dicha estructura.

- En el Ecuador no existe datos de los perfiles de concentración de cloruros que permita establecer registros de la afectación por cloruros en la estructura de concreto y el tiempo de servicio de estas, pues a través de ello se podrá definir recursos económicos para planes de mantenimiento preventivo o correctivo que permitan preservar las estructuras.

# BIBLIOGRAFIA

- ACI-318. (2019). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. In *American Concrete Institute*.
- ACI 201.2R-01, & O, R. C. (2001). *Guía para la Durabilidad del Hormigón Informado por el Comité ACI 201*.
- ACI 211.1-91. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*.
- ACI 222R-01. (2001). Protection of Metals in Concrete Against Corrosion. *Aci 222R-01*, 1–41.
- Alawi Al-Sodani, K. A., Al-Zahrani, M. M., Maslehuddin, M., Baghabra Al-Amoudi, O. S., & Al-Dulaijan, S. U. (2021). Chloride diffusion models for Type I and fly ash cement concrete exposed to field and laboratory conditions. *Marine Structures*, 76(September 2019), 102900. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102900>
- Andrade, C. (2018). Some historical notes on the research in corrosion of reinforcement. *Hormigón y Acero*, 69, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2018.12.002>
- Climate Data. (2022). *Clima Manta (Ecuador)*. Climate Data. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-manabi/manta-764127/>
- Cordero, M. (2005). *Estudio de la vida útil de estructuras de hormigón pretensado frente a corrosión por cloruros*. 244.
- Del Valle, A., Pérez, T., & Martínez, M. (2001). El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. In *Secretaria de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte* (Issue 182).
- Feliu, S., & Andrade, C. (1989). Manual Inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- González, J. E. (2014). *Modelos De Penetración Del Ión Cloruro Orientados a La Predicción De La Vida Útil De Las Estructuras De Concreto*. 156. <http://www.bdigital.unal.edu.co/46257/>
- Guanoluisa, J., & Tenempaguay, A. (2021). *Modelado y simulación del impacto de usos de inhibidores de corrosión en elementos de hormigón armado*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Hidalgo, F. J. (2016). INHIBIDORES DE CORROSION Y SU IMPACTO SOBRE LA DURABILIDAD EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMINGON ARMADO. In

UNIVERSIDAD ESPIRITU SANTO.

IECA. (2013). *Hormigón en ambiente marino*. 5–6.

Ju, X., Wu, L., Liu, M., Jiang, H., & Zhang, W. (2022). Modelling of Chloride Concentration Profiles in Concrete by the Consideration of Concrete Material Factors under Marine Tidal Environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/jmse10070917>

Khitab, A. (2005). *Modélisation des transferts ioniques dans les milieux poreux saturés: application à la pénétration des chlorures à travers les matériaux cimentaires*. September 2005, 231.

Life-365™ Consortium III. (2020). *Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Cost of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*. [http://www.life-365.org/download/Life-365\\_v2.2.3\\_Users\\_Manual.pdf](http://www.life-365.org/download/Life-365_v2.2.3_Users_Manual.pdf)

Moreno, S. H. (2010). *Determinación De La Profundidad De Carbonatación Y Penetración De Cloruros Mediante Experimentación Empleando Procesos De Difusión Térmica En Varios Diseños De Hormigón*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Ossorio, A., & Lorenzo, R. (2014). Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. *Revista Facultad de Ingeniería*, 72, 161–172.

Perdomo, H. A. (2011). *Durabilidad Del Hormigón Armado Frente al Ion Cloruro en las Zonas Costeras*. Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña.

Pereira, D. (2016). *Modelación del transporte de cloruros en estructuras de concreto: análisis unidimensional y efecto de borde*. Universidad del Norte.

Pérez, L. R. (2010). *Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectados por corrosión*. Universidad Politécnica de Madrid.

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. LUND UNIVERSITY.

Weather Atlas. (2022). *Clima y previsión metereológica Samborondón, Ecuador*. Weather Atlas. <https://www.weather-atlas.com/es/ecuador/samborondon-clima>

Yang, D. H., Li, G. P., Yi, T. H., & Li, H. N. (2016). A performance-based service life design method for reinforced concrete structures under chloride environment. *Construction and Building Materials*, 124, 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.127>

Zhang, J., Zhao, J., Zhang, Y., Gao, Y., & Zheng, Y. (2018). Instantaneous chloride

diffusion coefficient and its time dependency of concrete exposed to a marine tidal environment. *Construction and Building Materials*, 167, 225–234.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.107>

# **ANEXOS**

## ITERACIONES CASO DE ESTUDIO 1



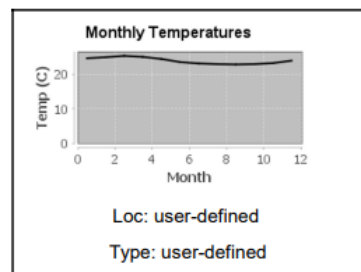
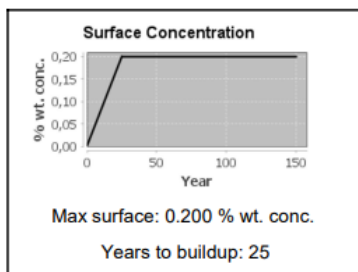
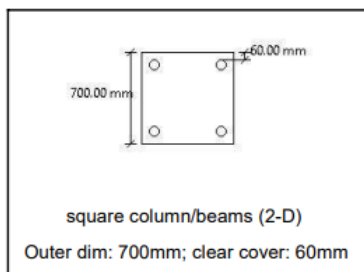
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Txopituna

Description: Análisis Columna, Edificio Txopituna - Iteración 1

Analyst: Ing. Jessica Chilingua

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	19 yrs	6 yrs	<b>25 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	24.4 yrs	6 yrs	<b>30.4 yrs</b>

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

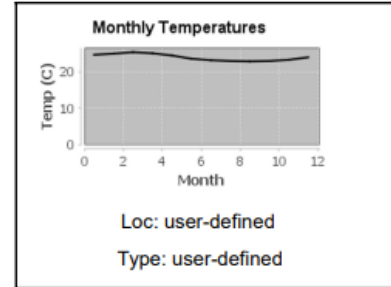
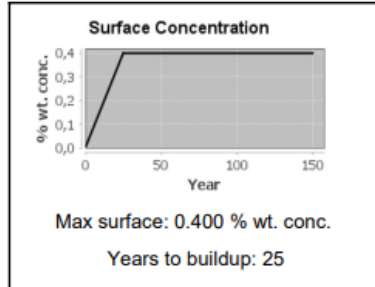
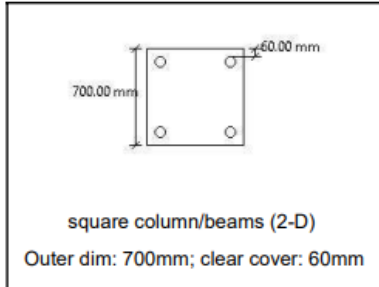
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Txopituna

Description: Análisis Columna, Edificio Txopituna - Iteración 2

Analyst: Ing. Jessica Chilingua

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	12.8 yrs	6 yrs	<b>18.8 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	16 yrs	6 yrs	<b>22 yrs</b>

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

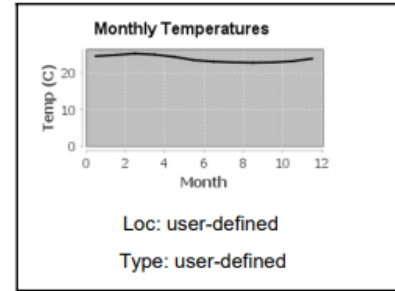
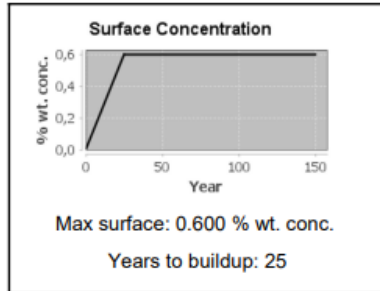
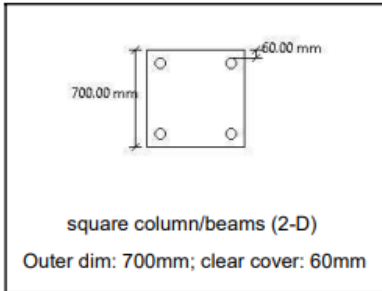
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Txopituna

Description: Análisis Columna, Edificio Txopituna - Iteración 3

Analyst: Ing. Jessica Chilingua

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

*"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.*

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	10.2 yrs	6 yrs	<b>16.2 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	12.8 yrs	6 yrs	<b>18.8 yrs</b>

*"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.*

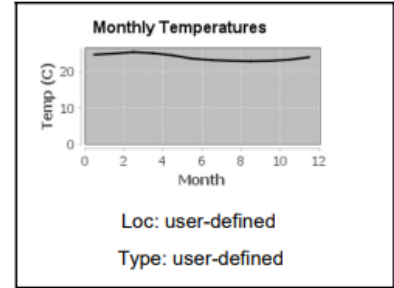
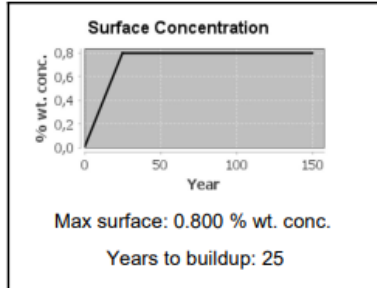
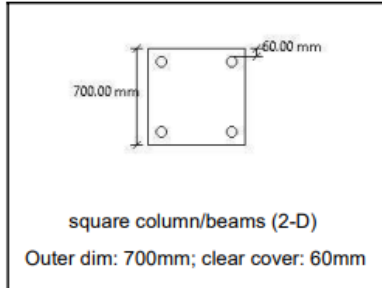
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Txopituna

Description: Análisis Columna, Edificio Txopituna - Iteración 4

Analyst: Ing. Jessica Chiliquinga

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Cl	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	8.9 yrs	6 yrs	<b>14.9 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m <sup>2</sup> /m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	10.9 yrs	6 yrs	<b>16.9 yrs</b>

">" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

## ITERACIONES CASO DE ESTUDIO 2

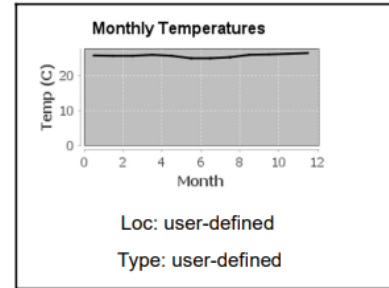
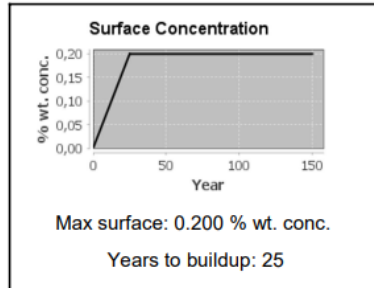
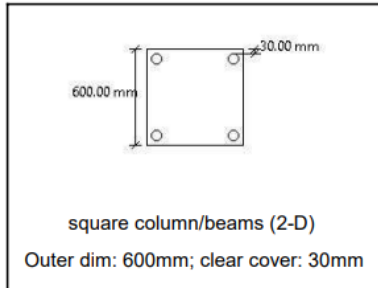
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Blue Bay

Description: Análisis Columna, Blue Bay - Iteración 1

Analyst: Ing. Jessica Chilinguina

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m*m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	10.9 yrs	6 yrs	<b>16.9 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m*m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	14.9 yrs	6 yrs	<b>20.9 yrs</b>

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

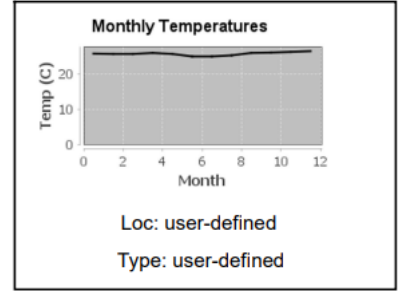
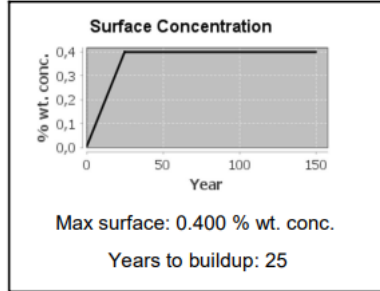
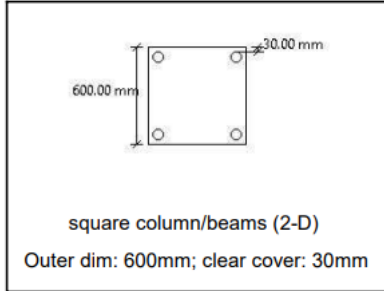
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Blue Bay

Description: Análisis Columna, Blue Bay - Iteración 2

Analyst: Ing. Jessica Chiliquinga

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m*m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	6.7 yrs	6 yrs	<b>12.7 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m*m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	8.8 yrs	6 yrs	<b>14.8 yrs</b>

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

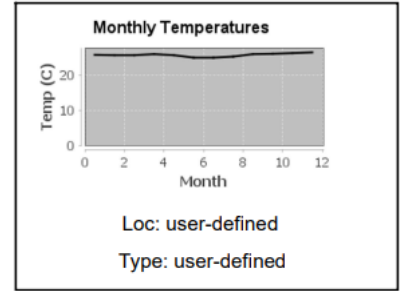
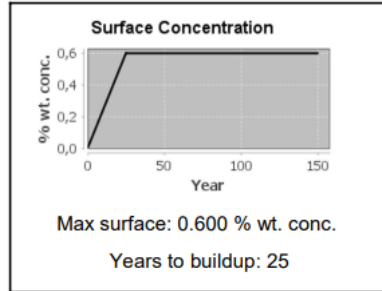
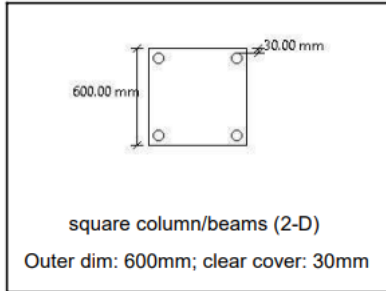
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Blue Bay

Description: Análisis Columna, Blue Bay - Iteración 3

Analyst: Ing. Jessica Chilingua

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m <sup>2</sup> /sec	0.2	0.05 % wt. conc.	5.1 yrs	6 yrs	<b>11.1 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m <sup>2</sup> /sec	0.2	0.07 % wt. conc.	6.7 yrs	6 yrs	<b>12.7 yrs</b>

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.



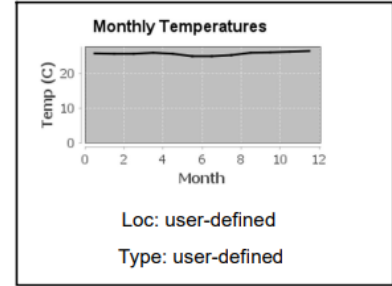
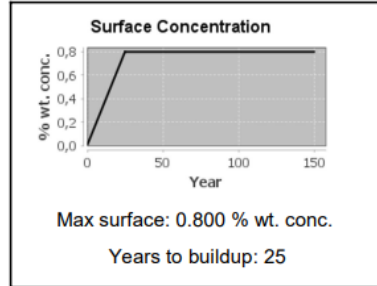
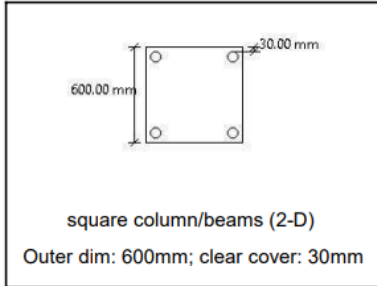
## Life-365 v2.2 - Concrete Mixes and Service Lives

Project: Análisis Edificio Blue Bay

Description: Análisis Columna, Blue Bay - Iteración 4

Analyst: Ing. Jessica Chilibingua

Date: 05/11/2022



### Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Base case		0.4				Black Steel
Alternative 1		0.4		Ca Nitrite - 5 L/cub. met.		Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

### Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Ct	Init.	Prop.	Service life
Base case	7,94E-12 m*m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	4.2 yrs	6 yrs	<b>10.2 yrs</b>
Alternative 1	7,94E-12 m*m/sec	0.2	0.07 % wt. conc.	5.5 yrs	6 yrs	<b>11.5 yrs</b>

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

## **TUTORIAL USO SOFTWARE SERVICE LIFE – 365**

**Enlace:**

**<https://ingciviljessicachi.wixsite.com/tutorial-software-se>**