



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE
DETECCIÓN Y PREVENCIÓN DE
PATOLOGÍAS EN SISTEMAS
ESTRUCTURALES UTILIZADOS EN
LA INFRAESTRUCTURA URBANA E
INDUSTRIAL**

Autor:

Toro Romero Manuel Alejandro

C.I.: 25.455.016

Urb. Yuma II, calle N° 3, San Diego, Edo Carabobo
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 8712394



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y PREVENCIÓN DE
PATOLOGIAS EN SISTEMAS ESTRUCTURALES UTILIZADOS EN LA
INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autor: Toro, Manuel

C.I. 25.455.016

Tutor: Ing. Donato Romanello

San Diego, Junio de 2019



Universidad José Antonio Páez
Facultad de Ingeniería

FI-M-009-2019-1CE

Valencia, 22 de Abril de 2019.

Ciudadano:
Manuel Toro
C.I:25.455.016
Presente.-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 22-04-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y PREVENCIÓN DE PATOLOGÍAS EN SISTEMAS ESTRUCTURALES UTILIZADOS EN LA INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL** Presentado por usted como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello, C.I:4.131.878 y la Ing. Alicia de Pizzella, C.I: 4.598.880 como Tutores Académicos que lo asesorarán en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira
Decano de la Facultad de Ingeniería



c. c. Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

LILR.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello. Portador de la cédula de identidad N° 4.131.877, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Manuel Alejandro Toro Romero, cédula de identidad N° 25.455.016, titulado "DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y PREVENCIÓN DE PATOLOGÍAS EN SISTEMAS ESTRUCTURALES UTILIZADOS EN LA INFRAESTRUTURA URBANA E INDUSTRIAL" presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los trece días del mes de mayo del año dos mil diecinueve.

Ing. Donato Romanello.

C.I.: 4.131.878

Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por siempre querer lo mejor para mí, a mi compañera Arianny Ynfante con su apoyo incondicional y a todas aquellas personas que estuvieron ahí apoyándome de alguna u otra forma y que aportaron su granito de arena, a cada uno de los profesores que me brindaron todos los conocimientos que he adquirido a lo largo de este viaje

INDICE GENERAL

CONTENIDO	pp.
ÍNDICE DE FIGURA	viii
ÍNDICE DE TABLA	ix
RESUMEN	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Formulación del problema	5
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Justificación de la investigación	5
1.5 Alcance	6
II MARCO TEÓRICO	
2.1 Antecedentes de la investigación	7
2.2 Bases teóricas	9
2.2.1 Durabilidad	9
2.2.2 Patología Estructural	12
2.2.3 Patología del Concreto estructural	12
2.2.3.1 Clasificación de las patologías según la etapa del proyecto	12
2.2.3.2 Patologías durante la etapa de diseño	13

2.2.3.3	Patologías durante la etapa de construcción	14
2.2.3.4	Patologías durante el periodo de operación	15
2.2.4	Clasificación de las patologías según el origen del agente causante	16
2.2.4.1	Agentes Externos	17
2.2.4.2	Agentes Internos	40
2.2.5	Simulación de COMSOL Multiphysics	43
2.2.5.1	Funciones e interfaces para la corrosión en COMSOL Multiphysics	44
2.2.5.2	Optimización de los sistemas de protección a la corrosión	45
2.3	Definición de términos	45
III MARCO METODOLOGICO		
3.1	Tipo de investigación	47
3.2	Nivel de investigación	47
3.3	Diseño de la investigación	48
3.4	Población y Muestra	49
3.5	Técnica e instrumentos de recolección de datos	49
3.6	Fases de la investigación	50
IV RESULTADOS		
4.1	Detección de las Patologías	52
4.2	Simulación de la Patología	57
4.3	Sistema de Prevención Para la Etapa de Diseño	65
4.4	Simulación en Condiciones Favorables	71
CONCLUSIONES		76
RECOMENDACIONES		78
BIBLIOGRAFÍA		96

INDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	pp
FIGURAS	
1 Ley de evolución de costos (Ley de Sitter)	12
2 Clasificación de patologías según etapa de origen	13
3 Clasificación de patologías según el origen del agente causante	17
4 Esquema de deterioro del concreto causado por los ácidos	18
5 Ácidos y sustancias comunes perjudiciales para el concreto	19
6 Esquema de deterioro causado por la corrosión	22
7 Ejemplo de corrosión galvánica en el concreto	23
8 Actividad de los metales	25
9 Esquema de deterioro en concreto causado por el ataque de sulfatos	26
10 Esquema de deterioro causado por la carbonatación	28
11 Esquema de grietas estructurales y características	30
12 Esquema de deterioro causado por cambios de humedad	34
13 Esquema de deterioro causado por ciclos de hielo y deshielo	36
14 Esquema Temperatura, color y daño en el concreto por incendio	37
15 Microorganismos y acciones sobre el concreto	39
16 Algunos agregados y minerales potencialmente reactivos	40
17 Esquema de deterioro causado por la RAA	41
18 Esquema de contracción por secado en el concreto	44
19 Ubicación Geográfica Estado Falcón	53
20 Fenómeno electroquímico de la corrosión por iones de cloruro	58
21 Efectos de la carbonatación y corrosión por ion Cl	59
22 Corrosión en estructuras de concreto armado	61
23 Simulaciones de corrosión superficial de columna	62
24 Simulación de corrosión de columna, vectores de corriente	63

25	Simulación de corrosión de columna líneas de flujo	63
26	Comparación de acabados superficiales en concreto	66
27	Resultado del avance de frente de carbonatación	68
28	Tipos de acero estructural y su uso	69
29	Tipos de protección	70
30	Simulaciones de corrosión superficial de columna rediseñada	72
31	Simulación de corrosión de columna, vectores de corriente rediseñada	73
32	Simulación de corrosión de columna líneas de flujo rediseñada	73
33	Cuadro de comparación	74

INDICE DE TABLAS

CONTENIDO		pp
TABLAS		
1	Instrumento de Recolección de Datos	55
2	Instrumento de Recolección de Datos del estado Falcón	60
3	Potencial de corrosión según norma ASTM C876 (1991)	64

INDICE DE APENDICE

CONTENIDO		pp
APENDICE		
A	Apéndice A pasos para uso del programa COMSOL	79
B	Apéndice B casos de estudio	89



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y PREVENCIÓN DE
PATOLOGÍAS EN SISTEMAS ESTRUCTURALES UTILIZADOS EN LA
INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL**

Autor: Manuel Alejandro Toro Romero

Tutor: Ing. Donato Romanello.

Fecha: junio 2019

RESUMEN

Las patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial son sumamente frecuentes, y por lo tanto su temprana detección y estudio para poder prevenir dichas fallas es muy importante, debido a los altos costos involucrados y a las consecuencias negativas que se presentan durante el servicio de estos sistemas. De igual forma, evitar las patologías mediante adecuados métodos de diseño por durabilidad presenta grandes ventajas y ahorros. La metodología de esta investigación se basa en el estudio documental en temas de durabilidad, diagnóstico de patologías y simulación de corrosión por medio de la herramienta de simulación computacional COMSOL Multiphysics, el cual tiene como fin la aplicación de los módulos de física acoplada que contiene el software para analizar temas en el área de pregrado de ingeniería mecánica. Se plantea un procedimiento sistematizado, que sirve de guía práctica para el uso del ingeniero que desee simular la patología asociada a la corrosión. Aun así, los conceptos utilizados son igualmente aplicables y adaptables a todo tipo de estructuras metálica y no metálica o combinación de las mismas. El procedimiento propuesto se realiza mediante una detección y simulación para evaluar las distintas condiciones que pueden afectar a un sistema. Al realizar la investigación se encontró con que no existe conciencia en los profesionales relacionados al área, con respecto a temas de durabilidad y corrosión de los materiales cerrando el panorama de posibilidades que pueden influir en la durabilidad de las estructuras. Por consecuencia el análisis de los resultados demuestra que considerar las patologías más frecuentes en una determinada zona puede ahorrar más del 100% del costo total de la obra.

Descriptor: Durabilidad, patología, corrosión, prevenir, simulación

INTRODUCCIÓN

La presente investigación propone un procedimiento para la detección, simulación y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial, el cuál permita diagnosticar cuáles son las patologías más comunes que afectan a las estructuras, además de las causas que las producen, debido a que se ha notado un gran deterioro en la infraestructura causado por el descontrol durante el proceso constructivo y hasta el mismo servicio que preste las mismas, surge la necesidad de desarrollar un sistema que permita desde la etapa de diseño prevenir las acciones degradantes que puede ocasionar el entorno y la mala ejecución del diseño.

La base del procedimiento que permitirá abordar la situación es un marco teórico en donde se desarrollan los conceptos generales necesarios para comprender las distintas patologías que se puedan presentar. Posteriormente el procedimiento se desarrolla de la siguiente manera: Primero la detección de la patología en estructuras que se encuentran en operación o servicio, luego se procede a simular en distintas condiciones como actúa la corrosión en las estructuras para posteriormente tratar la prevención de las patologías en estructuras nuevas en etapa de diseño. Seguidamente, se valida el procedimiento mediante la simulación utilizando las técnicas de prevención. Para lograr el cumplimiento del objetivo planteado, el trabajo especial de grado se encuentra estructurado de la siguiente manera:

El capítulo uno explicara la razón de la investigación manifestando el problema actual que hay en la infraestructura urbana e industrial por el mal diseño de los sistemas estructurales.

El capítulo dos explica los conceptos de Durabilidad, Patología Estructural como rama de la Ingeniería Forense y realiza una descripción y clasificación de las diversas Patologías en sistemas de concreto estructural además que explica para qué sirve la herramienta computacional COMSOL Multiphysics.

Posteriormente en el capítulo tres se hablara sobre la metodología a utilizar, el tipo de investigación, su diseño, población y muestra. Para finalizar se presentaran las referencias bibliográficas.

Seguidamente en el capítulo 4 se muestran una serie de resultados que describirán el comportamiento de una estructura en condiciones desfavorables y otra en condiciones favorables con la finalidad de comparar los resultados y evaluar la eficiencia del procedimiento.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Desde hace mucho tiempo la construcción ha sido una necesidad fundamental para el desarrollo del hombre, desde los inicios con grandes edificaciones y robustas estructuras a la evolución del diseño que permitió introducir formas más complejas y diversas. Los materiales fueron los que permitieron que este campo avanzara de una forma exponencial iniciando con materiales básicos como la piedra y el ladrillo de barro hasta la combinación de acero y concreto armado esto generó grandes avances en esta área pero también con el pasar de los años se notó un deterioro constante en las estructuras a pesar de la mejora de los materiales y de las técnicas de construcción.

El problema es que las estructuras siempre estarán expuestas a daños, deterioros, desgastes y a pesar de esto debe de conservar la apariencia original y satisfacer las necesidades de los usuarios, sin embargo, hay en ocasiones donde se presentan fallas por problemas desde su planteamiento, construcción, y el tiempo de servicio. Algunas veces, las estructuras cambian de uso y son sometidas a cargas de servicio diferentes a las proyectadas; lo cual puede generar deterioros que no fueron tomados en cuenta en las etapas iniciales del proyecto esto a su vez genera mantenimientos preventivos y correctivos que aumentarán mucho los costos produciendo pérdidas de gran valor.

El control de la obra no concluye con la entrega definitiva sino que debe de ser prolongada a la etapa de servicio del mismo, ya que ésta se va degradando con el paso del tiempo, la estructura debe satisfacer las expectativas de sus usuarios y se deben de tomar las medidas necesarias para que este se conserve en las mejores condiciones por un mayor tiempo. No se puede negar que se cometen muchos errores tanto en el diseño como en la construcción, y esto sucede en todas las obras del hombre, es claro que las edificaciones no solo van a estar sometidas a acciones de cargas verticales y fuerzas horizontales, las cuales fueron tenidas en cuenta para el diseño estructural, sino que también van a estar sometidas a acciones agresivas del medio ambiente, es decir las

edificaciones se comporta como se hayan construido no como se hayan diseñado y una estructura bien construida supera el periodo de vida útil.

No existe un método para identificar las causas de deterioro, ya que cada caso presenta un problema particular y como tal debe de ser estudiado, pero es posible detectar un esquema de comportamiento y establecer un patrón por medio del estudio de las fallas. Conocer el origen de la falla permite clasificarla su naturaleza puede ser física, química o biológica lo importante es saber cómo prevenir en futuros proyectos que no ocurran de nuevo y preservar la estructura y la inversión que conlleva hacer un proyecto.

Es común ver como la infraestructura en todos los niveles al pasar de las décadas se van deteriorando llegando a tal punto de perder parcial o totalmente su utilidad teniendo en cuenta dicha situación es necesario determinar las Patologías más frecuentes que afectan a las estructuras para poder prevenir que ocurran en futuras construcciones, ya que en muchas ocasiones el daño se agrava tanto que no es posible recuperar las estructuras que se encuentran en estado crítico, por lo que la mejor opción es diseñar un nuevo modelo de estructura que tenga en consideración las variables que no fueron tomadas anterior mente por lo que se propone: Un estudio forense del daño estructural para determinar las causas del problema, un rediseño para mejorar y evitar las patologías en la estructura y una simulación para comparar los resultados.

Las características más comunes que ayudan a generar fallas críticas en las estructuras son factores externos como temperaturas oscilantes que no se tomaron en cuenta a la hora del diseño o factores internos que por omisión o falta de estudio no se tomaron en consideración, la falla más crítica es la que está presente y genera un daño constante pero que a la vista es imposible de ver y solo se manifiesta cuando el daño es irreparable por ello se requiere de un nivel técnico apropiado para el estudio y rediseño de la infraestructura actual.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo se podría evitar las patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un procedimiento para la detección, simulación y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial

1.3.2 Objetivos específicos

- Diagnosticar cuáles son los aspectos que afectan la durabilidad y las patologías estructurales más comunes.
- Plantear una metodología para la detección de patologías en estructuras que estén en servicio.
- Establecer parámetros para la simulación de distintos entornos.
- Elaborar una metodología para la prevención de patologías en estructuras nuevas, que incluyan: especificaciones de diseño por durabilidad, control de calidad del proceso constructivo y medidas de mantenimiento o protección
- Realizar una comparación con las patologías detectadas y la nueva metodología para prevenir las mismas

1.4 Justificación de la investigación

Debido a que las estructuras se crean para satisfacer alguna necesidad del hombre. Para cumplir con su misión, las estructuras deben poseer los siguientes atributos: funcionalidad, seguridad, durabilidad, satisfacción estética y factibilidad económica, el diseño de una estructura es un proceso de suma importancia cuya finalidad es el llegar a definir sus características de forma tal que, durante su vida útil prevista, sea capaz de cumplir con su misión en forma óptima.

La presente investigación se justifica por la importancia de conocer el estado actual de la infraestructura urbana e industrial para poder mejora los diseños y prevenir

patologías que afectan gravemente los sistemas estructurales de hoy en día y satisfacer las características anteriormente nombradas.

1.5 Alcance

La presente investigación será llevada a cabo por medio de la investigación documentación y simulación de una patología en un área determinada, en esta se pretende identificar las causas que generan las patologías en las estructuras para poder atacarlas y de esta forma conocer de dónde viene y que variables intervienen en las mismas para poder prevenirlas en nuevos diseños. A su vez se pretende desarrollar un método para la prevención de patología en estructuras nuevas que estén en etapa de diseño. En este sistema incluye un apartado de diseño preventivo por durabilidad, el control de calidad durante el proceso constructivo y el mantenimiento y protección de los elementos estructurales recién construidos, para de esta forma disminuir considerablemente los costos de reparación que conllevan el proceso de restauración en una estructura.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

Este capítulo tiene como objetivo mostrar la importancia del estudio de la durabilidad de las estructuras urbanas e industriales y los conceptos generales para aplicar el procedimiento de detección, simulación y prevención de patologías. Los conceptos que se incluyen son los de Durabilidad y Patología Estructural. Además, se clasifican las patologías según la etapa del proyecto en que se producen (diseño, construcción y operación) y según el origen del agente causante (externo o interno a la composición del concreto); para cada una de las patologías se describen los aspectos más relevantes de los mecanismos de deterioro.

2.1 Antecedentes de la investigación

Dentro de los antecedentes que brindarán los aportes necesarios para el desarrollo del trabajo especial de grado, se tienen los siguientes:

Avendaño, E. (2006), presento un trabajo de grado titulado **Detección, Tratamiento Y Prevención De Patologías En Sistemas De Concreto Estructural Utilizados En Infraestructura Industrial**, con la finalidad de optar por el título de ingeniero civil en la Universidad De Costa Rica Dicha investigación se enmarcó en detectar, reparar y mejorar aspectos de lo sistema estructurales utilizando un método de tres niveles y enfocándose en la reparación de fallas estructurales así como también en el control de calidad y prevención de fallas Basado en estos estudios la autora concluyo que los profesionales en ingeniería aún no han desarrollado la conciencia necesaria para establecer normativa que trate aspectos de durabilidad, reparación y mantenimiento de estructuras de concreto.

De acuerdo a la investigación anterior, se considera que la contribución que esta realiza a la presente, está en la relación directa que existe en el estudio de las patologías y su clasificación ya que esta sienta las bases para el desarrollo de nuevas técnicas para el diseño de estructuras mejoradas y eficientes que no arrastren los problemas de estructuras viejas.

A su vez, Montes, R (2015), realizo un trabajo de grado, para optar por el título de ingeniero mecánico, denominado **Aplicación Del Programa Comsol Multiphysics En La Ingeniería Mecánica** presentado en la universidad Tecnológica de Pereira el trabajo se enfocó en el uso de la herramienta de simulación computacional del COMSOL Multiphysics, el cual tiene como fin la aplicación de los módulos de física acoplada que contiene el software a áreas de estudio contenidos en un programa de pregrado de ingeniería mecánica. Finalmente el desarrollo de este proyecto incentivo el uso del COMSOL Multiphysics en el campo de la mecánica contribuyendo así al avance científico y tecnológico; también justificando la oportunidad de una posterior adquisición del programa por parte de los profesionales del área.

El aporte que esta investigación brinda a la presente está relacionado directamente con la herramienta computacional Comsol Multiphysics, ya que se presenta la manera en la que el autor pudo por medio de la aplicación detectar las causas que generaban fallas en un sistema estructural y simularlo para evaluar e interpretar los daños.

Por otra parte a Olavarrieta, M (2017), **caracterización de fallas en edificaciones escolares expuestas en ambientes agresivos M4 del Estado Falcón**, del artículo de investigación, Revista Gaceta Técnica. Volumen 17(1) pp. 61-80, cuyo objetivo fue establecer una caracterización de las edificaciones de concretos armado de uso público como las unidades escolares, en la zona costera de Chichiriviche y Tucacas del Estado Falcón, expuestas en ambientes altamente corrosivos y edificados en bases a practica constructivas inadecuadas, se obtuvo como resultado que dichas unidades de diversas edades de construcción se encontraban en mejor estado de conservación, si se compara directamente con la muestra evaluada en el 2006 realizada en edificaciones multifamiliares privadas, que eran incluso más jóvenes que ésta muestra. Finalmente se recomendó utilizar como protector para la corrosión aplicar un sistema de mantenimiento continuo programado y técnico, que fuese más allá de los sistemas de pinturas que cuyo sustrato no está idóneamente preparado, teniendo como consecuencia un proceso de reparación superficial y estético poco efectivo. La investigación desarrollada por este autor aporta al presente trabajo un sistema de

mantenimiento continuo que además existen sistemas de protección contra la corrosión y las estructuras, lo cual proporciona un mayor tiempo de vida útil.

Blanco, Z. (2018), en su tesis de grado titulada “**Estudio Del Comportamiento De La Acción Corrosiva En La Estructura De Acero Del Hotel Chichiriviche Boutique. Estado Falcón**”, presentada en la Universidad José Antonio Páez para optar al título de ing. Civil, la cual está basada en el estudio del comportamiento de la acción corrosiva en la estructura de acero del hotel Chichiriviche Boutique del Estado Falcón en una edificación de concreto armado expuesta a un ambiente agresivo detecto que las condiciones que se establecieron para dicha construcción no eran las óptimas ya que las técnicas de construcción no fueron las adecuadas para conservar la integridad de la estructura, esto se logró por medio de la observación e identificación de las patologías existentes en la estructura, luego con las entrevistas realizadas al personal de trabajo se identificó la mala ejecución en la construcción, adema en muchos casos la oxidación del material fue consecuencia del almacenamiento del material de la obra.

El aporte suministrado por este trabajo es la identificación de las patologías en obras que ya fueron ejecutadas y que están en zonas sensibles a la corrosión atmosférica.

2.2 Bases teóricas

De acuerdo con Arias (2006), “Las bases teóricas implican un desarrollo amplio de los conceptos y proposiciones que conforman el punto de vista o enfoque adoptado, para sustentar o explicar el problema planteado” (p.107). Por lo tanto, la correcta realización de las bases teóricas permitirá no solo obtener un sustento sobre el cual se podrá realizar el apropiado y acorde análisis de resultados, sino que también ayudará a explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

2.2.1 Durabilidad

La durabilidad de las estructuras se define como su capacidad para resistir las diversas acciones producidas por el medio que lo rodea. Estas acciones pueden ser producidas por condiciones climáticas, ataques químicos, biológicos, por abrasión y

fatiga, entre otros. Una estructura resistente a solicitaciones impuestas no necesariamente es una estructura durable. En el proceso de diseño se debe considerar tanto las propiedades de resistencia como las condiciones del medio y de los materiales que son determinantes para la durabilidad.

Toda estructura metálica y no metálica debe cumplir con las funciones para la que fue diseñada, manteniendo perfectas características de resistencia, forma y utilidad, tanto para la exposición del ambiente que lo rodea, como para el tiempo de servicio especificado. Esto no quiere decir que la estructura debe conservar sus características indefinidamente o soportando cualquier tipo de acción sin ningún tipo mantenimiento. El desempeño y la durabilidad de una estructura, depende básicamente de los siguientes factores:

Diseño y cálculo estructural: selección de la geometría o la forma correcta del elemento y de la adecuada cantidad y posición del acero de refuerzo, para cumplir con los requerimientos de resistencia, tanto para las cargas de diseño, como para las condiciones ambientales y de servicio.

Materiales: escogencia del concreto, del acero de refuerzo, los aditivos, las adiciones del cemento y productos de protección superficial como los polímeros y epóxicos que deben cumplir con los estándares de calidad y con los requisitos de aplicación.

Práctica constructiva: uso de mano de obra calificada y adecuados procesos constructivos de curado, de protección del concreto y de control de calidad.

Operación: cumplimiento de un plan de mantenimiento preventivo dependiendo de las condiciones de servicio a las que se encuentra sometida el sistema estructural.

El diseñador debe tomar en cuenta que las condiciones del medio ambiente han experimentado cambios paulatinos, debidos a los efectos del uso generalizado de máquinas de combustión y al empleo de sustancias químicas como materia prima para la elaboración de un sinnúmero de productos. Los sistemas de concreto estructural utilizados en infraestructura industrial sufren deterioros como consecuencia de la acción de las sustancias y los procesos.

Algunos ejemplos de sustancias agresivas son: el ácido láctico en las plantas de elaboración de derivados de la leche, los ácidos orgánicos derivados del procesamiento de frutas, la materia prima y productos de las industrias químicas como la farmacéutica, pinturas y fertilizantes. Entre los procesos perjudiciales para los elementos de concreto que aceleran el proceso de corrosión se encuentran: la abrasión, la vibración, el desgaste, los choques térmicos y de presión.

Por el desconocimiento de los factores que intervienen en la durabilidad de las estructuras metálicas y no metálicas, por la falta de diagnósticos oportunos y un inadecuado mantenimiento, los efectos de las patologías avanzan hasta el punto que las estructuras industriales y urbanas se vuelven ineficientes e inseguras. Además, implementar medidas correctivas (plantear y ejecutar procesos de reparación) en obras existentes en operación implica un altísimo costo y muchas veces no es rentable; mientras que si se ejecutan medidas preventivas desde la concepción del diseño resulta económicamente más aceptable.

En la figura 1 se ejemplifica la relevancia de los costos de reparación de la infraestructura urbana e industrial. Se presenta la Ley de Sitter (Ley de evolución de costos), en donde se le asigna un costo relativo de una unidad a las decisiones que se toman durante el proceso de diseño y planificación de un proyecto. Las medidas tomadas en la construcción tienen un impacto en el costo cinco veces mayor, el mantenimiento preventivo tiene un costo relativo 25 veces mayor; mientras que el costo del mantenimiento correctivo tiene un impacto de 125 veces el costo del diseño.

Lo que demuestra que el sistema de prevención no solo busca mejorar la eficiencia del diseño o la durabilidad de las estructuras sino que también afecta de forma contundente los costos financieros garantizando así la factibilidad de los proyectos. El estudio de durabilidad y patología del concreto ha tomado importancia en las últimas décadas, especialmente entre los ingenieros diseñadores de la mayoría de países desarrollados, interesados tanto en conservar su patrimonio arquitectónico y su Infraestructura de servicios, como en producir obras perdurables en el tiempo que cumplan adecuadamente con la funcionalidad.

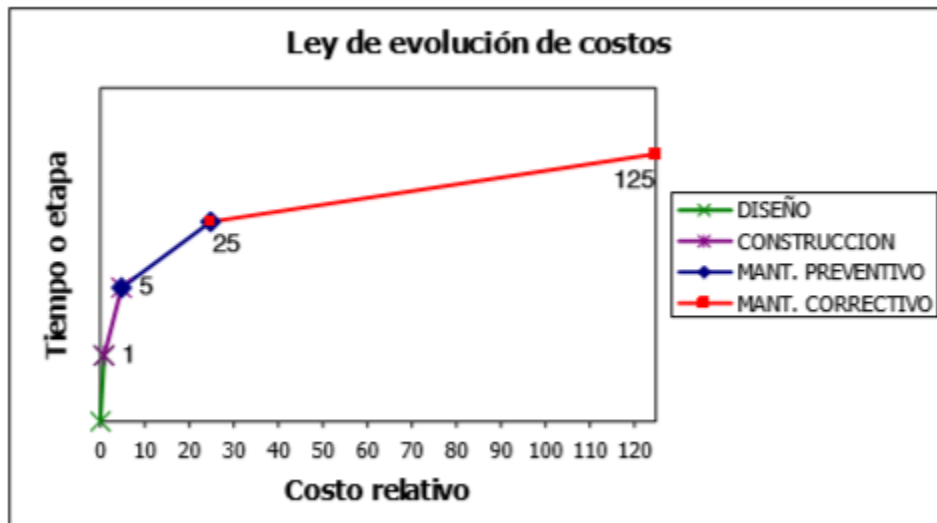


Figura 1 Ley de evolución de costos (ley de Sitter)

Fuente: Helene (2003)

2.2.2 Patología Estructural

La Patología Estructural se define como la disciplina de la Ingeniería Forense que detecta, trata y previene las patologías o daños que se presentan o se podrían presentar en los sistemas de concreto. En las estructuras en servicio, el estudio comienza con la detección de las causas y consecuencias del deterioro (diagnóstico), luego se realiza un diseño correctivo tomando en cuenta los requisitos de durabilidad y por último se establecen los procesos de reparación, control de calidad y mantenimiento de la reparación. En el caso de estructuras nuevas, la Patología Estructural establece recomendaciones y especificaciones de diseño preventivo por durabilidad, control de calidad durante el proceso constructivo y protección de los elementos después de construidos.

2.2.3 Patologías Del Concreto Estructural

2.2.3.1 Clasificación de las patologías según la etapa del proyecto

Las patologías que sufre una estructura de concreto se pueden clasificar según la etapa del proyecto en donde se originan, según se muestra en la figura 2

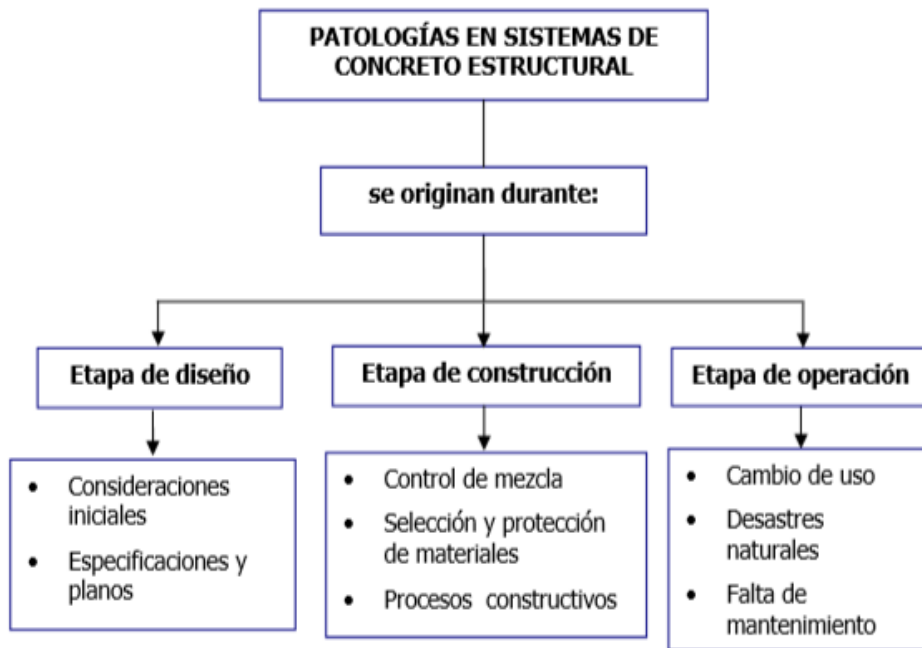


Figura 2 Clasificación de patologías según etapa de origen
Fuente: Avendaño, E. (2006)

2.2.3.2 Patologías durante la etapa de diseño

El diseño de cualquier estructura, no sólo debe contemplar las consideraciones mecánicas de resistencia, sino también las condiciones ambientales que rodean a la estructura. En la actualidad, por el avance en los códigos y en los métodos e instrumentos de cálculo estructural, se tiende a optimizar los recursos disponibles para la construcción (materiales), logrando estructuras más eficientes con un adecuado comportamiento estructural, pero en algunos casos más vulnerables a sufrir problemas de durabilidad. Dentro de las principales razones por las que se originan patologías durante la etapa de diseño se tienen las siguientes:

- Dejar de considerar las condiciones ambientales y de servicio que soportará la estructura.

- Omitir el diseño de juntas de contracción, dilatación o construcción.

El concreto es un material que cuenta con muy baja resistencia a la tensión y se fisura o se agrieta fácilmente, por lo que los elementos deben contar con el

acero necesario para controlar la retracción por temperatura y con el diseño adecuado de juntas.

- Omitir o diseñar inadecuadamente sistemas de drenaje que disminuyan o eviten el contacto entre el agua u otros fluidos con el concreto. Se deben reducir o evitar los ciclos de humedecimiento y secado.

- Omitir en los planos constructivos o en los documentos de especificaciones técnicas, las indicaciones de resistencia y las características requeridas de los materiales, tales como las características del concreto, del acero, los recubrimientos y sistemas de tratamiento o protección superficial.

- Realizar un diseño de mezcla de concreto sin tomar en cuenta los requerimientos de durabilidad para la exposición y el uso que va a sufrir el elemento estructural.

- Dimensionar inadecuadamente los elementos, con una deficiente distribución del acero de refuerzo, recubrimientos insuficientes y no revisar las deformaciones del modelo estructural.

- Omitir detalles claros y específicos en los planos constructivos sobre aspectos críticos de durabilidad, como los recubrimientos y la distribución del acero de refuerzo.

2.2.3.3 Patologías durante la etapa de construcción

El proceso constructivo debe generar un producto totalmente apegado a los planos y a las especificaciones de diseño. Las obras tienen un tiempo definido para ejecutarse, por lo que los métodos constructivos han mejorado su eficiencia por medio de la industrialización de la construcción, el uso de tecnología y estrictos controles de calidad. A pesar de la industrialización y la mejora en procesos, es importante destacar que la mano de obra, sigue siendo el principal recurso de la construcción y como cualquier labor humana, es propensa a incurrir en errores.

Dentro de las principales razones por las que se producen patologías durante la etapa de construcción se encuentran las siguientes:

- Dosificar inadecuadamente la mezcla de concreto en sitio: adicionar agua, cemento y aditivos sin control o utilizar agregados de tamaño equivocado y pureza cuestionable incluidos el acero de refuerzo.

- Omitir el control en la calidad de los ingredientes de la mezcla.

- Omitir el control en la calidad del concreto en sitio, al no realizar pruebas de revenimiento, verificación de los agregados y la preparación de cilindros para ensayos de resistencia en laboratorio.

- Emplear malas prácticas de colocación y compactación del concreto.

- Construir inadecuadamente las juntas de contracción.

- Omitir las tareas de protección y aplicar prácticas de curado del concreto inapropiadas.

- Omitir el control de resistencia del acero de refuerzo.

- Cometer errores en la colocación y el retiro prematuro de los encofrados.

- Omitir la colocación en la posición adecuada del acero de refuerzo antes del colado, irrespetando el recubrimiento y separación mínimos.

- Irrespetar las especificaciones y el diseño, por la inadecuada interpretación de los planos, cambiando el comportamiento de la estructura.

- Ejecutar inadecuadamente los procedimientos de montaje de elementos prefabricados, que induzcan deformaciones, impactos y vibraciones no previstas.

- Cargar la estructura prematuramente, cuando los elementos aún no han desarrollado la resistencia para soportar las cargas impuestas.

- Picar elementos para introducir tuberías de instalaciones electromecánicas.

2.2.3.4 Patologías durante el periodo de operación

El comportamiento y desempeño de una estructura durante su vida útil, depende de los procesos de diseño, elección de materiales y de la construcción. Este período de vida útil puede verse disminuido significativamente por las condiciones en las que opere la infraestructura. Las patologías producidas durante la etapa de operación generalmente se presentan por las siguientes circunstancias:

- Cambio de uso o abuso de la estructura: se incrementan los requerimientos de resistencia por el aumento en las cargas de servicio, las vibraciones, los impactos y los cambios de configuración estructural por remodelaciones sin control; además por otro lado se producen cambios en las condiciones ambientales o de exposición de los elementos. Los cambios que son provocados por la acción del usuario y administrador del inmueble, traen consigo deterioros irreversibles en la estructura, ya que imponen condiciones que no fueron tomadas en cuenta en el diseño.

- Desastres naturales o accidentes: entre los desastres que provocan más daño a una obra se encuentran incendios, explosiones, choques o impactos, inundaciones, terremotos y huracanes.

- Falta de mantenimiento: no se establece un manual con procedimientos de mantenimiento y protección, con base en las condiciones de operación de la estructura. El mantenimiento es necesario para impedir el deterioro y conservar las condiciones originales de desempeño por resistencia y durabilidad.

2.2.4 Clasificación de las patologías según el origen del agente causante

El concreto es un material que interactúa con el medio ambiente. Dependiendo de sus características de permeabilidad y porosidad, y de la agresividad del medio que rodea a la estructura, pueden ocurrir procesos de deterioro de carácter químico, mecánico, físico y biológico el microclima o medio ambiente inmediato que rodea a la estructura se caracteriza por las condiciones de humedad, de temperatura, de presión y la presencia de agentes agresivos. Los agentes agresivos en los casos de los ataques químicos y biológicos están constituidos por sustancias, generalmente en estado líquido o gaseoso. En los casos de deterioros del tipo mecánico y físico, las causas pueden ser debidas a sobrecargas, impactos y cambios de temperatura y de humedad.

La penetración, la velocidad del deterioro o los efectos de un agente agresivo, depende tanto del concreto y microclima, como de los mecanismos de transporte e interacción que se dan en el sitio. Entre los mecanismos de transporte de sustancias agresivas, se tiene: el transporte por aire cargado de humedad, por agua de lluvia, salpicaduras y por inmersión. Los deterioros del concreto, pueden ser causados por

agentes externos al material y por agentes internos. En la figura 3 se observa la clasificación de las patologías según el origen del agente causante.

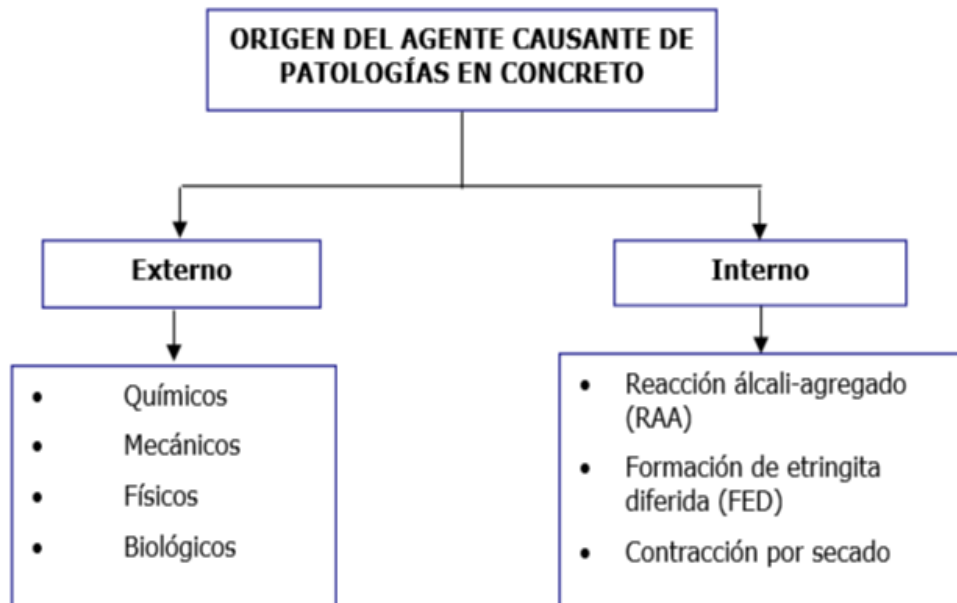


Figura 3 Clasificación de patologías según el origen del agente causante
Fuente: Avendaño, E. (2006)

2.2.4.1. Agentes Externos

a). Químicos

El principal efecto provocado por los agentes químicos en contacto con el concreto endurecido, es la desintegración de la pasta del cemento. La reacción entre la solución agresiva y la pasta puede generar productos solubles o insolubles expansivos. Las reacciones por agentes químicos traen consigo el descenso del pH, o sea la pérdida de alcalinidad de la pasta del cemento, lo que reduce la capacidad del concreto para proteger el acero de refuerzo de la corrosión. El fenómeno de corrosión de los metales se genera a partir de una reacción química interna favorecida por la presencia de alguna sustancia del entorno.

Las sustancias agresivas, se trasladan desde la fuente contaminante (medioambiente o microclima), hasta la superficie y penetran en el interior de la masa

de concreto. Los daños provocados por las reacciones químicas, pueden presentarse tanto inmediatamente después del contacto, como a largo plazo, esto depende de la concentración de la solución, la velocidad de transporte, el tiempo de exposición y las condiciones de temperatura y presión del medio.

Entre los agentes químicos que deterioran el concreto se encuentran: el ataque de ácidos, la corrosión, el ataque de sulfatos y la carbonatación.

-Ataque de ácidos

El concreto es un material silicio-calcáreo, con un fuerte carácter básico, cuyo pH alcanza fácilmente valores de 13, por consiguiente es un material susceptible al contacto con cualquier fluido ácido. El deterioro que sufren los elementos de concreto en contacto con ácidos, es la disolución o pérdida de la pasta del cemento por las reacciones que se producen entre los ácidos y los compuestos cálcicos del cemento hidratado (hidróxido, silicato y aluminato de calcio). En la figura 4 se presenta un esquema del deterioro causado por la acción de los ácidos.

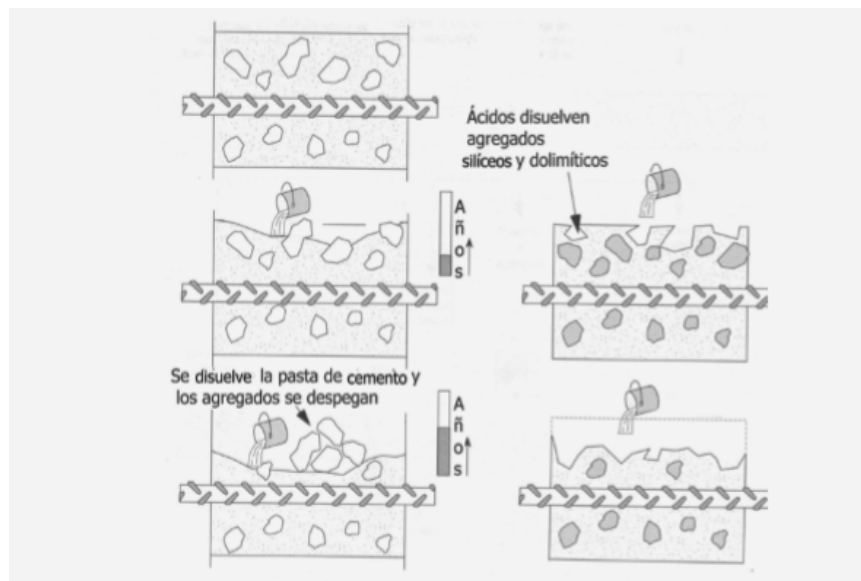


Figura 4 Esquema de deterioro del concreto por los ácidos

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

En la figura 5 se muestra los ácidos comunes más perjudiciales para el concreto

ÁCIDOS	
INORGÁNICOS	ORGÁNICOS
Clorhídrico	Acético
Brómico	Fórmico
Carbónico	Láctico
Ácido de cromo	Cítrico
Fluorhídrico	Tánico
Fosfórico	Butílico
Nítrico	Úrico
Sulfúrico	Húmico
Sulfuroso	Fenol
OTRAS SUSTANCIAS	
Hidrógeno sulfurado	Grasas animales y vegetales
Sales de amonio	Aceites vegetales
Cloruro de aluminio	Microorganismos

Figura 5 Tabla de ácidos y sustancias comunes perjudiciales para el concreto

Fuente: Sánchez De Guzmán (2002) y Neville (1999)

El ácido clorhídrico genera cloruro cálcico y el ácido nítrico da como resultado nitrato de calcio, ambos compuesto solubles en agua; mientras que el ácido sulfúrico produce sulfato cálcico que precipita como yeso, también soluble. La velocidad de degradación del concreto, depende de la concentración del ácido y de la solubilidad del producto de la reacción. Los ácidos inorgánicos más agresivos a temperatura ambiente

son: clorhídrico, fluorhídrico, nítrico y sulfúrico; mientras que los orgánicos son: acético, fólico y láctico.

Algunas de las sustancias del medio ambiente que se encuentran en contacto con las estructuras y que se convierten en ácidos, son las siguientes:

- Los gases producto de la combustión que se combinan con la humedad y forman ácido sulfúrico (lluvia ácida).

- El agua de minas, aguas industriales y residuales. Estas forman ácido sulfúrico y sulfuroso; al igual que los vapores volcánicos con alto contenido de azufre.

- Los suelos tipo turbas pueden tener sulfuro de hierro que generan ácido sulfúrico.

- Las aguas montañosas de carácter ácido poseen ácidos orgánicos y bióxido de carbono libre.

- Las industrias agrícolas y agro alimenticias producen grandes cantidades de ácidos orgánicos, tales como: fermentadoras, lecherías, destiladoras, productoras de jugos cítricos y de pulpa de frutas, carnicerías, procesadoras de caña de azúcar y de algunos productos de madera.

- Corrosión del acero de refuerzo

El concreto le ofrece protección contra la corrosión al acero de refuerzo, ya que el oxígeno presente dentro del concreto forma una película de óxido en las barras, que constituye una capa pasiva que impide una corrosión profunda. Además, el carácter básico y la resistencia eléctrica del concreto que recubre el acero evitan la penetración de agentes agresivos. La principal causa de la corrosión del acero de refuerzo es la disminución de la alcalinidad del concreto que se encuentra expuesto a sustancias agresivas del medio ambiente como los cloruros y los ácidos.

La corrosión en estructuras de concreto estructural depende de los siguientes factores:

- La permeabilidad del recubrimiento: los procesos de corrosión se dan por el fenómeno de difusión en los poros del concreto, de sustancias como el oxígeno,

dióxido de carbono o los iones cloruro, que combinados con la humedad ambiental aceleran el deterioro del acero. Un concreto fabricado con una alta relación A/C, una mala compactación, segregación de la mezcla, un deficiente curado y un secado prematuro por efectos del viento o la radiación solar; se convierte en un concreto con alta porosidad y permeabilidad en la zona del recubrimiento, que facilita el ingreso de sustancias agresivas que corroen las armaduras y deterioran el elemento estructural.

- El espesor del recubrimiento: según la Segunda Ley de Fick, la velocidad de penetración del carbonato es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición (Sánchez de Guzmán, 2002); por lo que se estima que si el recubrimiento de un elemento es la mitad que el de otro elemento, el primero sufre oxidación de su refuerzo en una cuarta parte del tiempo que el segundo, estando ambos expuestos a las mismas condiciones ambientales y contruidos con el mismo concreto. (Ver ecuación 2).

- Penetración de cloruros

Los cloruros provienen del agua de mar, sales de deshielo y otros iones con un pH cercano a 9; estos producen picaduras locales que disminuyen la sección de las barras de acero. La penetración de cloruros se favorece en los ciclos de humedecimiento y secado. La corrosión electroquímica es la que se da dentro del concreto, ya que se trata de una reacción química en donde se produce transferencia de iones y electrones en un medio acuoso. La corrosión ocurre dentro de una celda electroquímica, que está formada por: un ánodo donde ocurre la oxidación, un cátodo donde ocurre la reducción, un conductor que ponga en contacto al cátodo con el ánodo y el electrolito para cerrar el circuito.

Los iones Fe^{2+} y OH^- se combinan para formar hidróxido de hierro (Fe_2O_3) que combinado con el agua de la atmósfera forman óxido o herrumbre. El óxido de hierro es expansivo, llega a aumentar desde 2 a 7 veces su volumen, dependiendo de la cantidad de oxígeno disponible para la reacción. Dicho aumento de volumen provoca esfuerzos radiales de tensión que producen fisuras y deslaminaciones en el concreto,

trayendo como consecuencia la disminución de la adherencia entre el concreto y el refuerzo, generando finalmente una pérdida considerable en la capacidad mecánica del elemento estructural. En la figura 6 se muestra un esquema del deterioro provocado por la corrosión.

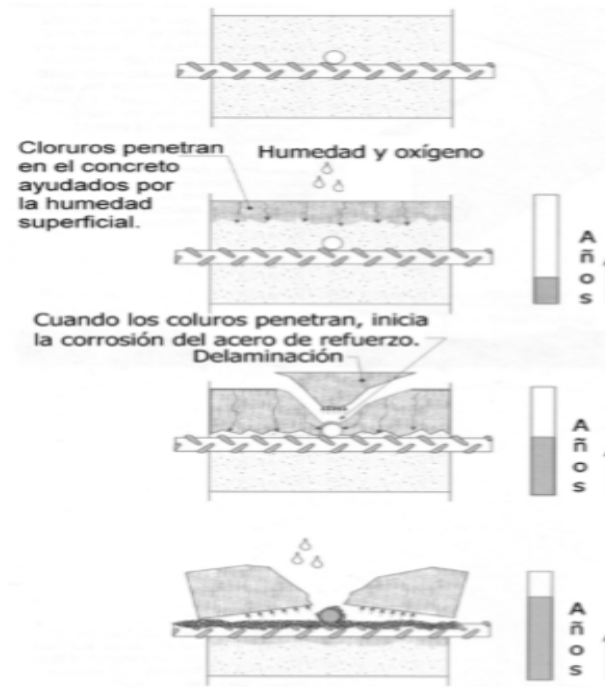


Figura 6 Esquema de deterioro provocado por la corrosión

Fuente: adaptado de Emmons (1993)

Existen varios tipos de corrosión electroquímica que tienen lugar dentro del concreto:

- Uniforme: es la corrosión generalizada por la pérdida de la capa pasivadora, causada por la carbonatación, por la acción intensa de iones cloruro o la lixiviación de líquidos ácidos.
- Localizada: es la corrosión que se concentra en ciertas zonas, en donde penetran directamente el oxígeno, la humedad y sustancias agresivas.

- Picaduras: se manifiesta por picaduras profundas de las zonas anódicas, que se corroen por acción de iones cloruro o como efecto de diferencias entre aleaciones en el acero.

- Biológica: es la corrosión provocada por el contacto del acero con microorganismos biológicos que generan sustancias ácidas y agresivas.

- Bajo esfuerzo: se presenta con mayor frecuencia en elementos de concreto preesforzado como consecuencia de la despasivación local. Se da en las zonas donde el elemento se encuentra sometido a cargas de tensión; en este punto el concreto se fisura, dando paso a agentes agresivos que penetran y corroen la barra de acero.

- Galvánica: se presenta cuando dos metales de diferente potencial, están en contacto con el mismo electrolito. En el concreto se da cuando el acero exterior se encuentra más corroído que el interior y cuando el acero se encuentra en contacto con otros metales, como es el caso de tuberías de sistemas eléctricos. En la figura 7 se presenta un ejemplo de corrosión galvánica.

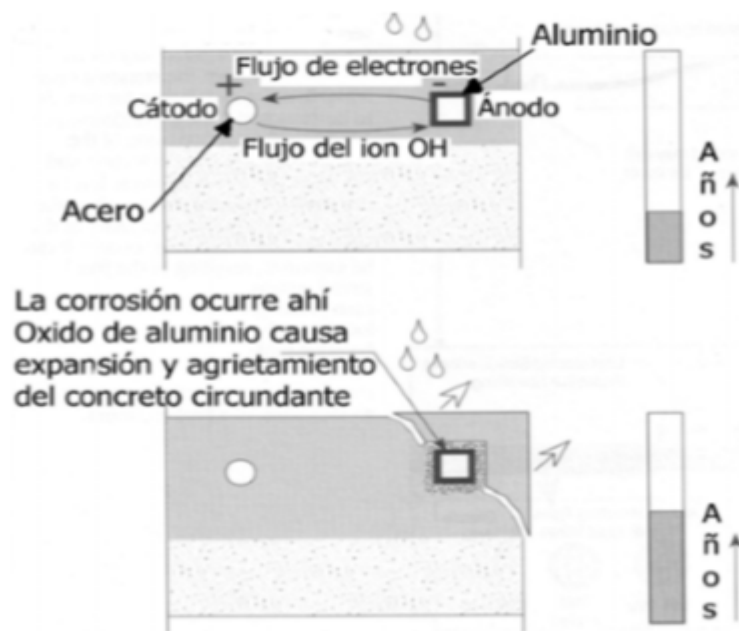


Figura 7 Ejemplo de corrosión galvánica en el concreto

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

En la figura 8 se presenta la tabla de actividad de los metales. Un metal activo se encuentra hacia el extremo izquierdo de la serie de actividad, o sea tiene un potencial medido en Voltios más negativo; este tipo de metal es poco resistente a la corrosión, entre los metales activos se encuentran el magnesio, zinc, aluminio y el hierro. Un metal noble es poco reactivo, o sea el proceso de corrosión en este tipo de metal es más lento, les corresponde potenciales próximos al extremo positivo de la serie de actividad, entre los metales más nobles se encuentran el níquel, cromo, plata, oro y cobre.

-Ataque de sulfatos

El ataque que genera el ion sulfato en el concreto, se origina por dos reacciones químicas:

- La combinación de los sulfatos con el hidróxido de calcio de la pasta (cal libre), produce sulfato de calcio soluble (yeso).

- El yeso se combina con el aluminato tricálcico hidratado del cemento (C3A), para formar sulfoaluminato de calcio (etringita).

Estas reacciones dentro de la pasta del cemento, tienen como resultado un aumento en el volumen del sólido, por lo que el concreto se expande, se fractura y se ablanda; produciéndose una pérdida de adherencia entre la pasta, los agregados y el acero de refuerzo, lo cual conlleva a una disminución en la capacidad estructural del elemento. Además, la porosidad de un concreto agrietado, propicia la entrada de diversas sustancias agresivas que se encuentran en el entorno. En la figura 9 se muestra el deterioro causado por el ataque de sulfatos en elementos de concreto.

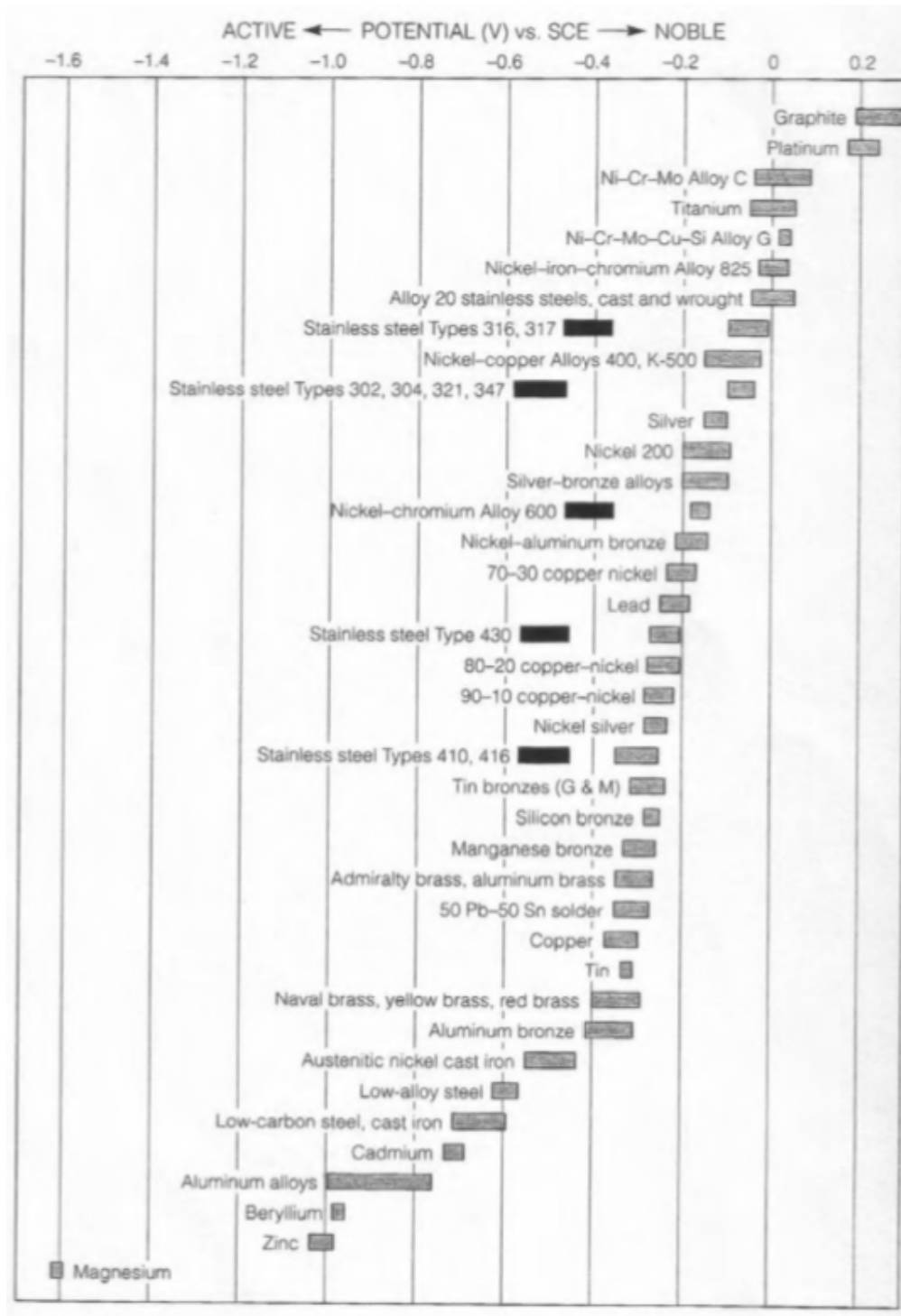


Figura 8 Actividad de los metales
Fuente: Jones (1996)

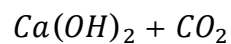
Figura 9 Deterioro en concreto causado por el ataque de sulfatos

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

Los sulfatos de origen biológico, provienen de aguas residuales que experimentan descomposición de carácter aeróbico y se transforman en sustancias orgánicas y microorganismos que contienen azufre y proteínas. Los sulfatos industriales son originados por la combustión de carbón o gasolina; el dióxido de azufre liberado por dicha combustión, forma ácido sulfúrico al combinarse con la humedad atmosférica.

-Carbonatación

La carbonatación, se debe a la penetración del dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera o del suelo, dentro de los poros del concreto endurecido. El CO₂ se disuelve en los poros, reaccionando con los componentes alcalinos de la fase acuosa del concreto y produciendo ácido carbónico. Dicho ácido convierte el hidróxido de calcio (cal libre del cemento) en carbonato de calcio (CaCO₃) y agua.



- Desciende el pH superficial del concreto de 13, hasta valores iguales o inferiores a 9. El concreto al perder su basicidad, disminuye su capacidad protectora de la corrosión del acero de refuerzo; o sea al aumentar la penetración de la carbonatación (frente de carbonatación), se pierde el efecto de la capa pasivadora del recubrimiento del concreto.

- Se da una contracción adicional en la superficie del concreto, por la disminución del volumen de la pasta de cemento, induciendo el agrietamiento y facilitando el ingreso de sustancias agresivas.

La reacción es más intensa, si los cambios de humedad, presión y temperatura ambiental son más significativos y si la permeabilidad y porosidad del concreto es considerable. El fenómeno es más común en lugares con humedades relativas entre un 65% y 98%. En estructuras que se encuentran permanentemente saturadas no existe la posibilidad de carbonatación, ya que la difusión del dióxido de carbono es posible solamente en poros llenos de aire. En la figura 10 se muestra un esquema del deterioro provocado por la carbonatación del concreto.

La profundidad del frente de carbonatación, es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de exposición, esto según la Segunda Ley de difusión de Fick:

$$X = k \sqrt{t} \quad (\text{Ec } 2)$$

Donde:

x = profundidad del frente de carbonatación (mm)

k = coeficiente de carbonatación

t = tiempo transcurrido (años)

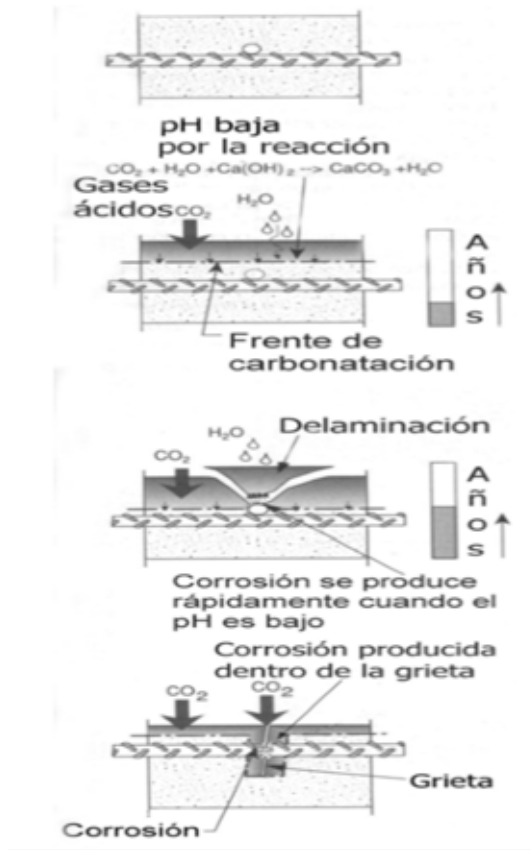


Figura 10 Esquema de deterioro causado por la carbonatación
Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

El coeficiente de carbonatación k , depende de las condiciones ambientales y de las características del concreto. Entre las características ambientales, se encuentran: cantidad de CO_2 en la atmósfera, humedad relativa, temperatura y la presión del medio ambiente. Las características del concreto que toma en cuenta k son las relacionadas con la permeabilidad del recubrimiento, tales como: porosidad, difusión y absorción. Generalmente, el coeficiente de carbonatación se determina experimentalmente para determinadas condiciones ambientales, expresándolo en función de alguna característica del concreto como la absorción capilar. Bakker propone utilizar una relación de 0,78 entre el coeficiente del CO_2 y el del O_2 , debido a que calcular el coeficiente es complicado se usa esta constante para generalizar en los casos que no se pueda comprobar la cantidad de CO_2 en el ambiente.

b) Mecánicos

Las acciones mecánicas se deben principalmente a sobrecargas, deformaciones, impactos o vibraciones, que no fueron contempladas en su diseño. Algunas de estas sollicitaciones imprevistas, tienen su origen en un cambio de uso en la obra, un accidente o desastre natural. Se debe tener en cuenta, que el concreto ofrece una alta resistencia a la compresión, pero una pobre resistencia a la tensión, por lo que los elementos estructurales se refuerzan con barras de acero, que toman los esfuerzos de tensión provocados por el cortante, la flexión y la torsión. En los últimos años, se han fabricado concretos micro reforzados con fibras de polipropileno o metálicas, para evitar las grietas en las zonas de esfuerzos de tensión en concreto plástico y endurecido.

-Sobrecargas

Al superarse la capacidad resistente del material que constituye el elemento estructural, por la acción de sobrecargas provocadas por eventos imprevistos en el diseño (cambios en las sollicitaciones, sismos, vientos, inundaciones, deslizamientos y explosiones); se produce deficiencia estructural que se manifiesta por grietas y deflexiones excesivas.

-Grietas estructurales:

Las grietas estructurales pueden presentar anchos superiores a los 0,5 mm y se originan por errores de cálculo, el desprecio de hipótesis de carga, por la inadecuada especificación de resistencia de materiales y por la construcción de secciones sin respetar los planos. En la figura 11, se observa el tipo de grieta estructural, con sus respectivas características y un esquema para identificarlas.

-Deflexiones excesivas:

Entre las deformaciones excesivas provocadas por movimientos imprevistos, se tiene las que son producto de asentamientos del terreno y las impuestas por eventos fortuitos como los desastres (sismo, viento, inundaciones, deslizamientos y explosiones).

Si se presentan movimientos diferenciales en la estructura y ésta no es capaz de redistribuir las cargas rápidamente, sufre fallas y fracturas en los elementos más

esbeltos y rígidos, tales como las paredes, muros y en los acabados (cielos, ventanas y pisos). Durante eventos intensos como los desastres naturales mencionados, las deformaciones de la estructura la pueden llevar fácilmente al colapso.

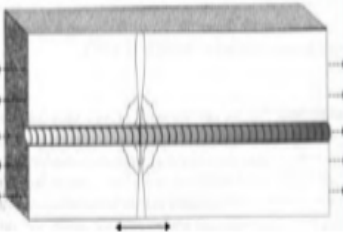
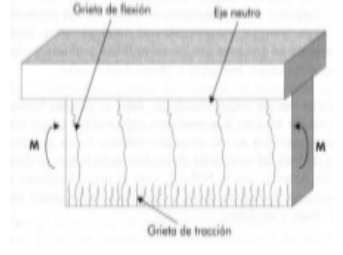
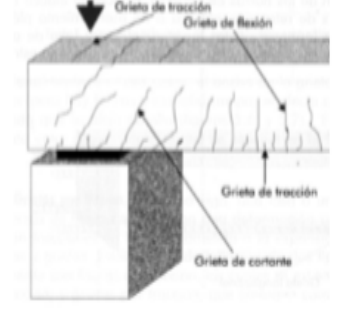
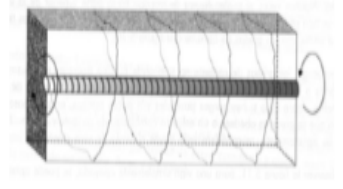
TIPO DE GRIETA ESTRUCTURAL	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
TRACCIÓN PURA	El concreto resiste tracción por medio del acero de refuerzo, cuando las cargas sobrepasan la capacidad estructural de la sección disminuye la adherencia entre el acero y el concreto en una zona produciéndose grietas transversales.	
FLEXIÓN	Las grietas por flexión, son transversales y se extienden a partir de la cara en tensión hasta el eje neutro de la sección. Su causa principal son las precargas, sobrecargas y el insuficiente refuerzo de acero.	
CORTANTE	Aparecen inclinadas cerca de los apoyos o en los puntos de aplicación de cargas concentradas, el ángulo de las grietas es aproximadamente 45°, ya que son lugares de máximo cortante y mínimo momento. Son grietas que atraviesan toda la sección.	
TORSIÓN	Son grietas inclinadas que traspasan toda la sección en forma de espiral.	

Figura 11 Esquema de grietas estructurales y características
Fuente: Adaptado de Sánchez de Guzmán (2002)

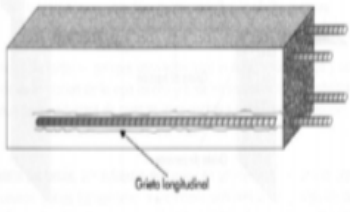
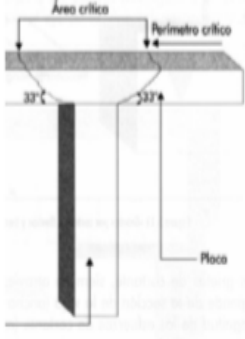
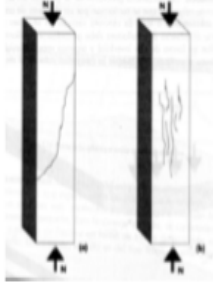
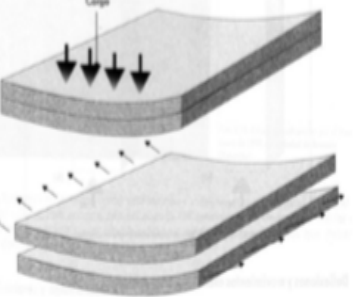
TIPO DE GRIETA ESTRUCTURAL	CARACTERÍSTICAS	ESQUEMA
LONGITUDINALES	Se forman alrededor del acero de refuerzo y se asocian a fenómenos de retracción plástica que producen una deficiente adherencia entre el acero y el concreto. Las grietas se producen cuando se dan esfuerzos de tensión en el acero principal.	
PUNZONAMIENTO	Son provocadas por esfuerzos altos originados por cargas soportadas en áreas pequeñas. La superficie de fractura es de forma de tronco de pirámide y es una falla frágil.	
COMPRESIÓN	Si se supera la capacidad de carga axial de un elemento columna se producen grietas paralelas a la dirección de la carga.	
CIZALLADURA	Se produce un deslizamiento por falta de adherencia o anclaje entre las diferentes capas de un elemento.	

Figura 11 Esquema de grietas estructurales y características (continuación)

Fuente: Adaptado de Sánchez de Guzmán (2002)

-Impactos y vibración

Los impactos y vibraciones pueden propagar grietas, que se desarrollan conforme pasa el tiempo. El diseño estructural toma en cuenta el impacto, empleando parámetros conservadores, por ejemplo el diseño de una estructura que soporta maquinaria pesada, puede considerar factores de amplificación de la carga temporal entre un 25% y 33%. El diseño por vibración debe considerar el efecto de las cargas dinámicas, evitando la resonancia, que se produce cuando la frecuencia natural de la estructura de apoyo es similar a la frecuencia de la fuente vibrante. La relación entre frecuencia de la estructura y la frecuencia perturbadora, debe estar fuera de los valores comprendidos entre 0,5 y 1,5.

-Abrasión

La resistencia del concreto a resistir la abrasión, se define como la capacidad para que la superficie pueda soportar el desgaste producido por fricción, erosión y cavitación provocada por un agente externo. La fricción es el desgaste de la superficie de pisos y pavimentos de concreto, por la acción del tránsito de camiones, vehículos y montacargas, que generan raspaduras y patinazos. La erosión es propia de obras hidráulicas (presas, túneles, conducciones, pilas de puentes y canales), en donde el flujo de agua transporta partículas sólidas que desgastan la superficie. La magnitud de la erosión, depende de las características tanto mecánicas del flujo (velocidad), como de las características de las partículas sólidas (cantidad, tamaño, forma y dureza).

El fenómeno de cavitación, se debe a la formación de burbujas cuando la velocidad del agua es alta y se dan diferencias de presión entre el flujo y el vapor. Las burbujas se crean cuando la presión de vapor es mayor que la presión del flujo, estas burbujas viajan hasta llegar a una zona de alta presión de flujo, en donde estallan bruscamente generando una onda explosiva que produce picaduras y cavidades en el concreto. Este fenómeno es propio de conducciones, túneles, vertederos, disipadores de energía y presas de concreto.

c) Físicos

Las acciones físicas que experimenta el concreto, específicamente los cambios de humedad y temperatura, presentan como principal manifestación los cambios volumétricos que provocan fisuras o agrietamientos. Estas fisuras afectan la masa, el peso unitario, la porosidad, la permeabilidad y por consiguiente la resistencia del elemento estructural.

-Fisuras por cambios de humedad

Las fisuras que se producen por la presencia alterna de humedad del entorno, tienen la característica que atraviesan la pasta de cemento y no al agregado. En estructuras que se encuentren en contacto con agua, principalmente obras hidráulicas, como pilotes o fundaciones de puentes, embalses, presas y conducciones; pueden existir tres zonas de deterioro:

El área del elemento que nunca se encuentra en contacto con el agua, puede sufrir cualquier tipo de patología por la acción de sustancias ambientales agresivas (ácidos, sales, microorganismos) o por cambios de temperatura.

El área de la estructura que sufre un mayor deterioro, es la que se encuentra donde se producen los cambios de nivel del agua; ya que se combinan los efectos de las acciones de la primera zona y el microfisuramiento producto de los ciclos de humedecimiento y secado, complicados por la acción erosiva de las corrientes de agua y la aspersion.

La zona que se encuentra permanentemente sumergida en el agua puede padecer patologías dependiendo de la permeabilidad y porosidad del elemento de concreto y de las características químicas del agua que lo rodea.

En la figura 12 se muestra los efectos de los cambios volumétricos causados por la humedad.



Figura 12 Esquema de deterioro causado por cambios de humedad

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

-Fisuras por cambios de temperatura

Las fisuras producidas por los cambios de temperatura, generalmente afectan tanto la pasta de cemento como los agregados. Entre los mecanismos de daño producidos por cambios bruscos de temperatura (mayores a 20°C, según Sánchez, 2002), se pueden considerar los siguientes:

-Dilatación y contracción por cambios diarios de temperatura:

El concreto al igual que la mayoría de materiales, se expande cuando la temperatura aumenta y se contrae cuando disminuye. El gradiente de temperatura que produce estos efectos, se presenta en regiones donde la radiación solar es intensa por la mañana y en la noche o tarde se presentan vientos o lluvia que bajan las temperaturas ambientales. Si el elemento estructural es lo suficientemente esbelto, puede experimentar el fenómeno de alabeo, ya que en donde se tiene una mayor temperatura

se presentan esfuerzos de tensión, mientras que en donde se tiene una menor temperatura el elemento se comprime. Este fenómeno se presenta comúnmente en pisos, pavimentos y muros esbeltos, en donde se observan agrietamientos por tracción.

-Ciclos de hielo y deshielo:

Se presentan tanto en lugares en donde hay una estación de invierno con heladas, como dentro de cámaras de congelación (cuartos fríos de supermercados o industrias). Los daños en la matriz de concreto se agravan conforme el cambio de temperatura sea mayor y la saturación del material supere el 85%; esto al tomar en cuenta que el mecanismo de falla, se presenta cuando el agua que está dentro de los poros se congela y aumenta su volumen aproximadamente en un 9%, provocando esfuerzos de tracción entre la pasta y el agregado, los cuales producen el agrietamiento a lo largo de la profundidad del elemento y la deslaminaciones superficial. En la figura 13 se muestra un esquema del deterioro provocado por ciclos de hielo y deshielo.

Los agregados gruesos con alta absorción y porosidad se saturan fácilmente con el agua que proviene del exterior, lo cual contribuye al deterioro del concreto, ya que sufren cambios de volumen internos (igual que la matriz de cemento) que provocan que el agregado se desintegre.

- Ataque por fuego:

La resistencia mecánica del concreto se puede ver seriamente afectada por la acción del fuego, al dañar la estructura por la descarbonatación y el aumento de porosidad por microfisuramiento. En cualquier incendio que se alcancen temperaturas superiores a los 300°C, se producen en los elementos de concreto un descenso en la resistencia y en el módulo de elasticidad y un aumento en las deformaciones. Además, el agua aplicada rápidamente por los bomberos, produce humedad excesiva que acelera el proceso de agrietamiento y los descascaramientos superficiales.

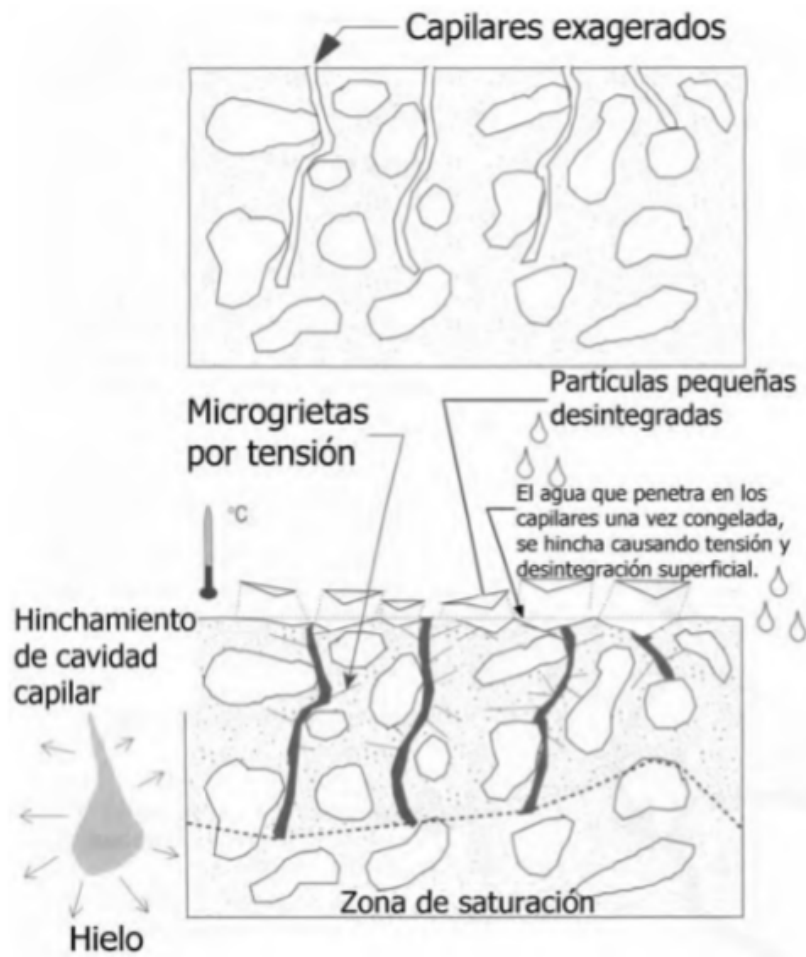


Figura 13 Esquema de deterioro causado por ciclos de hielo y deshielo

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

En el esquema de la figura 14 se observa la magnitud del daño estructural, depende de la temperatura alcanzada en el incendio.

RANGO TEMPERATURA (°C)	COLORACIÓN SUPERFICIAL	DAÑO
0 – 300	Gris natural	Calcinación incipiente: Microfisuras y mapeo superficial
300 – 600	Rosado	Calcinación superficial: Fisuración térmica por alabeo y descarbonatación superficial
600 – 900	Gris claro	Calcinación avanzada: Descarbonatación profunda y pérdidas de masa por descascaramiento
> 900	Blanco o amarillo claro	Calcinación muy avanzada: Descarbonatación avanzada y pérdida de masa

Figura 14 Esquema Temperatura, color y daño en el concreto por incendio
Fuente: Adaptado de Sánchez de Guzmán (2002)

d) Biológicos

La presencia de organismos y microorganismos de origen vegetal o animal en la superficie de una estructura de concreto, no solo afectan la estética de la obra, sino que puede producir daños y deterioros físicos, mecánicos, químicos y biológicos. Por ejemplo, la vegetación y los microorganismos asociados a la misma, pueden retener y generar humedad (ciclos de humedecimiento y secado), además las raíces pueden penetrar y crecer dentro de los poros del concreto causando grietas por las fuerzas de expansión internas. En el desarrollo de la vida de las plantas y microorganismos, se generan sustancias que pueden causar ataques químicos, como los ácidos húmicos y sales producto de la descomposición vegetal.

Las condiciones que favorecen el establecimiento y desarrollo de microorganismos de origen vegetal y animal, son las siguientes:

- La presencia de agua: cualquier tipo de vida necesita la presencia de agua para desarrollarse. El agua puede provenir tanto del medio ambiente, como de los poros del concreto.

- La disponibilidad de nutrientes: algunos gases contaminantes producto de procesos de combustión se constituyen en alimento para bacterias y hongos. Además, la cal y algunos minerales del concreto, son fuente de nutrientes para ciertos microorganismos.

- Condiciones ambientales: las bacterias aeróbicas requieren concentraciones de oxígeno superiores a 1 g/l, mientras que las anaeróbicas requieren apenas 0,1 g/l de oxígeno. La temperatura ambiental entre 20 y 35°C y la humedad relativa superior al 80%, favorece el desarrollo de bacterias.

- Superficie de colonización: se facilita la creación de colonias de microorganismos en superficies rugosas o ásperas, que ofrecen la posibilidad de anclaje.

Algunas obras civiles se distinguen por la presencia de agua, nutrientes, condiciones ambientales de temperatura y humedad, que facilitan la proliferación de microorganismos. Entre las estructuras mencionadas, se encuentran las relacionadas con la industria de alimentación, sistemas de tratamiento de aguas residuales, procesamiento de materia orgánica y almacenamiento de hidrocarburos. El principal mecanismo de meteorización y deterioro de origen biológico es el ataque que producen las sustancias ácidas provenientes de la acción metabólica de los microorganismos y los productos de la degradación de hidrocarburos.

Los ácidos disuelven la pasta de cemento y algunos agregados, además favorecen la corrosión del acero de refuerzo. Entre las sustancias agresivas producto del metabolismo de las bacterias, se tienen: el ácido sulfúrico, nítrico, cítrico, acético y húmico. Algunos microorganismos, tienen la capacidad de oxidar los hidrocarburos en

medios acuosos, produciendo dióxido de carbono, metano, sales solubles, benceno, tolueno, hierro reducido y ácido acético.

En la figura 15 se muestra específicamente el tipo de microorganismo y la acción de deterioro generada sobre las secciones de concreto.

El fenómeno de bioerosión, es un mecanismo de deterioro que se da en el caso específico del medio marino y es causado básicamente por tres organismos biológicos:

- Microorganismos endolíticos (líquenes): penetran el concreto hasta 1 mm atacándolo químicamente.

- Organismos bioabrasionadores (moluscos): capaces de realizar una abrasión superficial en toda la sección de concreto.

- Organismos bioperforadores: generan cavernas mediante la combinación de la acción química y mecánica, debilitando la estructura y dando paso al agua de mar dentro de la estructura.

Estos organismos aceleran el proceso de carbonatación propio de una estructura marina.

MICROORGANISMOS	ACCIONES
Bacterias	La mayoría necesita CO ₂ para sus procesos metabólicos y excretan ácidos orgánicos, oxidan el azufre en sulfato, el cual se mezcla con el cemento para formar sulfato de calcio que produce ataque de sulfatos en el concreto. Además, forman nitratos, ácido sulfúrico, ácido acético y gas sulfhídrico causante de corrosión del acero.
Hongos	Los hongos son vegetales inferiores abundantes en el suelo y aire. Producen daños mecánicos por el agrietamiento que causa el crecimiento de raíces dentro del concreto, además de ataque de ácidos orgánicos y formación de manchas y moho.
Algas, líquenes y musgos	Son organismos vegetales (plantas) relacionadas con medio acuático. Utilizan el calcio y magnesio del cemento como alimento, generan grietas y fisuras que facilitan la entrada de sustancias agresivas.

Figura 15 Tabla de microorganismos y acciones sobre el concreto
Fuente: Adaptado de Piedrahita (2004) y de Sánchez de Guzmán (2002)

2.2.4.2 Agentes Internos

-Reacción álcali – agregado (RAA)

En el año 1940, el norteamericano Thomas Stanton, demostró que ciertos agregados reaccionaban internamente con la pasta de cemento, provocando degradación, expansión y agrietamiento de los elementos de concreto. Se estableció que el fenómeno se da en cementos con altos contenidos de álcalis (óxidos de sodio y potasio), por lo que se le dio el nombre de álcali – agregado. Para que se presente la reacción se tiene que dar cierta concentración de álcalis (NaOH y KOH) en los poros del concreto, sumado a la reactividad de los minerales de los agregados y a la condición de humedad del concreto. Por lo tanto, existen altas posibilidades que ocurra una reacción álcali – agregado, en un concreto con alta concentración de álcalis, constituido por agregados reactivos y expuestos a un ambiente húmedo.

En la figura 16 se muestran los agregados y minerales potencialmente reactivos al álcalis del cemento.

AGREGADOS	MINERALES
Vidrios volcánicos	Cuarzo
Riolitas	Ópalo
Latitas	Calcedonia
Dacitas	Tridimita
Areniscas	Cristobalita
Calizas dolomíticas	Andesita
Filitas	Heulandita
Gnesis	Dolomita

Figura 16 Tabla de algunos agregados y minerales potencialmente reactivos

Fuente: Sánchez de Guzmán (2002)

Entre las reacciones álcali – agregado, se distinguen tres tipos:

Álcali – Sílice:

Algunos tipos de agregados contienen sílice reactivo, el cual forma silicatos alcalinos (gel silicoso) en la pasta del cemento, capaces de absorber agua a través de ósmosis, ejerciendo grandes presiones en los poros del concreto, causando fisuras por expansión. Los factores que definen la velocidad del fenómeno son: la humedad, la temperatura, la cantidad y granulometría de los agregados reactivos y la concentración de álcalis en los poros del concreto.

En la figura 17 se muestra un esquema del deterioro causado por la reacción álcali-agregado

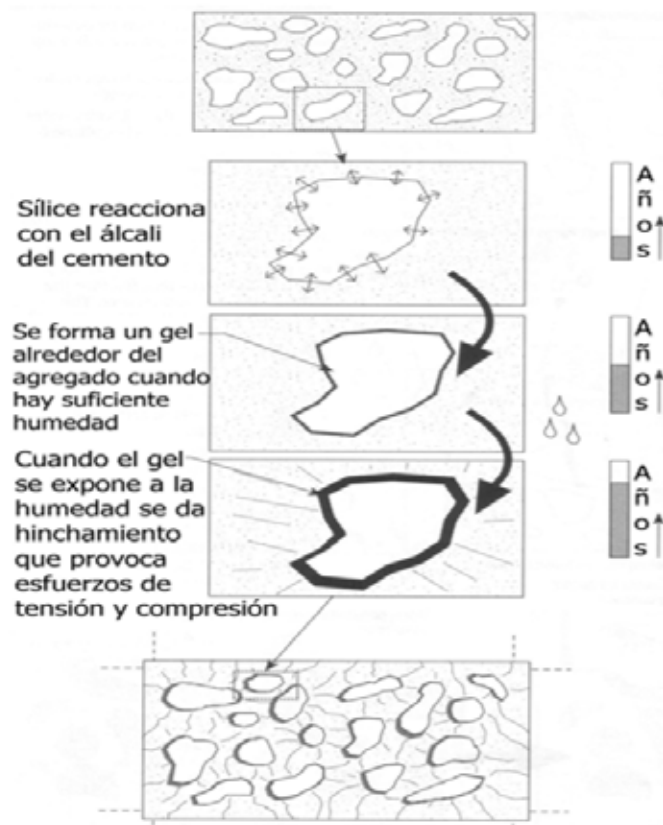


Figura 17 Esquema de deterioro causado por la RAA

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

Entre las reacciones álcali – agregado, se distinguen tres tipos:

Álcali – Sílice:

Algunos tipos de agregados contienen sílice reactivo, el cual forma silicatos alcalinos (gel silicoso) en la pasta del cemento, capaces de absorber agua a través de ósmosis, ejerciendo grandes presiones en los poros del concreto, causando fisuras por expansión. Los factores que definen la velocidad del fenómeno son: la humedad, la temperatura, la cantidad y granulometría de los agregados reactivos y la concentración de álcalis en los poros del concreto.

Álcali – Carbonato:

Los agregados calizos del tipo dolomita, producen brucita y ciertos álcalis que expuestos a la humedad, aumentan de volumen induciendo esfuerzos internos de tracción dentro del concreto, ocasionando fisuras y agrietamiento.

-Formación de etringita diferida (FED)

Es una reacción sulfática interna, capaz de afectar el concreto sin necesidad de requerir una fuente externa de sulfatos, en algunos casos se asocia con la reacción álcali agregado (RAA). La FED provoca una expansión severa cuando el concreto está endurecido, que genera un agrietamiento alrededor de los agregados. La principal manifestación de la FED son grietas en forma de mapa en la superficie del elemento estructural. Durante el proceso de hidratación del concreto es normal que se presente la formación de etringita (sulfoaluminato de calcio), la cual genera expansión en el estado plástico del concreto.

Según el estudio de Divet (2003) de cinco obras masivas de concreto, la FED se podría presentar cuando se tienen los siguientes factores:

- La temperatura del concreto excede los 60 °C durante el colado
- El elemento de concreto es masivo (muros, pilas y losas de puentes)
- Utilización de cemento con alto contenido alcalino (SO₃, C₂S y C₃A)
- Las condiciones de temperatura y humedad ambiental elevada

- Emplear agregados contaminados con piritas que poseen contenidos elevados de sulfatos

-Contracción por secado

La contracción por secado, se conoce como retracción hidráulica y consiste en la disminución de volumen del concreto endurecido, cuando la mayor parte del agua evaporable de la mezcla se libera. La contracción de un concreto normal, varía entre 0,2 y 0,7 mm por metro lineal. La evaporación depende de factores externos al concreto, tales como: la velocidad del viento, la temperatura y la humedad del ambiente; también de las condiciones de curado. Sin embargo, también depende de factores propios de la composición del concreto, tales como:

- Contenido de cemento: un concreto con una excesiva cantidad de cemento, presenta una mayor dilatación y contracción.

- Cantidad de agua: a mayor contenido de agua de mezclado, mayor será el agua evaporable durante el fraguado y mayor es la contracción del concreto, generando un concreto poroso y muy permeable.

- Naturaleza del agregado: el agregado compacto, rugoso y duro como los granitos y algunas calizas, generan una interface de adherencia entre la pasta y el agregado, que logra controlar la contracción. Mientras que los agregados como las pizarras y areniscas, absorben el agua y producen contracciones de dos a tres veces mayores que las de un concreto normal.

En la figura 18 se muestra un esquema de la contracción por secado en un elemento de concreto.

2.2.5 Simulación de COMSOL Multiphysics

Comsol es un software para modelado, análisis y simulación de fenómenos físicos 3D en ingeniería, como problemas con fluidos, estructurales , térmicos , electromecánicos entre otros, que permite definir la geometría 3D especificando cargas, materiales, flujos y la visualización previa del análisis para luego ejecutar el pos proceso y ver reportes finales.

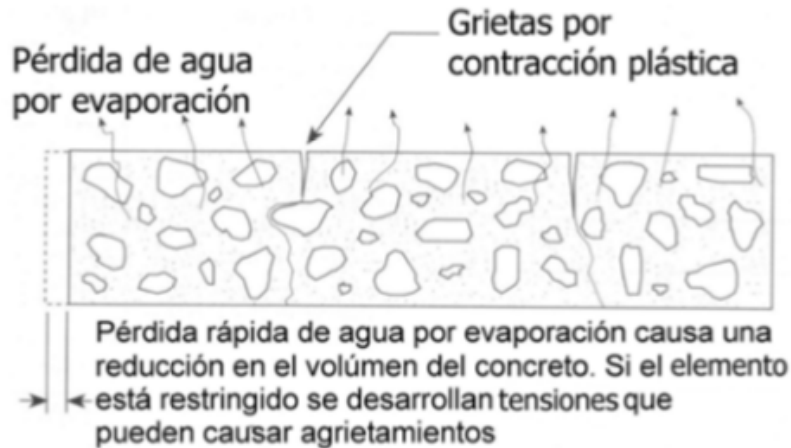


Figura 18 Esquema de contracción por secado en el concreto

Fuente: Adaptado de Emmons (1993)

La mayoría de la corrosión se produce debido a los procesos de reacción electroquímicas que tienen lugar bajo el agua y en ambientes mojados o húmedos; el módulo de corrosión permite a los ingenieros y científicos investigar estos procesos, se adquiere una comprensión de la forma en que podría producirse la corrosión durante la vida útil de una estructura e implementar medidas preventivas para impedir la corrosión electroquímica, con el fin de proteger las estructuras. El módulo puede ser utilizado para simular la corrosión a microescala con el fin de investigar los mecanismos fundamentales de esta, y a gran escala para determinar cómo proteger masivamente de la corrosión a grandes estructuras.

2.2.5.1 Funciones e interfaces para la corrosión en COMSOL Multiphysics

El módulo de corrosión incluye funciones, interfaces y ejemplo de modelos que permiten un enfoque directo a la simulación de todos los procesos de corrosión electroquímica como la corrosión galvánica, pitting y la corrosión de la grieta. El transporte corrosivo y el material corroído se consideran a través de la modelización dinámica de los cambios en la superficie de la corrosión y el electrolito en contacto con dicha superficie; el módulo de corrosión incluye interfaces estándar para el modelado

del potencial de corrosión y las distribuciones actuales de los procesos de corrosión. Las reacciones electroquímicas se resuelven por completo junto con potenciales eléctricos en los electrolitos y estructuras metálicas, las reacciones químicas homogéneas y fenómenos únicos para los procesos de corrosión tales como el cambio de la forma de una superficie de metal debido a la corrosión.

2.2.5.2 Optimización de los sistemas de protección a la corrosión

El Módulo de corrosión también permite diseñar sistemas eficaces de protección contra ella; esto incluye la protección catódica por corrientes impresas (CIPC), ánodos de sacrificio y protección anódica, dónde la corriente anódica está impresa en el material corrosivo para forzar la pasivación (formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material). Al utilizar el módulo de corrosión para investigar los mecanismos de protección específica a microescala, pueden extraerse parámetros que pueden ser usados para simular grandes estructuras, por ejemplo el crecimiento de las películas de hidróxido en las estructuras protegidas. Al identificar las regiones en las estructuras que son susceptibles a la corrosión acelerada, se puede especificar la ubicación de los ánodos de sacrificio, y donde las corrientes de protección catódica o anódica deben ser impresas.

2.3 Definición de términos

Abrasión: Acción de quitar o arrancar algo mediante fricción

Aeróbico: Organismos que pueden vivir o desarrollarse en presencia de oxígeno diatómico

Anaeróbico: Organismos que pueden vivir o desarrollarse sin la presencia del oxígeno

Carbonatación: La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio (con alto pH) a carbonato de calcio, el cual tiene un pH más neutral.

Corrosión: La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión.

Durabilidad: La durabilidad hace referencia a la condición de duradero o durable: es decir, que puede durar una gran cantidad de tiempo

Patología estructural: La Patología estructural es el estudio sistemático y ordenado del comportamiento irregular de una estructura o sus elementos, cuando presenta algún tipo de falla o daño, causado por factores internos o externos que no garanticen su seguridad (Enfermedad).

Pitting: Término inglés, generalizado para designar un tipo de desgaste especial de las superficies metálicas sometidas a condiciones de trabajo rigurosas.

Simulación: En la ciencia, la simulación es el artificio contextual que refuerza la investigación de una hipótesis. Es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital.

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

En el desarrollo del marco metodológico, se hace referencia al “conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas” (Arias, 2006, p.16). El propósito del presente trabajo de grado consiste en la implementación de un sistema de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales, para detectar las causas que promueven el deterioro de la infraestructura y hacer un rediseño de la misma. En este orden de ideas y haciendo foco en dicho propósito, se presentan a continuación el tipo, diseño, nivel y fases metodológicas de la investigación, los cuales definirán las herramientas a utilizar para poder llevar a cabo el objetivo planteado, garantizando la optimización de los diseños y la prevención de patologías.

3.1 Tipo de investigación

Este proyecto se realizará bajo la modalidad de un proyecto factible el cual, según la Universidad Pedagógica Experimental Libertador, UPEL (1998) se define como un estudio que “consiste en la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales”. De este mismo modo según la Universidad Simón Rodríguez (1980) se considera que un proyecto factible “está orientado a resolver un problema planteado o a satisfacer las necesidades en una institución”. Definido esto, la razón por la cual la presente investigación se trata de un proyecto factible es porque este tendrá un propósito de utilización inmediata destinado a atender necesidades específicas, a partir de un diagnóstico de patologías que permitirá desarrollar nuevas técnicas que permitan mejorar el diseño de las estructuras.

3.2 Nivel de investigación

De acuerdo con Morales, V (1994) una investigación explicativa es “aquella que está dirigida a tener un conocimiento general o aproximado de la realidad”, por otro lado, según el mismo autor, una investigación descriptiva es “un método científico que

implica observar y describir el comportamiento de un sujeto para tratar de obtener información acerca de del mismo, sin influir sobre él de ninguna manera”. La presente investigación tiene un nivel explicativo-descriptivo debido a que se busca explicar cuáles son las causas que generan las patologías en las infraestructuras, con el fin de comprender mejor el fenómeno involucrado y de lograr desarrollar un método que permita prevenir este tipo de fallas.

3.3 Diseño de la investigación

El diseño de investigación se refiere a la estrategia que adopta el investigador para responder el problema planteado en el estudio. Según los autores Palella, S y Martins, F (2010) la investigación de campo “consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, con el fin de estudiar los fenómenos involucrados en su ambiente”. Arias, F (2012) define a la investigación de campo como “aquella que consiste en la recolecta de datos de donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar variables, es decir, el investigador obtiene la información pero no altera las condiciones existentes” de allí su carácter de investigación no experimental, la cual según Palella, S y Martins, F (2010) “es la que se realiza sin manipular de forma deliberada ninguna variable, se observan los hechos tal y como se muestran en su contexto real para luego analizarlos”.

Tomando en cuenta lo anterior expuesto, el presente trabajo especial de grado se califica como una investigación de campo no experimental, debido a que se deberá observar las variables que influyen en el proceso degenerativo de las estructuras , para determinar cuáles son las causas y su comportamiento; y poder en función de esto simular para estudiar el comportamiento a través del tiempo poder rediseñar las estructuras para así atacar las causas y buscar formas de prevenir la corrosión estructural, es decir la implementación de un método de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales, de esta manera solucionar el problema ilustrado.

3.4 Población y Muestra

Tamayo y Tamayo, (1997) establecen que “la población se define como la totalidad del fenómeno a estudiar donde las unidades de población poseen una característica común la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” (p.114), en otras palabras, la población es un conjunto de individuos de la misma clase, limitada por el estudio. De esta forma para el presente trabajo especial de grado, la población está conformada por todas las regiones (costa, llano, andina) que conforman el país Venezuela. Del mismo modo, de acuerdo con los autores previamente citados, la muestra “es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico” (p.38), esta permite determinar la problemática, ya que tiene la capacidad de generar los datos con los cuales se identifican las fallas dentro del proceso. En base a esto, la muestra estará conformada por las zonas que conforman la región de la costa de Falcón debido a que esta área contiene una serie de propiedades que ayudan a estudiar las patologías estructurales.

3.5 Técnica e instrumentos de recolección de datos

Arias, F (2006) define las técnicas de investigación como las que “constituyen el camino hacia el logro de los objetivos planteados para resolver el problema que se investiga”, es decir, son las distintas maneras, formas o procedimientos utilizados por el investigador para recopilar u obtener los datos o la información que se requiere. En el mismo orden de ideas, Sabino (2000) establece que los instrumentos de investigación “son los recursos de que puede valerse el investigador para acercarse a los problemas y fenómenos, para extraer de ellos la información sobre un problema determinado”.

Las técnicas e instrumentos que servirán para el cumplimiento de objetivos en el presente trabajo especial de grado son las siguientes:

- **Revisión y análisis documental:** la cual forma parte integral de todo el proceso de investigación. El horizonte desde el cual se construye la exploración de la literatura es el de la constitución de un referente teórico que sirve de guía indicativa y provisional para apoyar la construcción conceptual.

- Herramientas estadísticas: Para el levantamiento, análisis e interpretación de datos y de esta manera observar las causas que afectan el desarrollo de patologías, con el fin de implementar posibles soluciones dirigidas a la problemática, garantizando la prevención sobre las mismas.
- Datos secundarios internos: Recolección de datos y tablas provenientes de métodos de prevención similares, esto hace referencia a los estudios y evaluaciones anteriormente realizadas en el área, con la finalidad de obtener las herramientas adecuadas según las necesidades presentes.
- Datos Secundarios externos: Tal como es el caso de los libros de texto o en línea, manuales y otros trabajos de grados, con el objetivo de obtener información que sirva de ayuda para el desarrollo del sistema de detección y prevención.

3.6 Fases de la investigación

Fase I: “Diagnostico de las causas que generan patologías en las estructuras metálicas y no metálicas”

A través de los diferentes antecedentes seleccionado y apoyados por material bibliográfico técnico sobre patologías más comunes en los sistemas estructurales, se identificarán las fallas que se presentan en las estructuras actuales ubicadas en la zona de costa de Venezuela y por medio de las referencias documentales se analizarán las patologías que se ubican en esta zona y estudiar el origen de las mismas.

Fase 2: “Simulación del estado actual de las estructuras para evaluar las causas que generaron las fallas”

Luego de estudiar y conocer las condiciones en las cuales las patologías estructurales se presentan, se diseñará el modelo a estudiar por medio de la herramienta computacional COMSOL Multiphysics la cual permitirá establecer parámetros dimensionales y condiciones del ambiente para simular los entornos más agresivos y observar cómo se comportan los cuerpos en este medio, a fin de manejarlos como data necesaria para realizar los objetivos del proyecto de investigación.

Fase 3: “Describir un sistema de prevención que considere los fallos anteriores para rediseñar las estructuras nuevas”

Sabiendo ya como atacan las patologías a las estructuras y el daño que causa por medio de la documentación se buscaran las mejores técnicas y controles de calidad para garantizar que las estructuras preserven su vida útil a través del tiempo, estas técnicas se aplicaran en la etapa inicial del proyecto y se tomaran en cuenta las variables que más afectan al diseño.

Fase 4: “Evaluación de la nueva simulación para estudiar los resultados obtenidos y verificar la eficiencia del rediseño”

Por ultimo teniendo en cuenta las nuevas condiciones y con la información recolectada se realizara una nueva simulación con nuevos parámetros y ver como el objeto de estudio es afectado y analizar la información que arroje el programa COMSOL Multiphysics, gracias a los nuevos resultados es posible compararlos con los resultados anteriores y verificar si es factible el rediseño.

CAPÍTULO IV RESULTADOS

En este capítulo se desarrollan las fases de la investigación planteadas anteriormente, con la finalidad de cumplir con el objetivo general de la misma, el cual consiste en desarrollar un sistema de detección y prevención de patologías en sistemas estructurales.

4.1 Detección de las Patologías

Es importante resaltar que cada entorno posee propiedades y características diferentes que pueden afectar directamente a la integridad de las estructuras, en este caso de estudio se consideró un ambiente hostil para las estructuras tanto urbanas como industriales, en donde se pueda observar las variables que más afectan y promueven la proliferación de patologías en estructuras. El ambiente de costa ubicado en el estado falcón posee características interesantes de estudiar ya que además de poseer un alto grado de salinidad se cuenta con ráfagas de viento que aceleran el proceso de corrosión y temperaturas elevadas, cada una de estas variables tienen que ser tomadas en cuenta para iniciar un proceso de diseño eficiente que permita colocar en servicio las estructuras nuevas sin necesidad de tener costos adicionales por mantenimientos innecesarios o prematuros.

Características del estado Falcón

Se recomienda iniciar con el reconocimiento de la zona para conocer las posibles amenazas. En este caso se estudiara las condiciones que ofrece la zona de costa del estado Falcón como se muestra en la figura 19.

Límites:

Norte: Mar Caribe y el Golfo de Venezuela

Sur: Estados Zulia, Lara y Yaracuy

Este: Mar Caribe

Oeste: Golfo de Venezuela y parte del estado Zulia



Figura 19 Ubicación Geográfica Estado Falcón

Fuente: www.venezuelatuya.com

Hidrografía:

Los escasos recursos hídricos se concentran en las vertientes sureste y noroeste de la sierra. La mayor parte de los ríos son de poco caudal, con excepción del Tocuyo y el Maticora. Los tributarios y quebradas se distribuyen en las cuencas de los ríos Yaracuy, Aroa, Tocuyo-Araurina, Hueque, Mitare, Paraíso, Maticora y Sanare, que ocurren hacia las vertientes del golfo de Venezuela y del mas Caribe.

Suelo:

En la línea costera son calcáreos contienen frecuentemente más de 15% de CaCO_3 , y entre las serranías de Lara y Falcón son fanco-arcillosos. Las limitaciones de los suelos áridos y semiáridos provienen de la salinidad, el déficit hídrico provocado por la poca precipitación, la baja concentración de materia orgánica y la influencia de agentes climáticos como el viento.

Clima:

El clima de la entidad es semiárido, bastante seco, excepto en la zonas que se despliega entre Tucaras, San Juan de los Cayos y Mirimire, y en las laderas de la serranía de San Luis. Las precipitaciones son escasas hacia la costa, con medias anuales de 800 a 1.200 mm en las áreas de mayor altura. La época de lluvias es bastante corta, de octubre a diciembre. La temperatura promedio del estado, en las llanuras costeras

es de 28,7°C con picos de hasta 34°C, y desciende en las zonas montañosas a 21,2°C. Los vientos alisios actúan constantemente sobre el litoral, con velocidades de 17 km/h hasta 29 km/h.

Evaporación:

La evaporación presenta el mayor total promedio mensual entre los meses de julio y agosto (Riecito = 182,1 mm; Tocuyo de la Costa = 201,8 mm). El menor volumen se obtiene en el mes de diciembre (Riecito = 130,4 mm~ Tocuyo de la Costa = 160,3 mm). La evaporación total anual promedio es del orden de los 2.166 y 1.912 mm en las estaciones del Tocuyo de la Costa y Riecito respectivamente.

Humedad Relativa:

El promedio de humedad relativa anual es de 84%.

Balance Hídrico:

El balance hídrico en el área de estudio varía mensualmente. La precipitación efectiva presenta un máximo en noviembre de (180,6 mm) y un mínimo en el mes de marzo de (5,5 mm). La evapotranspiración promedio mensual presenta un máximo en agosto (140,2 mm) y un mínimo en enero (105,1 mm). El déficit hídrico presenta un máximo en el mes de marzo (123,9 mm) y un mínimo en el mes de septiembre (70,3 mm).

Luego de detallar la zona se procede a realizar la inspección aplicando el siguiente instrumento como se muestra en la tabla 1. En la primera parte se recolectara toda la información posible de la estructura lo que permitirá tener una visión más amplia del lugar en donde se realizara un futuro proyecto. La técnica para recolectar la información es la inspección visual aunado al uso de equipos como cámaras fotográficas o cualquier instrumento que facilite la recolección de datos, dependiendo de la gravedad de la estructura se contara con personal más técnico especializado en tomar mediciones con equipo que requieren un poco más de experiencia tales como el ultra sonido o radiografía gamma. Para realizar la inspección se necesitan una serie de recursos fundamentales para la buena ejecución de la misma.

Recolección de datos		
Nombre del ejecutante:	Ci:	Fecha:
Información de la obra:		
Nombre de la obra		
Ubicación de la Obra		
Fecha de la construcción		
Características del medio ambiente:		
Velocidad promedio del viento		
Temperatura	Max:	Min:
Humedad relativa		
Características del agua en la región		
Tipo de sustancia agresiva presente		
Tipo de suelo		
Características del medio ambiente:		
Tipo de Concreto		
Tipo de acero		
Tipo de recubrimiento o aditivo		
Observaciones:		

Tabla 1 Instrumento de Recolección de Datos

Fuente: Toro, M (2019).

Definición de recursos:

Definir los recursos humanos adecuados para realizar el análisis e inspección in situ; tales como: personal especializado en servicios de topografía, técnicos de laboratorio y manejo de equipo y operadores de maquinaria si es necesario. Definir el tipo de equipo a utilizar en la inspección de acuerdo a las condiciones del sitio. Determinar el periodo de tiempo en el que se puede llevar a cabo el análisis sin provocar interrupciones en la operación o incomodidades a los usuarios del inmueble. Conocer la disponibilidad de agua y energía eléctrica.

Inspección:

El objetivo de la inspección es el de identificar y ubicar los elementos que presentan cualquier irregularidad o se encuentran afectados por algún mecanismo de daño. Para la ubicación efectiva de los elementos y determinar la severidad de los daños, es necesario realizar un levantamiento fotográfico exhaustivo y tener una buena documentación sobre las patologías que se puedan presentar en la zona para identificar y ubicar los principales fenómenos patológicos en los elementos de concreto o acero, tales como:

- Fisuras o agrietamientos
- Cambios de aspecto de la masa de concreto
- Deflexiones
- Aplastamientos
- Erosión
- Descascaramientos o deslaminaciones
- Polvo y cristalización en las superficies
- Ablandamiento o pérdida de rigidez
- Hinchamientos o expansiones
- Decoloración y manchas (eflorescencias)
- Meteorización
- Corrosión del acero de refuerzo u otros metales
- Deterioros biológicos

Además se debe registrar las filtraciones, derrames y defectos en los sistemas de conducción de agua o cualquier otra sustancia para poder valorar las condiciones de la estructura y usar esta información como base para prevenir en los nuevos diseños los mismos errores.

4.2 Simulación de la Patología

Con el fin de conocer la naturaleza de la patología y el daño que puede causar se procede a realizar una simulación con el programa COMSOL el cual permite por medio de una interfaz interactiva visualizar de forma más detallada y localizada los daños generados por la corrosión. Para ello se requiere de una serie de datos los cuales serán recolectados con el formato de recolección de datos presentado en la Tabla 1. Con los datos recogidos por medio de la inspección visual se puede realizar un modelado físico al cual se le añaden las características propia del entorno para posteriormente completar la simulación.

La corrosión es la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. La característica fundamental de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas anódicas y catódicas, esta condición se presenta en el ambiente de la costa debido a la presencia de sales minerales en el agua, esta agua está cargada de iones en su mayoría del ion de cloruro Cl lo que permite hacer de este medio un conductor transformando así al agua de mar en el perfecto electrolito para la existencia de una región anódica y catódica. La corrosión puede ser mediante una reacción química (óxido-reducción) en la que intervienen la pieza manufacturada, el ambiente y el agua o por medio de una reacción electroquímica.

Por otra parte en las zonas costeras, los iones de cloruros que se encuentran en el ambiente penetran en el hormigón destruyendo la capa protectora que cubre al acero y provocando una pequeña zona anódica con relación a la catódica, las condiciones desfavorables de la superficie producen una profunda y acelerada penetración de la corrosión en el acero de refuerzo como se ve en la figura 20. La presencia de cloruros

en el concreto puede provenir de sus componentes como en el cemento, agua, agregados, aditivos o también en el ambiente. El componente del cemento que reacciona con los iones de cloruro es el Aluminato tricálcico (C3A), formando Cloro aluminato cálcico lo cual provoca la disminución del pH provocando el medio ácido que genera la corrosión.

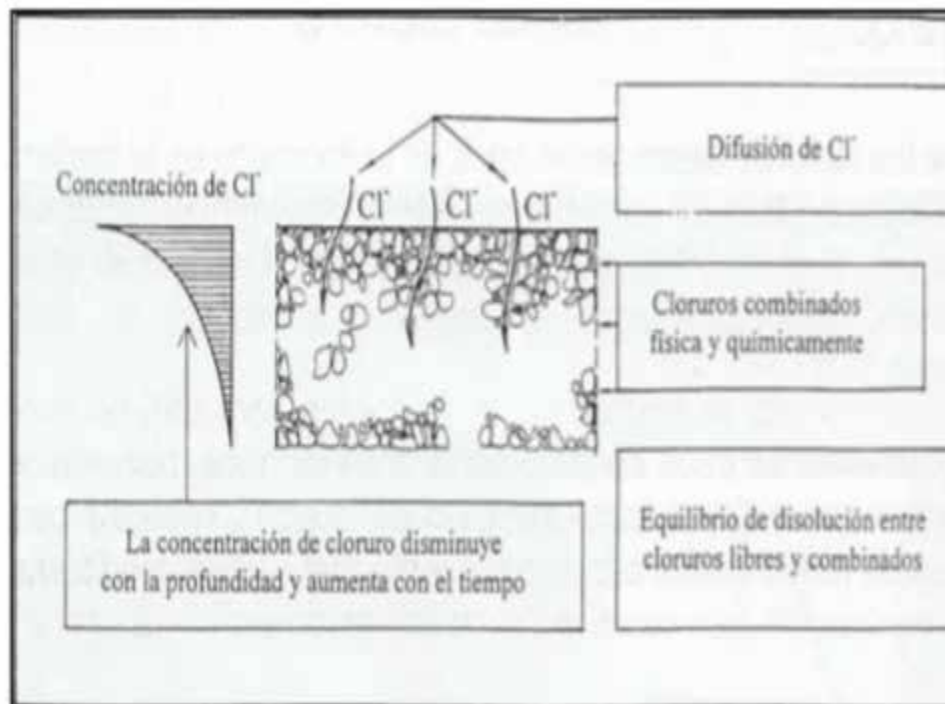


Figura 20 Fenómeno electroquímico de la corrosión por iones de cloruro

Fuente: Papper corrosión del acero por Paredes (2013)

Además cuando el CO_2 que es liberado de forma masiva en la atmósfera penetra en el hormigón y se produce una reacción entre los hidróxidos de la fase líquida intersticial y los compuestos hidratados del cemento, de tal manera que cuando todo el $Ca(OH)_2$, $Na(OH)$ y $K(OH)$ presentes en los poros han sido carbonatados, el pH empieza a decrecer, dando como resultado un medio ácido que produce un constante y progresivo efecto corrosivo en el acero. Estos dos efectos son el principal problema en la zona de la costa ubicada en el estado falcón, al existir estas dos propiedades se

presentan dos patologías muy focalizadas al mismo tiempo lo que acelera el proceso degenerativo de la estructura.

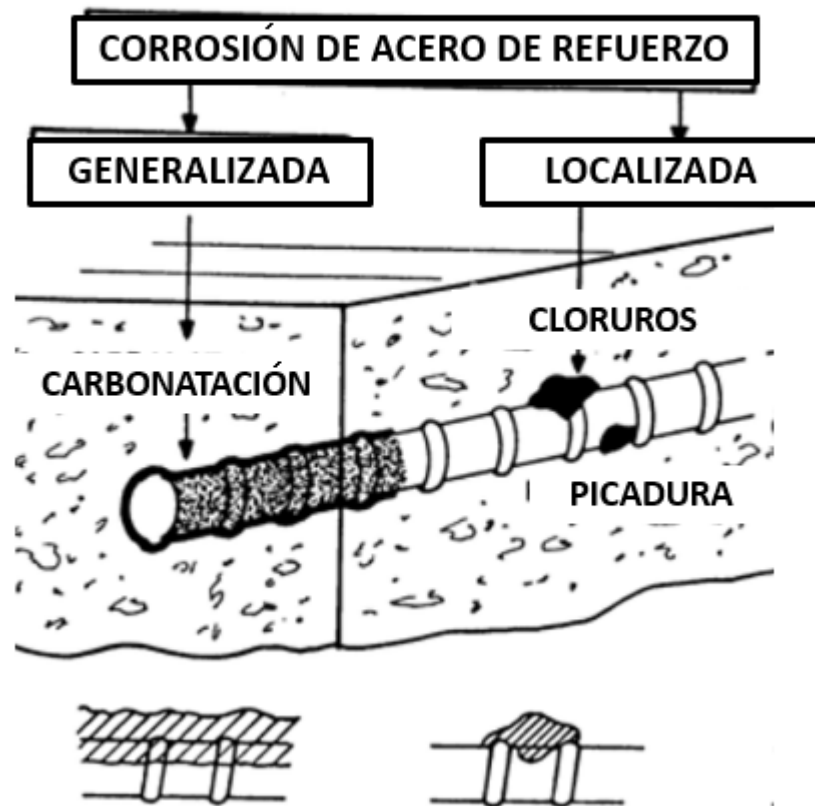


Figura 21 Efectos de la carbonatación y corrosión por ion Cl
Fuente: Papper corrosión del acero por Paredes (2013)

Para efectos prácticos se procederá a llenar la planilla de recolección de datos para un caso general donde la estructura a evaluar se encuentre en el estado falcón. Se llenara el formato y con los datos recolectados se procederá a realizar una simulación a un elemento que se encuentre bajo esas condiciones para este ejemplo será una columna debido a que es una estructura muy frecuente, gracias a la versatilidad del programa se pueden crear diversas geometrías que permiten evaluar las condiciones en las cuales se encuentra la estructura para así conocer la magnitud del problema.

Recolección de datos		
Nombre del ejecutante: Manuel Toro	Ci: 25455016	Fecha: -----
Información de la obra:		
Nombre de la obra	-----	
Ubicación de la Obra	Estado Falcón	
Fecha de la construcción	2009	
Características del medio ambiente:		
Velocidad promedio del viento	20 km/h	
Temperatura	Max: 34°C	Min:24°C
Humedad relativa	84%	
Características del agua en la región	Agua salada proveniente del mar	
Tipo de sustancia agresiva presente	No hay	
Tipo de suelo	Calcáreo con presencia de CaCO ₃	
Características del medio ambiente:		
Tipo de Concreto	Estándar con relación A/C 0.6	
Tipo de acero	SAE 1020	
Tipo de recubrimiento o aditivo	No posee	
Observaciones:		
Se observan varillas expuestas al ambiente Hay señales de eflorescencia Hacer el estudio en una columna con grieta y exposición de material de refuerzo		

Tabla 2 Instrumento de Recolección de Datos del estado Falcón
Fuente: Toro, M (2019).

La corrosión del acero de refuerzo en estructuras de concreto, es un fenómeno electroquímico que requiere un flujo eléctrico y algunas reacciones químicas para su desarrollo. Los tres elementos principales del proceso son el ánodo, el cátodo y la solución electrolítica presentes en la estructura, como se muestra en la Figura 22. El ánodo y el cátodo pueden estar presentes en la misma barra de acero de refuerzo o en barras adyacentes del armado. El ánodo es la localización donde la corrosión toma lugar y el elemento metálico, en éste caso el hierro, sufre una reacción de oxidación o reacción anódica debido a la pérdida de electrones, creando iones de hierro (Fe^{++}). El cátodo es la localización donde el hierro no es consumido debido a que el oxígeno, en presencia de agua, acepta electrones (reducción) formando iones hidroxilos (OH^-).

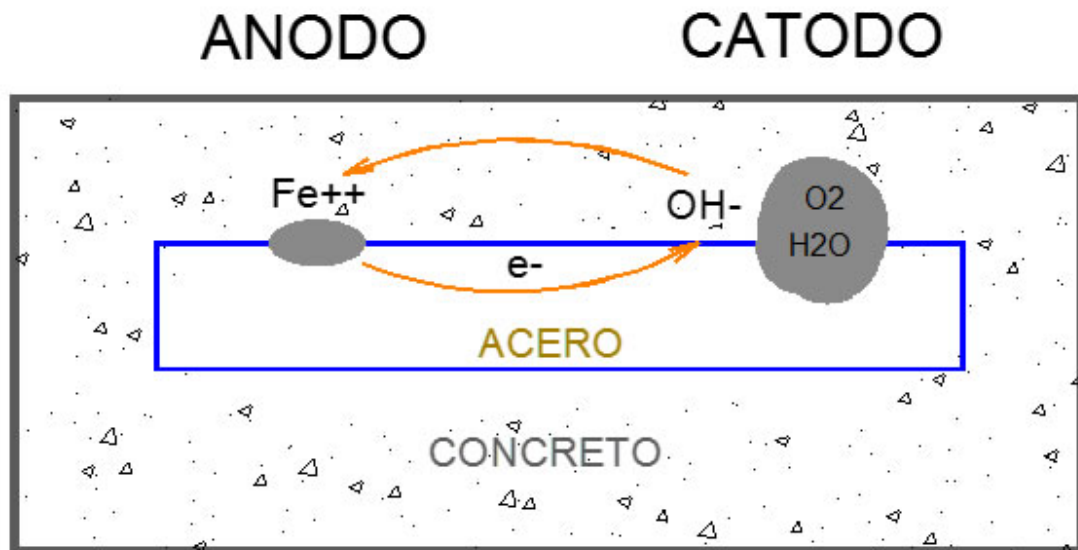


Figura 22 Corrosión en estructuras de concreto armado

Fuente: Identificación y evaluación del riesgo de la corrosión en estructuras, Guerrero (2016).

La solución electrolítica es el medio que facilita el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo, en consecuencia, en el caso del concreto, al ser expuesto a altos ciclos de humedad se crea una conductividad suficiente para que funcione como un electrolito, se usó un concreto húmedo y un acero 1020 . Bajo estas condiciones y con

las características anteriormente expuestas el resultado de la simulación sería el siguiente:

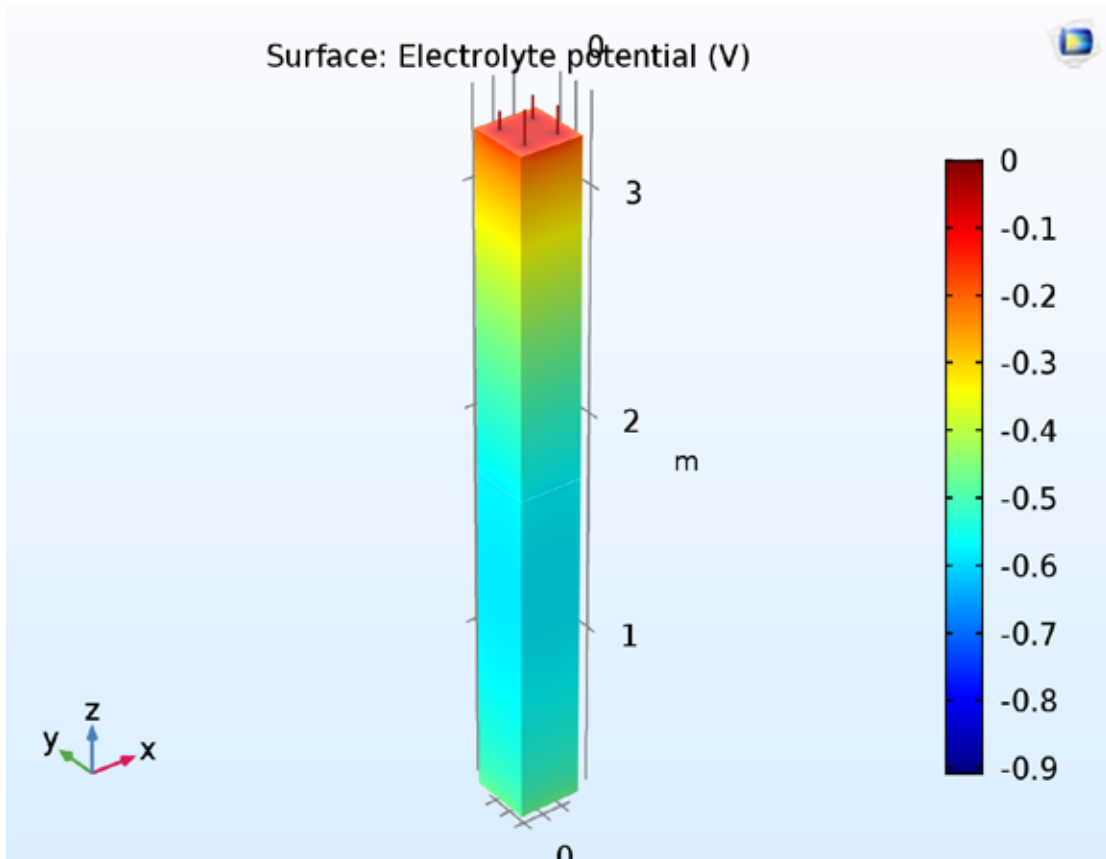


Figura 23 simulaciones de corrosión superficial de columna
Fuente: Toro, M (2019).

Los resultados que genera el programa son diversos y varían dependiendo de los requerimientos del usuario para esta muestra en la figura 23, 24 y 25 se estudió el comportamiento de la corrosión con distintos puntos de vistas para observar el cómo interactúa el medio con el material y se representó de la siguiente manera.

_Figura 23: estudio de la corrosión en la superficie del material de acuerdo al potencial eléctrico.

_Figura 24: comportamiento vectorial de los electrones.

_Figura 25: comportamiento de las líneas de flujo.

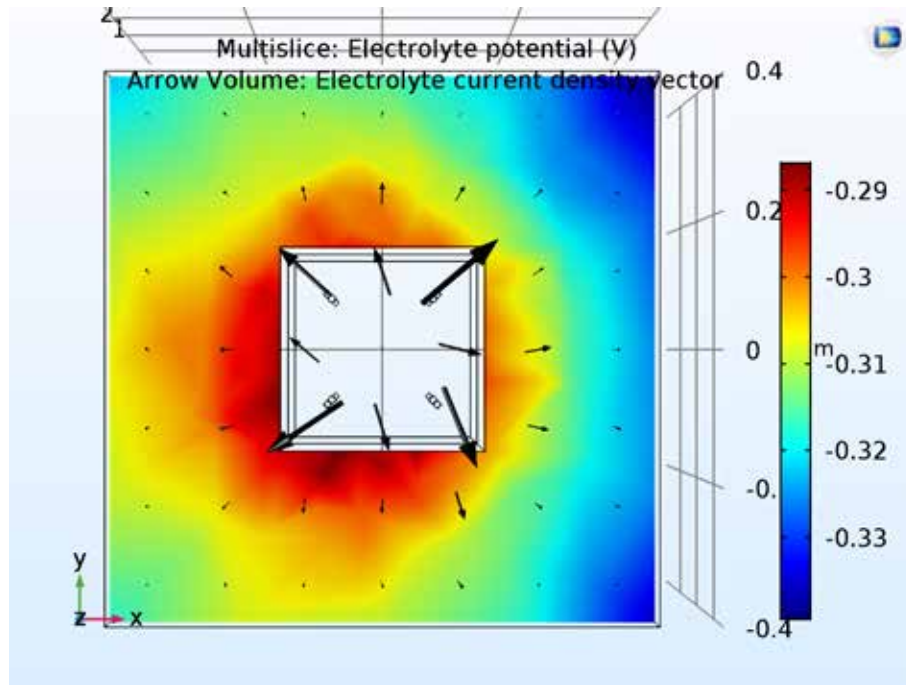


Figura 24 simulación de corrosión de columna, vectores de corriente
Fuente: Toro, M (2019).

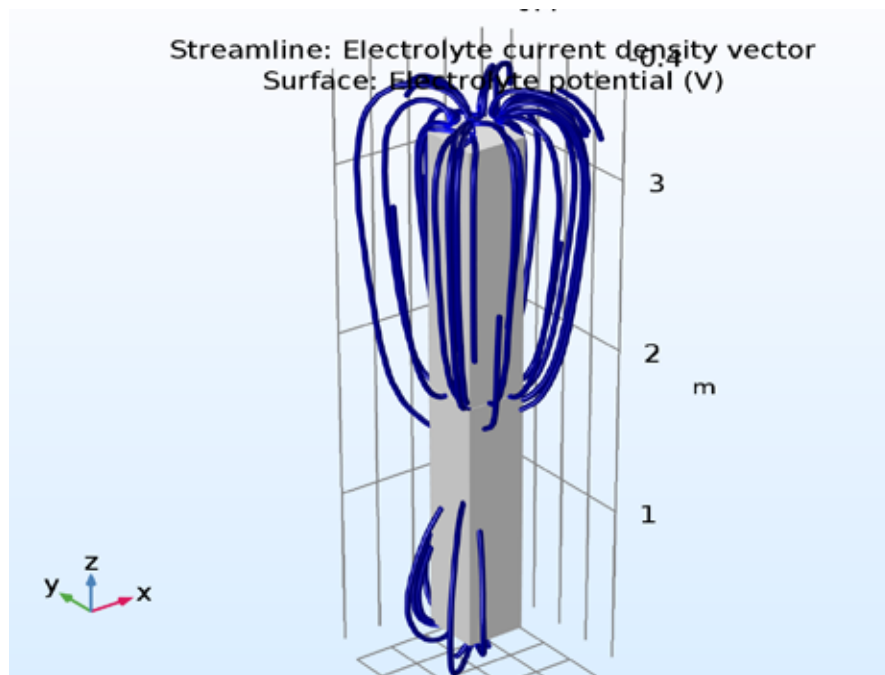


Figura 25 simulación de corrosión de columna líneas de flujo
Fuente: Toro, M (2019).

La tendencia de cualquier metal para reaccionar en un ambiente se indica por el potencial eléctrico que se desarrolla en contacto con el medio ambiente. En estructuras de concreto armado, éste actúa como un electrolito y el acero de refuerzo desarrolla un potencial dependiendo del entorno del concreto, que puede variar de un lugar a otro, el parámetro físico necesario para un ambiente marino y el cual se usa para generar la simulación es una densidad de corriente de $-0.2 \text{ [A/m}^2\text{]}$.

El proceso de corrosión del acero del concreto puede ser monitoreado con la medición del potencial eléctrico mediante el procedimiento conforme a ASTM C876 Método de Prueba Estándar para Medición del Potencial de Celda Media del Acero de Refuerzo en el Concreto. El principio de esta técnica es esencialmente la medición del potencial de corrosión de las barras de refuerzo con respecto a un electrodo de referencia estándar, se usa un electrodo cobre/sulfato de cobre (CSE). Según la norma ASTM C876, la probabilidad de corrosión del acero se muestra en la Tabla 2.

Voltaje medido vs Electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre(V)	Probabilidad de Corrosión
Menor a -0.35V	10% o menos
-0.2V a -0.35V	Riesgo Intermedio de Corrosión
Mayor a -0.2V	90% o más

Tabla 3 Potencial de corrosión según norma ASTM C876 (1991)

Fuente: ASTM C876 (1991)

En las figuras 23 y 24 por medio del estudio de la norma ASTM C876 se puede observar gracias a la interfaz del programa como en las zonas rojas de la pieza la corrosión es considerablemente alta y gracias a esta información se puede predecir un comportamiento no deseado en una estructura de cualquier tipo, dichas zonas rojas indican que existe una alta penetración de CO₂ lo que produce la carbonatación y al ver la figura 25 se puede apreciar el comportamiento anódico-catódico del acero de

refuerzo en donde los electrones de las puntas se dirigen a la grieta de la columna estos fenómenos producen ciertas patologías muy evidentes.

Al existir la carbonatación se pierde la protección que brinda el concreto al acero, al generar un medio ácido el acero de refuerzo empieza a corroerse, por las condiciones del estado falcón al existir una humedad relativa y vientos que producen ciclos constantes de secado y humedad el acero de las puntas comienza a perder electrones que se liberan al ambiente lo que reduce el espesor del acero y en el área de la grieta se genera un entorno propicio para que se alojen estos electrones que fueron liberados, dichos electrones se alojan en la grieta y aumentan el espesor del acero produciendo deslaminaciones en el concreto perdiéndose así la adherencia del acero con el concreto y reduciendo la capacidad que posee la columna de soportar esfuerzos a compresión.

4.3 Sistema de Prevención para la Etapa de Diseño

Debido a los daños que ocurren en las estructuras actuales a causa de la corrosión o por distintas patologías y la pérdida económica que este fenómeno químico genera, se han realizado investigaciones durante varios años que han dado como resultado algunas soluciones para evitar que la corrosión sea un mal para el ámbito de la construcción y así lograr que los sistemas estructurales sean duraderos y logren un mayor tiempo de durabilidad y una resistencia que no disminuya a causa de este fenómeno.

Es por ello que se propone un sistema que permita prevenir las patologías estructurales en la etapa de diseño, con el respaldo de toda la información recolectada de la zona en donde se desea trabajar y con la predicción generada por la simulación se cuenta con una herramienta sólida para realizar un diseño eficiente y perdurable, en donde se tome en cuenta todas las condiciones del ambiente y la razón por la cual los elementos se degradan, para lograr esto se recomiendan las siguientes técnicas para cumplir con dicho objetivo.

Para evitar que exista la posibilidad de que en un futuro la corrosión provoque un deterioro en las estructuras compuestas, se debe tomar en cuenta una serie de

parámetros además se considera que la mayoría de las estructuras están compuestas por concreto y acero casi siempre combinados entre sí, por lo que el diseño se enfocara en estos dos elementos. Antes de proponer cualquier método para prevenir patologías se debe comenzar estableciendo la vida útil del proyecto, esta se define como el periodo de tiempo necesario para que cualquier mecanismo de deterioro inicie la propagación del daño sin que se llegue al punto que produzca el colapso.

En base a la importancia de la estructura o a las características del servicio que va a prestar se establece la vida útil y se decide los recubrimientos los sistemas de protección y los factores de seguridad. Es evidente que por la naturaleza del ser humano el deseo principal es que las estructuras sean muy longevas pero siempre hay que establecer un límite de vida para evitar futuros desastres, para estructuras simples se puede estimar una vida útil de 50 años pero para elementos más importantes puede llegar hasta 100 años de servicio antes de hacer cualquier restauración o modificación que extienda el periodo útil de las estructuras.

Entre las medidas preventivas se pueden mencionar las siguientes consideraciones:

- Que el concreto tenga una estructura de poros adecuada

El acabado superficial es muy importante para evitar que agentes externos se depositen en los poros del concreto y penetren hasta el acero de refuerzo, además superficies “rusticas” con acabados irregulares aumentan la humedad lo que da pie a la proliferación de ataques biológicos, en la figura 26 se puede apreciar la diferencia entre superficies.



Figura 26 Comparación de acabados superficiales en concreto
Fuente: Grupo Napresa (2019)

- Que el recubrimiento tenga el espesor suficiente

Definir el espesor es impórtate ya que es la principal protección del acero de refuerzo es la primera línea de defensa contra el ataque del medio ambiente, los espesores varían dependiendo de la geometría o la función de la estructura pero puede ser consultado en la Norma Venezolana de Proyecto y Construcción de Obras en Concreto Estructural.

- Que el hormigón esté libre de cloruros

En el caso del estado Falcón o de zonas cercanas al mar un error común es usar la arena de playa como parte de la mezcla usada para preparar el concreto, esta arena posee altos contenidos de minerales incluido el cloruro el cual se aloja directamente en el concreto ya fraguado, por medio de esta adhesión el acero de refuerzo es atacado internamente por los iones de Cl lo que conlleva a un proceso de corrosión acelerado.

- Selección del material

En este caso los dos elementos principales de la estructura serán el concreto o el acero, el tipo de concreto se diseñara en base a la relación a/c y el acero se seleccionara para que resista las cargas a las cuales será sometido. Para el concreto existen notables diferencias de comportamiento frente al avance del frente de carbonatación. Estas diferencias están motivadas, en primer lugar, por la dosificación y, en concreto, por la relación a/c. una relación muy alta dificulta la evaporación del agua manteniendo la humedad constante en el concreto y una relación muy baja, genera una mezcla poco trabajable que dificulta el vaciado y el proceso de compactación.

Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de a/c, garantizando así que espesores de 2 a 3 pulgadas (5,0 - 7,5 cm.) permitan una alta durabilidad de la estructura, la relación a/c recomendada será de 0,4 y se evitaren valores de relación de 0,6.

En la figura 27 se muestran los resultados de la medición del avance del frente de carbonatación medido en las muestras preparadas con diferentes relaciones a/c,

obtenidos por Chávez, E. Tezozomoc, P. López j. Corvo, P y Osorno, C. En el Centro de Investigación en Corrosión de la Universidad Autónoma de Campeche. Donde los resultados indicaron que la relación a/c 0.69 mostró mayores tasas de carbonatación después de un año de exposición con respecto a la relación a/c 0.49. La carbonatación resulta mayor en las caras expuesta a la dirección del viento dominante, con respecto a las caras resguardadas en exposición natural.

Los resultados indican que después de un año de exposición en la cámara de carbonatación, la viga con mayor relación a/c se carbonató el doble con respecto a la de menor relación de a/c. En investigaciones relativas a la velocidad de avance del frente de carbonatación, se utiliza la Ec 2:

$$X = k \cdot t$$

Se observa que la k no mantiene un valor fijo como era de esperarse lo que revela que las condiciones de exposición y la heterogeneidad propia del concreto son determinantes para el proceso de carbonatación, además el avance es más pronunciado en la relación de concreto a/c =0.69 lo que fomenta el proceso de corrosión en el acero de refuerzo.

TIEMPO DE EXPOSICION (año)	MEZCLA REL. A/C=0.69				MEZCLA REL. A/C= 0.49			
	CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA	
	X CO2 (mm)	K (mm/año ^{0.5})	X CO2 (mm)	K (mm/año ^{0.5})	X CO2 (mm)	K (mm/año ^{0.5})	X CO2 (mm)	K (mm/año ^{0.5})
0.25	10	20	4	8	5	10	3	6
0.50	18	25.46	8	11.31	10	14.14	5	7.07
0.75	30	34.64	20	23.09	18	20.79	15	17.32
1.00	40	40	30	30	24	24	20	20

Figura 27 Resultado del avance de frente de carbonatación

Fuente: Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada (2010)

Del lado del acero existen muchos tipos de aceros estructurales que pueden ser utilizados, se recomiendan aceros al carbono-manganeso o de alta resistencia y baja aleación en especial los HSLA, una lista más completa se puede apreciar en la figura 28 donde se detalla el uso que puede tener dentro de una obra.

TIPO DE ACERO	DIFERENTES USOS
ASTM A 36	<ul style="list-style-type: none"> -Placas de Conexión -Anclajes de barras redondas lisas (OS) y perfiles (LI) -Cuerdas Superiores e Inferiores de Armaduras (LI) -Montantes y Diagonales de Armaduras (LI) -Largueros Tipo Joist (OS ó LI) -Contravientos de Cubiertas (OS)
ASTM A 529 G 50	<ul style="list-style-type: none"> -Placas hasta 1" de espesor (Placas de Conexión, Placas Base, Cartabones, etc.) -Canales (CE) pequeños utilizados para alfardas de escaleras y conexiones de postes de viento -Cuerdas de Armaduras de (LI) -Montantes y Diagonales (LI) -Contravientos Laterales (LI)
ASTM A 572 G 50	<ul style="list-style-type: none"> -Placa Hasta 4" -Vigas Principales tipo (IR) -Vigas Secundarias tipo (IR) -Columnas de Perfiles tipo (IR) -Mezzanines
ASTM A 588	<ul style="list-style-type: none"> -Acero Patinable (por lo general es un acero que estará sometido a la intemperie) -Plataformas Marinas
ASTM A 709	<ul style="list-style-type: none"> -Puentes -Torres de Transmisión
ASTM A 992	<ul style="list-style-type: none"> -Vigas (IR) -Columnas (IR) -Mezzanines (IR) -Postes de viento (IR) -Espectaculares (IR) -Trabes Carril
ASTM A 53	<ul style="list-style-type: none"> -Tubos Estructurales
ASTM A 500	<ul style="list-style-type: none"> -Columnas de secciones huecas cuadradas (HSS u OR) -Columnas de secciones huecas circulares (OC) -Columnas de secciones huecas rectangulares (HSS u OR)
ASTM A 501	<ul style="list-style-type: none"> -Bastidores (PTR u OR) -Bases de tanques de gas, de agua, etc (PTR u OR)

Figura 28 Tipos de acero estructural y su uso
Fuente: El Acero Hoy, Rosario, C (2010)

- Proteger adecuadamente el acero

Los métodos para proteger las estructuras nuevas consisten en la elaboración de un concreto que funcione como una barrera física y química contra los agentes agresivos del ambiente, ya que no existe una mejor protección del acero de refuerzo que la formación de una película pasiva formada por la hidratación del cemento. Las formas de proteger y controlar las patologías se basan en apartar algunos de los elementos que generan la corrosión (ánodo, cátodo, conductor, iónico, conductor eléctrico). Se han utilizado varios métodos para proteger de la corrosión al acero de refuerzo en el concreto, como por ejemplo pinturas o revestimientos para el acero o el concreto. Los métodos más utilizados para prevenir las patologías en el concreto se pueden ver en la figura 29.



Figura 29 Tipos de protección

Fuente: Acosta, A (2006).

- Control de calidad

El control de calidad es un proceso que debe estar presente en todas las etapas de la obra no solo en los inicios del proyecto sino también en las etapas de fabricación de los materiales debido a que cuando se arrastran fallas pequeñas en los elementos que conforman una estructura, estas fallas pequeñas se acumulan y con el tiempo generan puntos concentradores de tensión y ocurren fallas catastróficas debido a esto. Es por ello que la calidad tiene que estar presente en cada proceso con especial atención y dedicación.

El control de calidad no termina con la culminación del proyecto se debe fomentar el seguimiento de la obra y las inspecciones periódicas para garantizar la durabilidad que puede tener una estructura, en pocas palabras un buen diseño no garantiza la durabilidad de la obra es el proceso de construcción el que garantiza el éxito de la obra.

4.4 Simulación en Condiciones Favorables

Para finalizar se realizó una nueva simulación con nuevos parámetros para estudiar el comportamiento del cuerpo. El entorno es el mismo pero la selección de materiales y la distribución del acero de refuerzo es diferente, el concreto tiene propiedades anticorrosivas y con una relación a/c baja. La librería de materiales de Comsol Multiphysics ofrece un concreto llamado HP el cual posee estas propiedades, el acero es estructural A36 además se tomó en cuenta el espesor del material, los resultados fueron los siguientes:

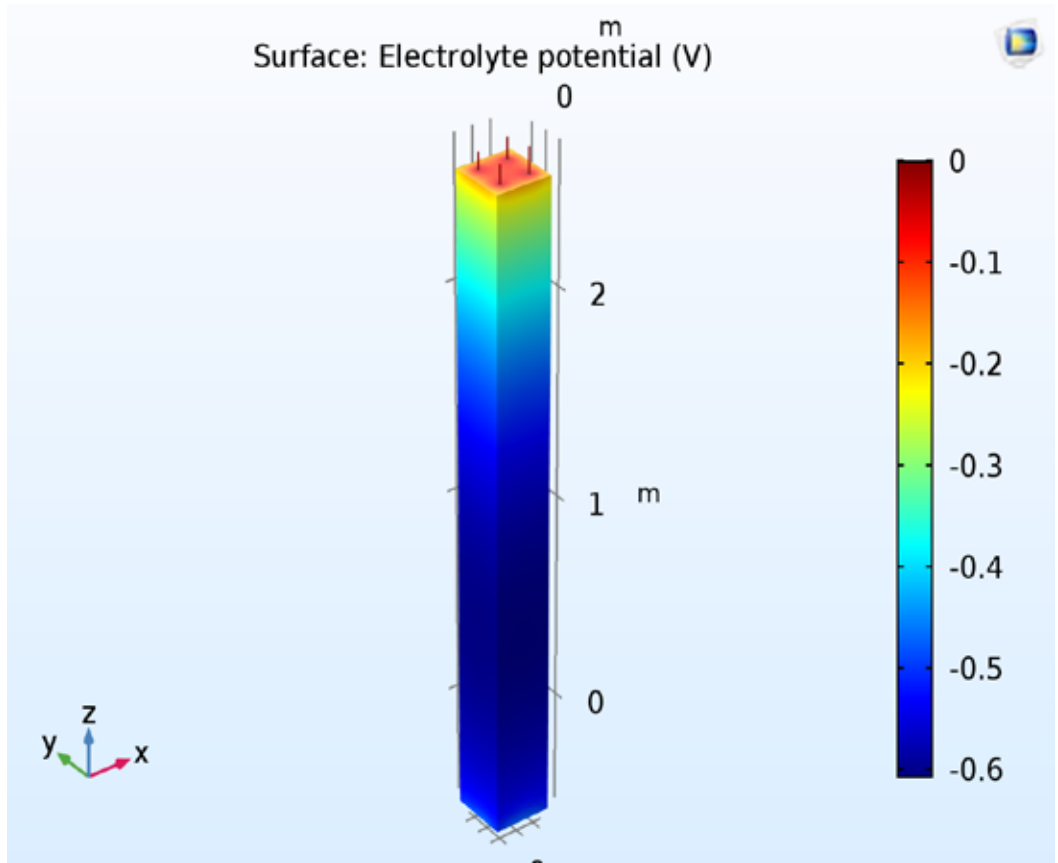


Figura 30 simulaciones de corrosión superficial de columna rediseñada
Fuente: Toro, M (2019).

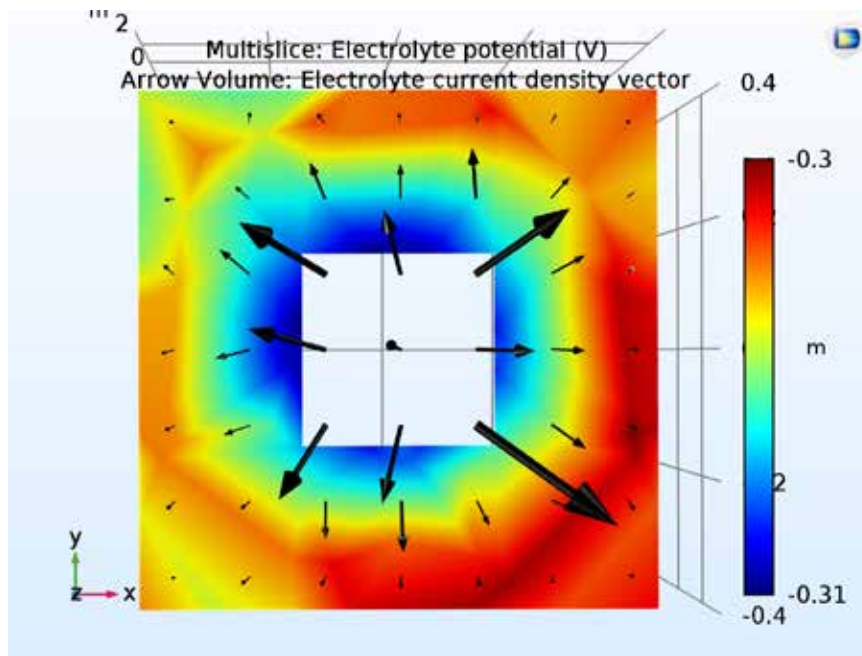


Figura 31 simulación de corrosión de columna, vectores de corriente rediseñada
Fuente: Toro, M (2019).

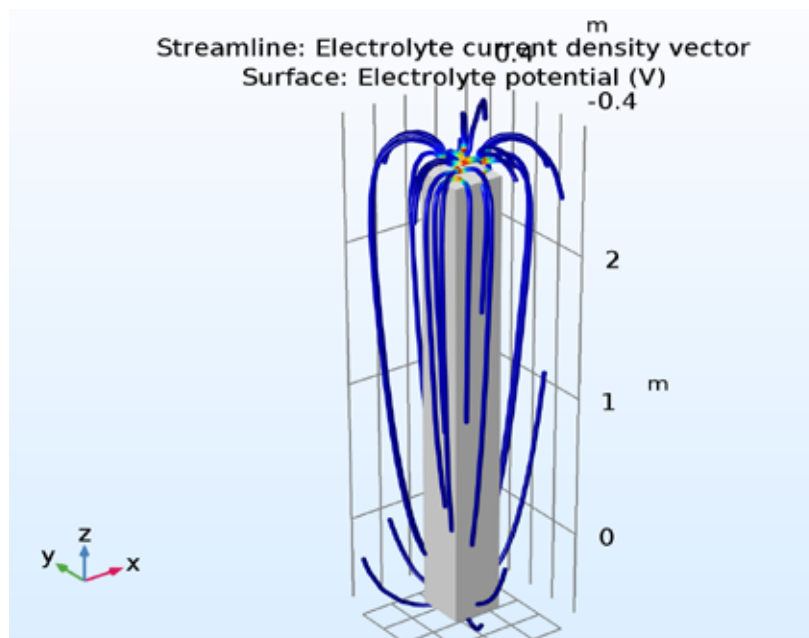
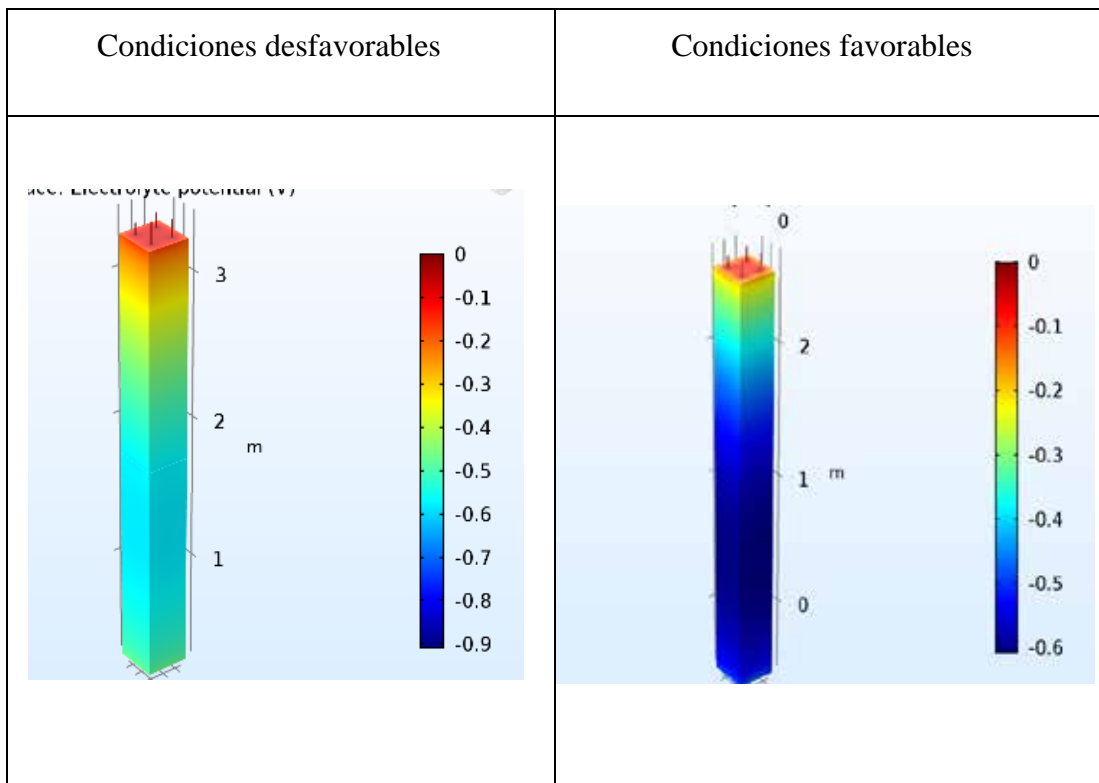


Figura 32 simulación de corrosión de columna líneas de flujo rediseñada
Fuente: Toro, M (2019).

Con los nuevos resultados se puede observar tanto en la figura 30 como en la figura 31 que el alcance de la corrosión no es tan pronunciado como en el caso donde las patologías están más presentes se notan áreas menos comprometidas y aunque sigue existiendo la corrosión se considera que no es tan grave, hay que acotar que erradicar las patologías estructurales como la corrosión en un 100% es imposible ya que este efecto estará presente gracias al ambiente que ataca constantemente a las estructuras, lo que se puede hacer es considerar reducir los efectos que el entorno tendrá sobre los materiales y considerarlo a la hora de diseñar.

Para comparar los efectos del ambiente sobre la pieza se realizara un cuadro donde se podrá apreciar mejor los resultados, del lado derecho estarán los resultados obtenidos por el rediseño y del lado izquierdo entran los resultados anteriores en donde no se tomó en cuenta el diseño.



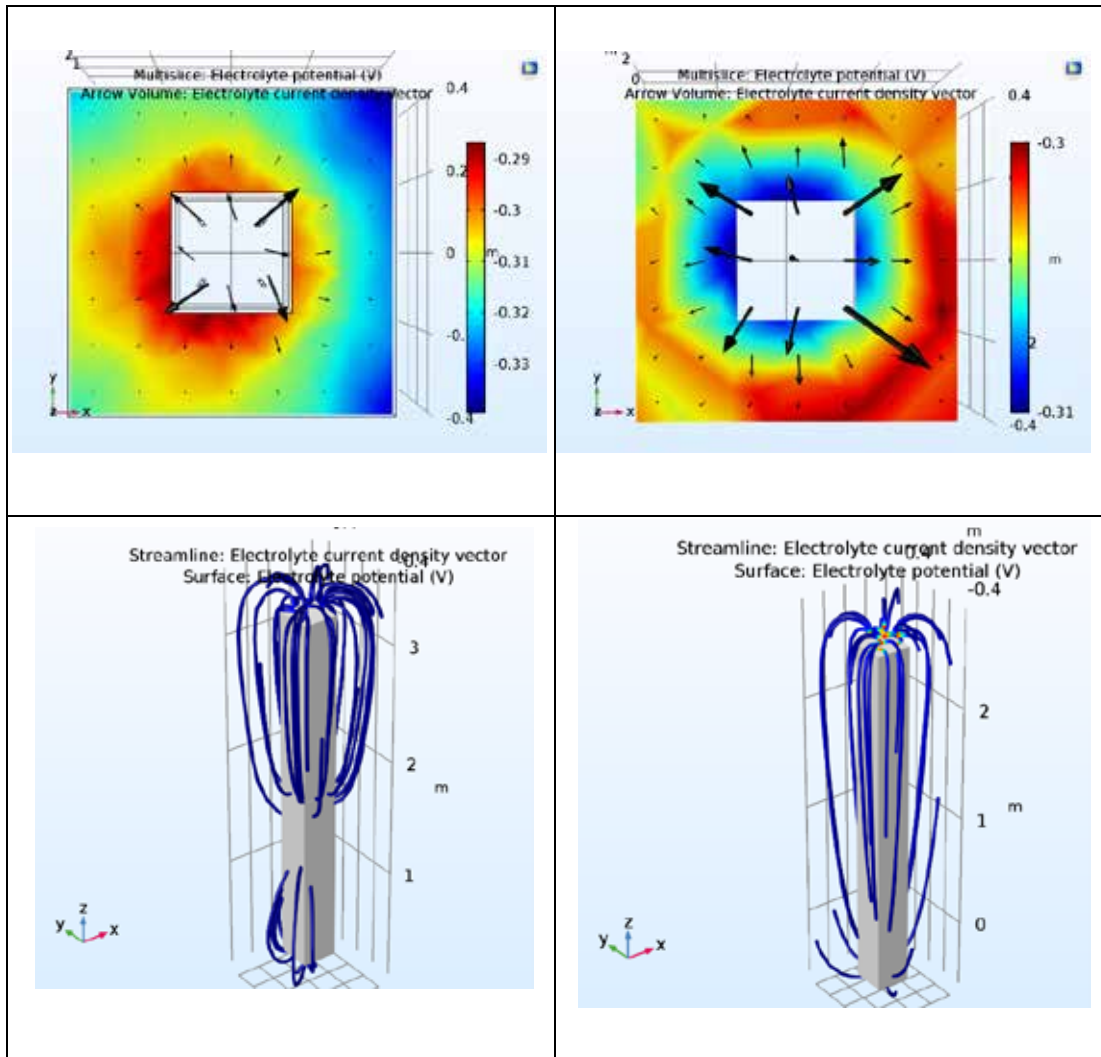


Figura 33 Cuadro de comparación
Fuente: Toro, M (2019).

CONCLUSIONES

Luego de haber cumplido con las fases de la investigación, las cuales se plantearon para llevar a cabo el presente trabajo de grado que tiene como objetivo general “Desarrollar un procedimiento para la detección, simulación y prevención de patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial”, debido a que se notó el deterioro actual en los sistemas estructurales los cuales poseen una vida útil muy reducida a pesar de los avances en las técnicas de construcción, motivo por el cual se procede a realizar un estudio documental para determinar las causas de las patologías presentes en las estructuras y encontrar posibles soluciones para evitar estas patologías a su vez el estudio se complementó con un análisis de una simulación generada por el programa COMSOL Multiphysics v 5.3 el cual permitió conocer el alcance de las fallas y tener una herramienta para predecir el comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones. Tomando en cuenta esto se procede a realizar un análisis de las conclusiones obtenidas en cada fase:

Fase I: En esta se realizó un reconocimiento de la zona en la cual se quería realizar el estudio para conocer la agresividad del entorno y el origen de las futuras fallas a su vez para facilitar el estudio de las patologías se creó un formato el cual ayudaría a construir la idea general del entorno en donde se desea trabajar.

Fase II: Se procede a trabajar en la simulación gracias a los datos recolectados por el formato que se generó previamente. Se evidencia un ataque severo en las estructuras inducida por el entorno agresivo, las patologías se simulan y se analiza con el fin de conocer el estado actual de las estructuras que se encuentran en una región específica.

Fase III: Se realiza un estudio con los conocimientos ya adquiridos gracias a la simulación y al estudio de la zona y se procede a aplicar nuevas técnicas de protección contra las patologías como evitar la corrosión o la carbonatación. Por medio de la

investigación se encontró que existen materiales que se adaptan a distintos entornos con mejores propiedades y ofrecen mejor resistencia a los ataques del ambiente.

Fase IV: aquí se llevó a cabo la nueva simulación con nuevos materiales y se observó una mejora respecto a la simulación en donde no se tomaba en cuenta las características del entorno para realizar una obra. Por medio del estudio de los nuevos materiales se consigue proteger las estructuras por más tiempo y se cumple con el cometido de preservar las estructuras por un tiempo ya establecido.

Una vez analizadas y concluida cada una de las fases de investigación, se hace necesario resaltar que debido a los resultados obtenidos se evidencia una viabilidad con respecto a este sistema ya que los resultados demuestran que diseñar una estructura conociendo las patologías más frecuentes que hay en una determinada zona puede ahorrar más del 100% del costo total de la obra. Al predecir los fallos futuros en el proceso de diseño se previenen muchos tipos de mantenimientos posteriores reduciendo así costos y aumentando la durabilidad.

RECOMENDACIONES

Para este sistema de detección y prevención de patologías se presentan una serie de recomendaciones la cuales pueden ser aplicada en un futuro o en otro tipo de investigación.

Continuar con el estudio de los materiales para simularlos y crear una tabla de comparación y verificar el comportamiento de los mismos bajo las mismas condiciones.

Estudiar otros tipos de entornos para profundizar los conocimientos.

Fomentar el uso de la herramienta COMSOL Multiphysics V 5.3 para analizar distintos tipos de estudios.

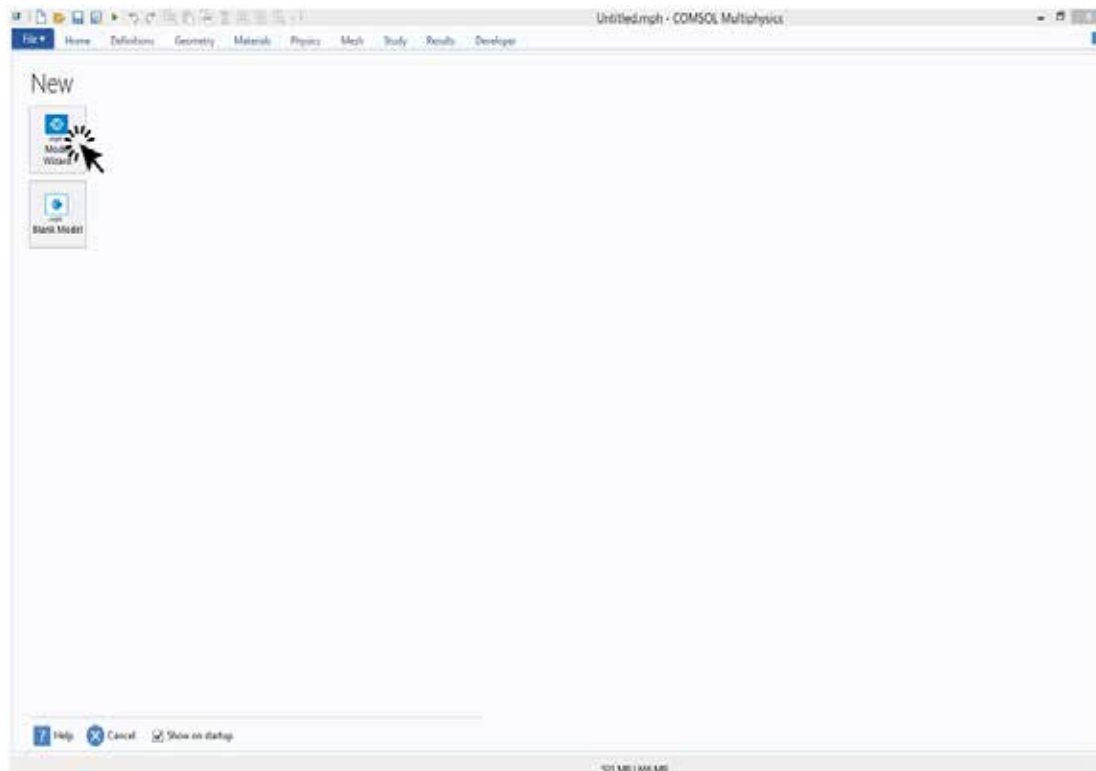
Llevar un control más detallado de las estructuras nuevas que están en servicio para recolectar información que de verdad sea útil a la hora de predecir el comportamiento de estas.

APÉNDICE

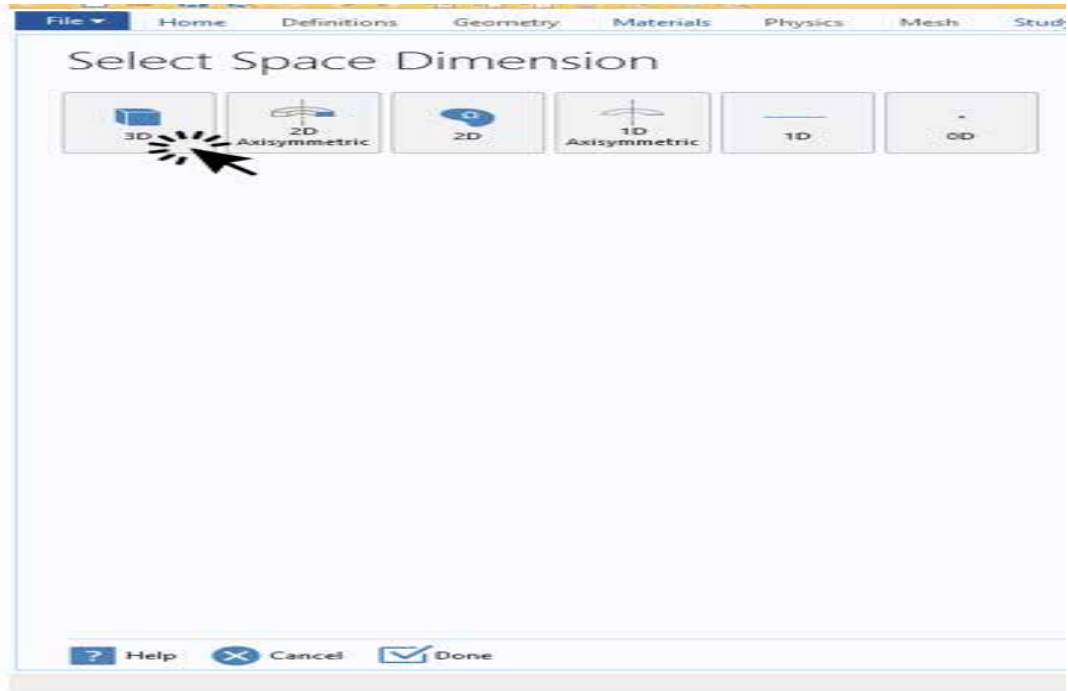
Apéndice A

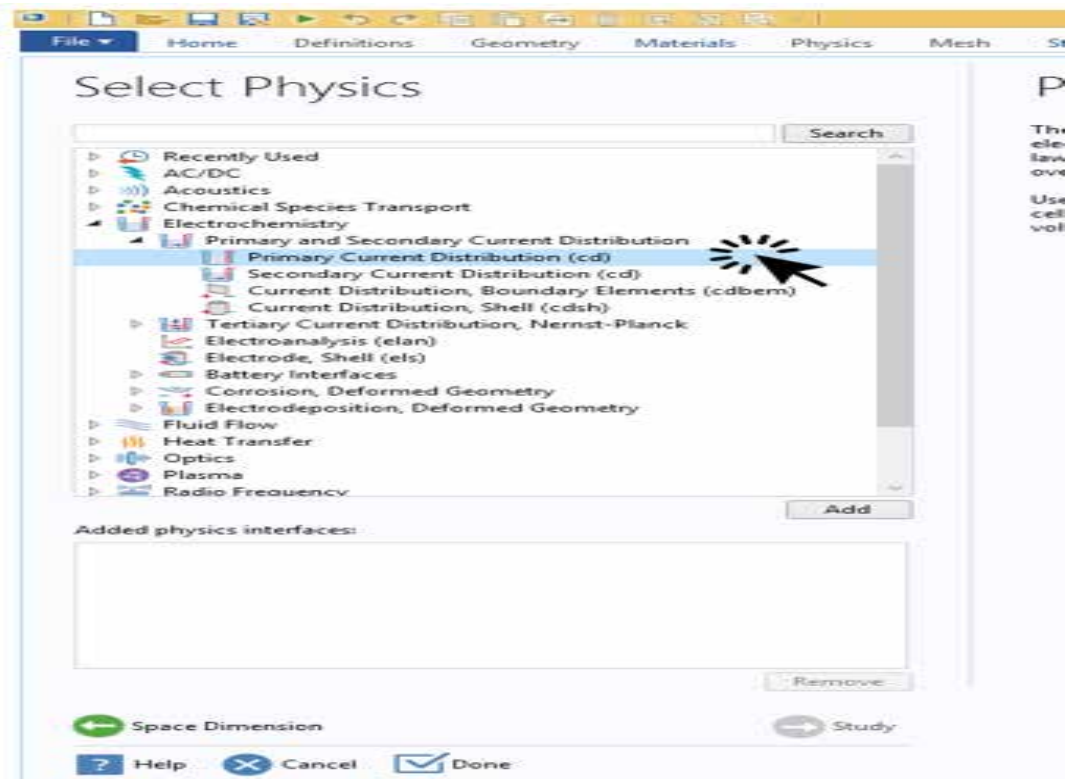
Pasos a seguir para el uso del programa COMSOL Multiphysics 5.3a

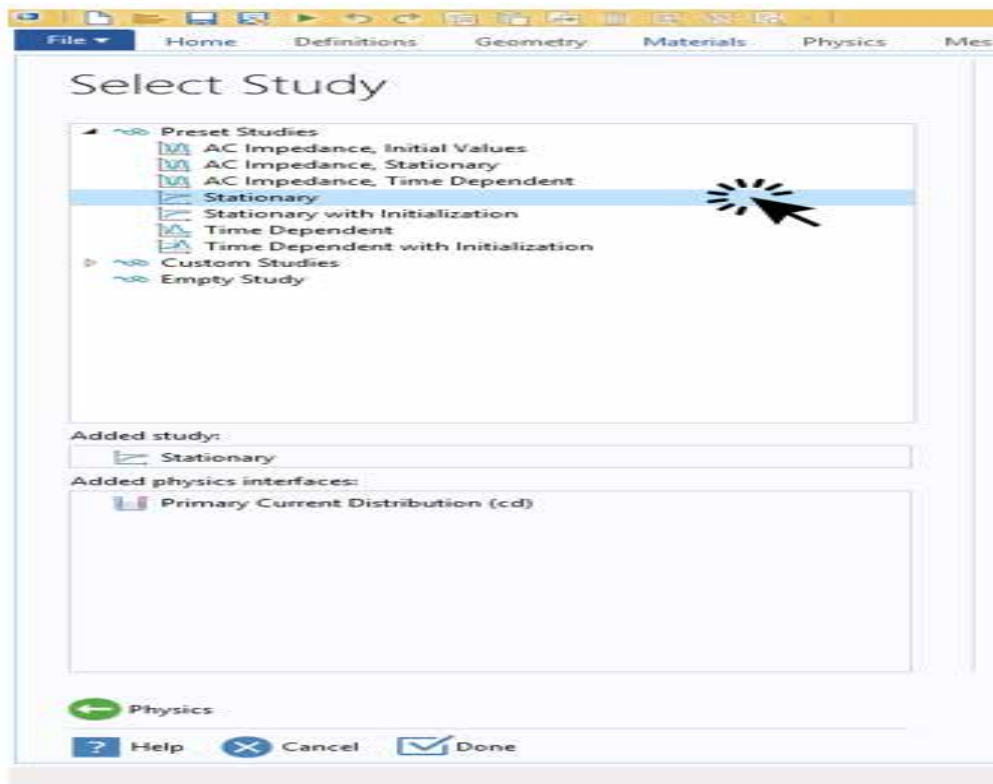
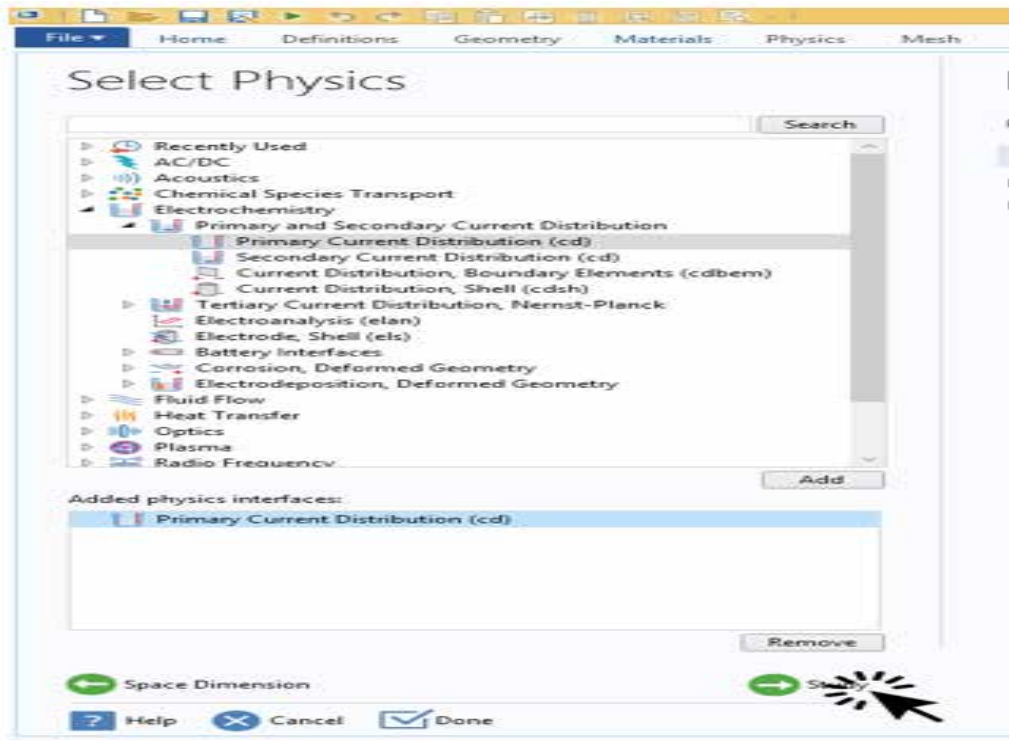
Incido del programa

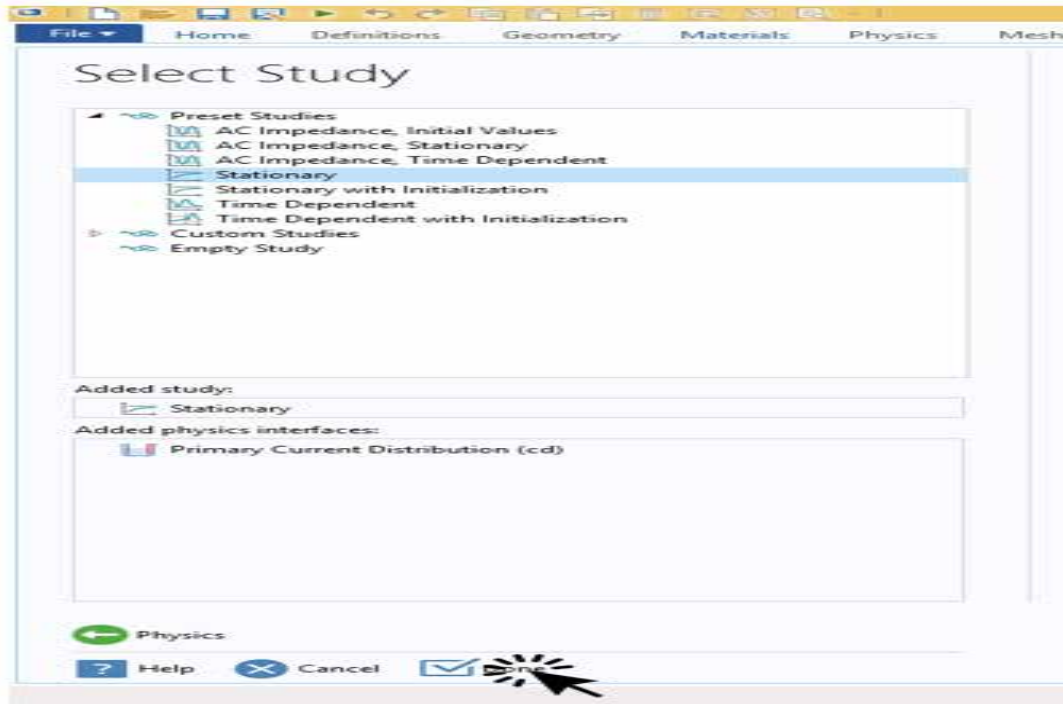


Selección de las características iniciales

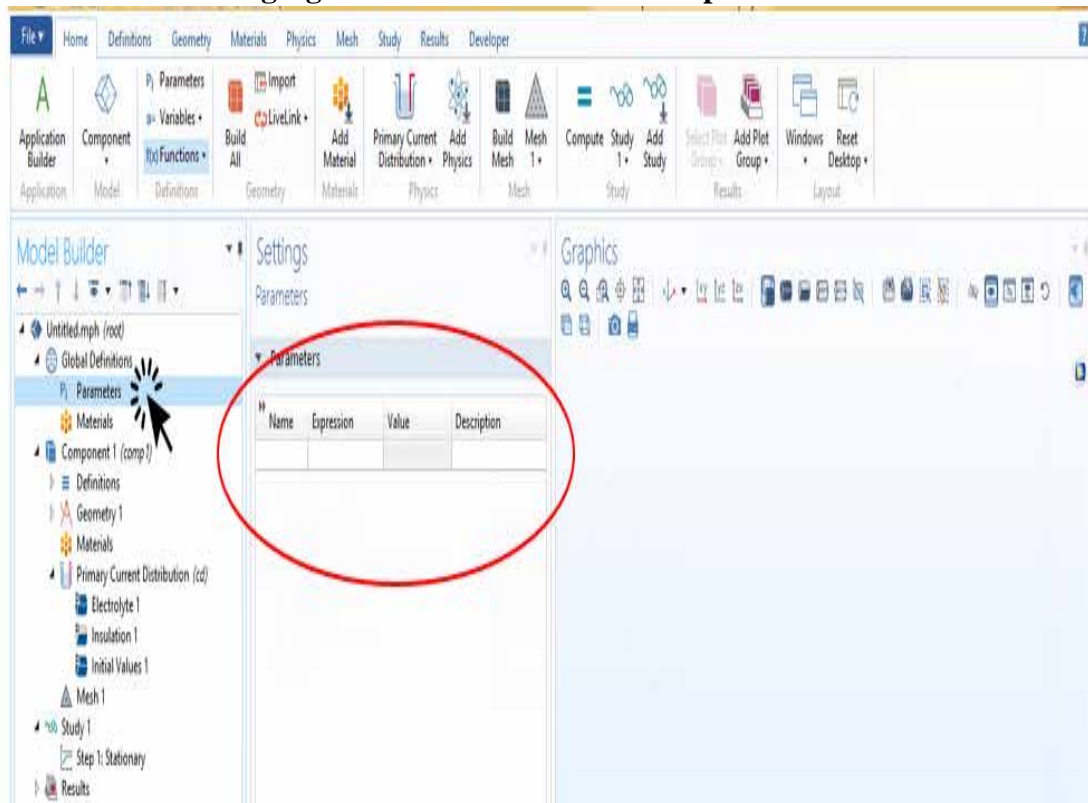




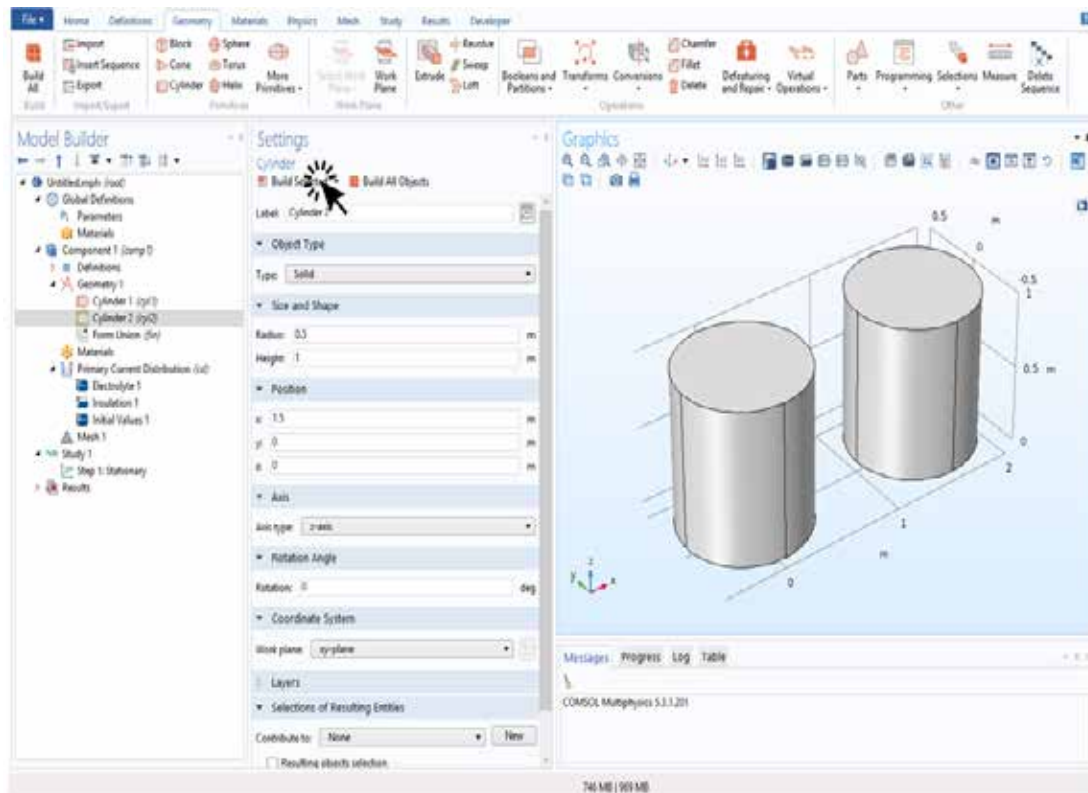


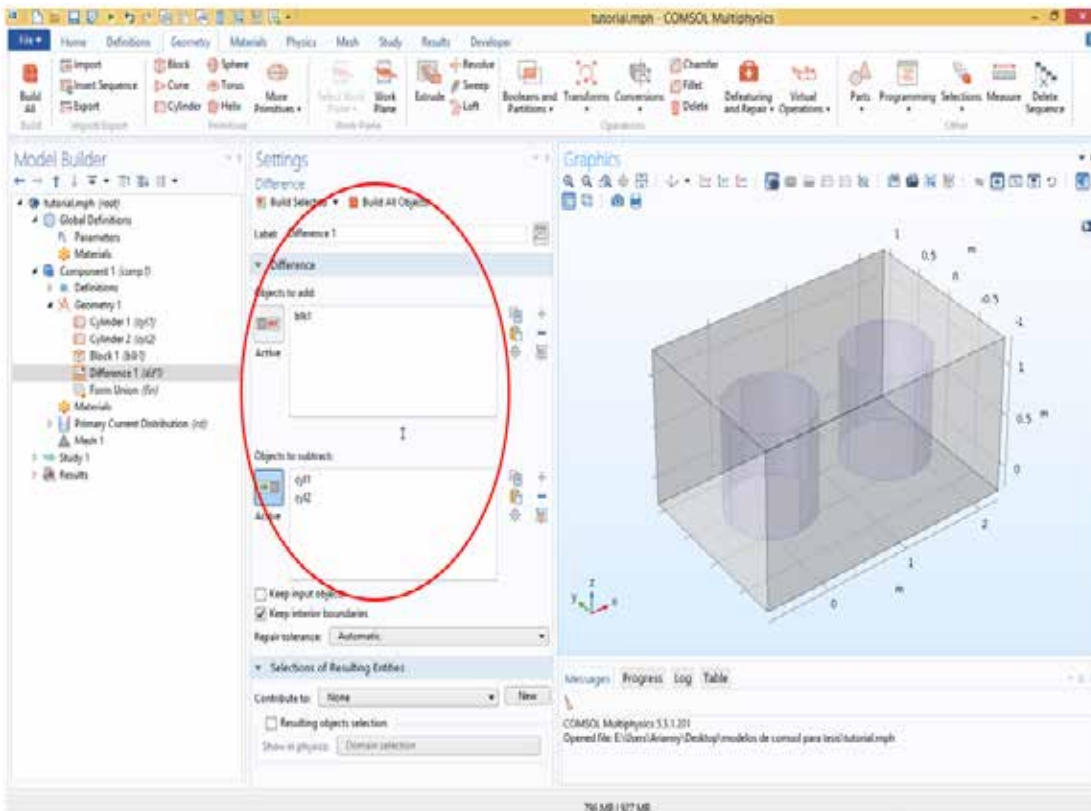
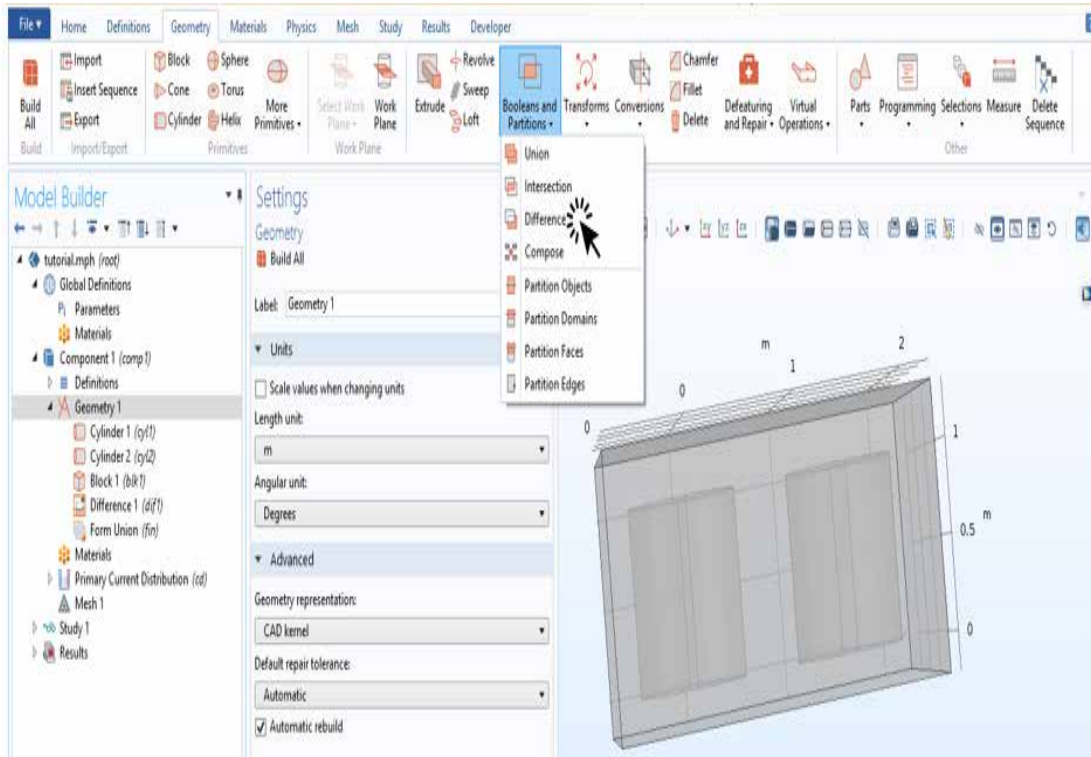


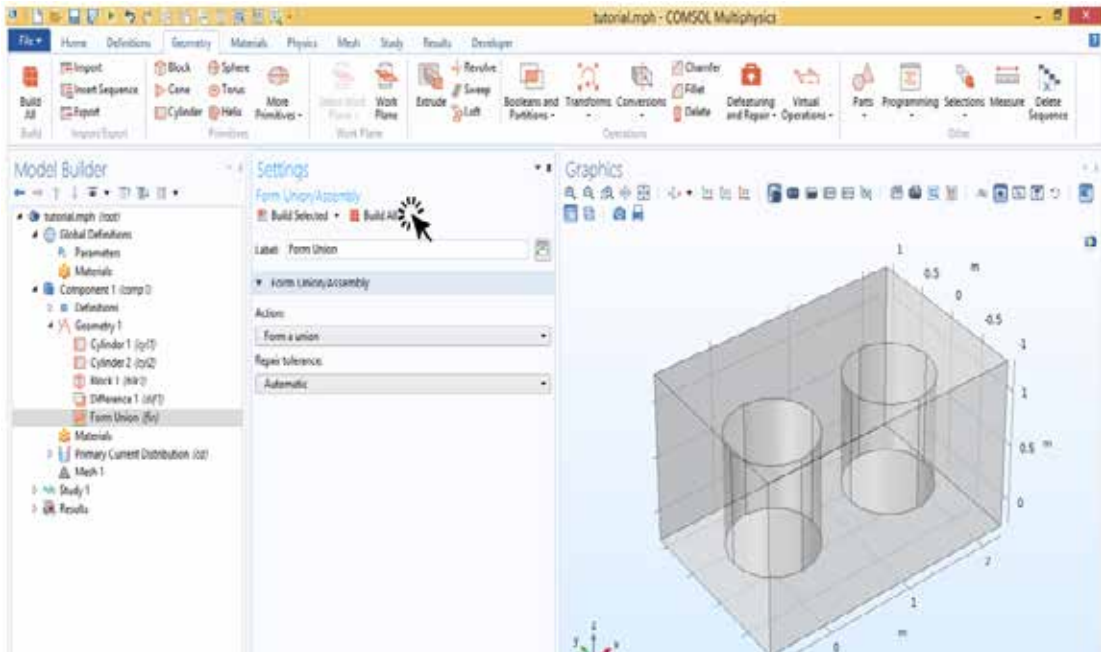
Agregar las condiciones físicas en parametros



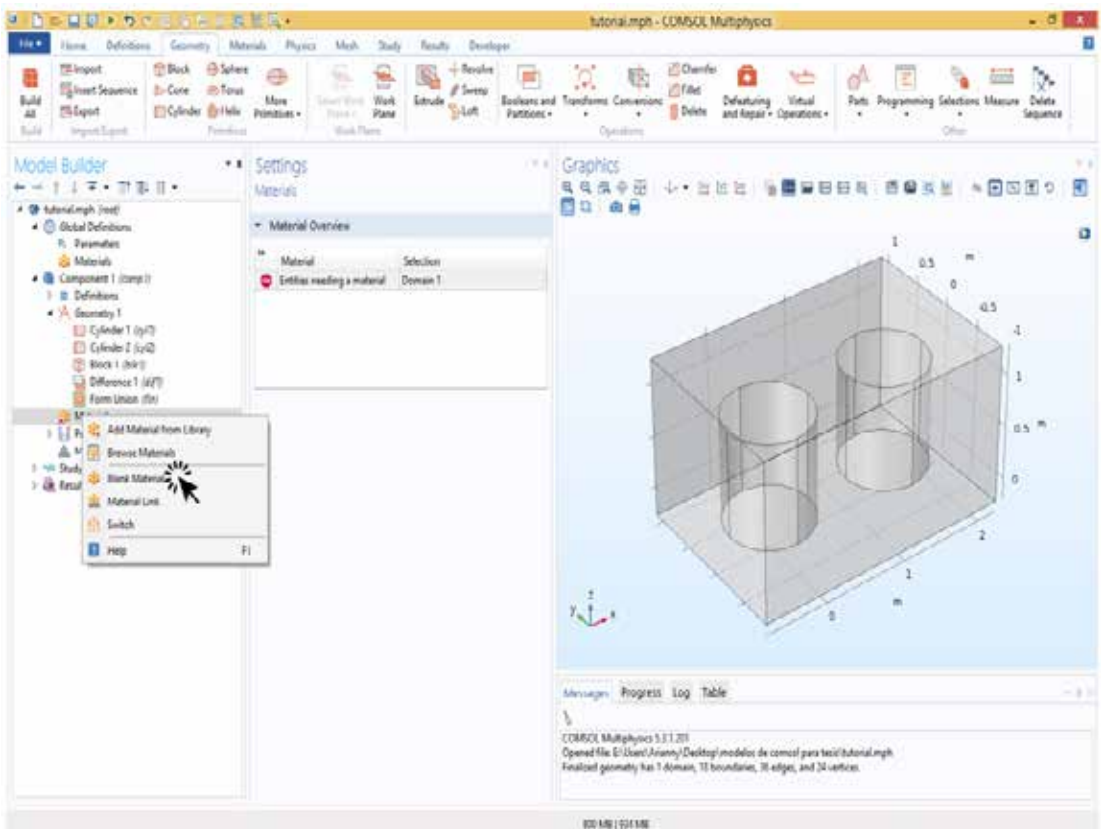
Escoger las geometrías deseadas



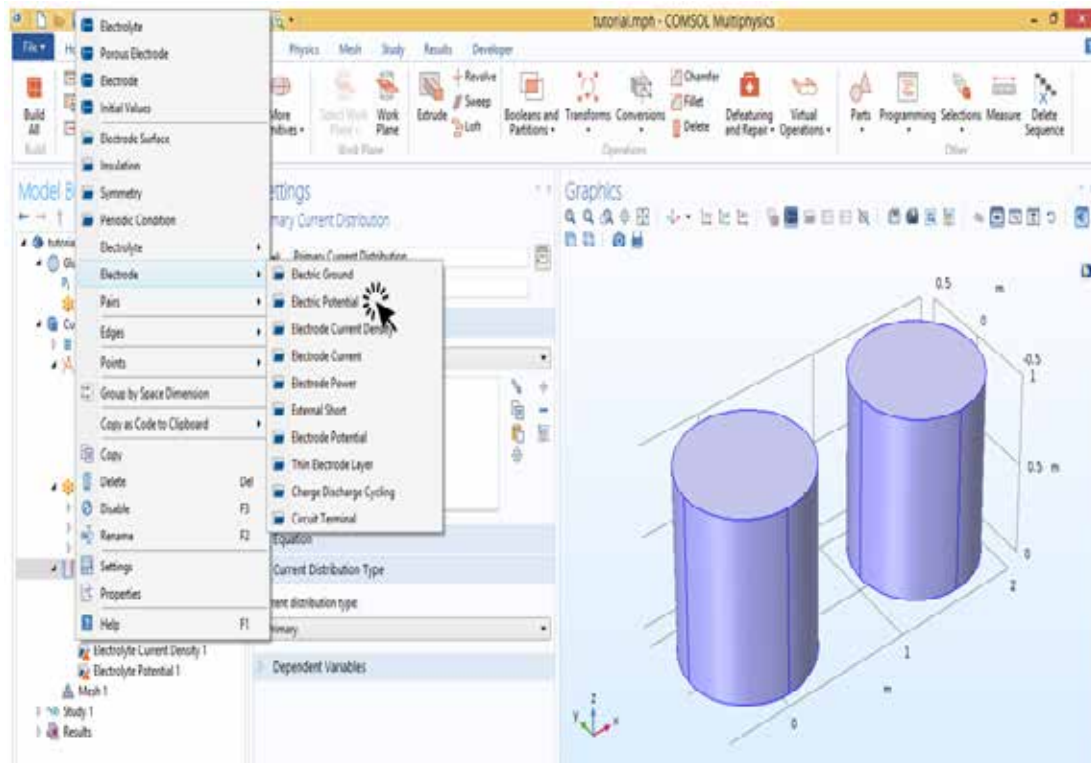
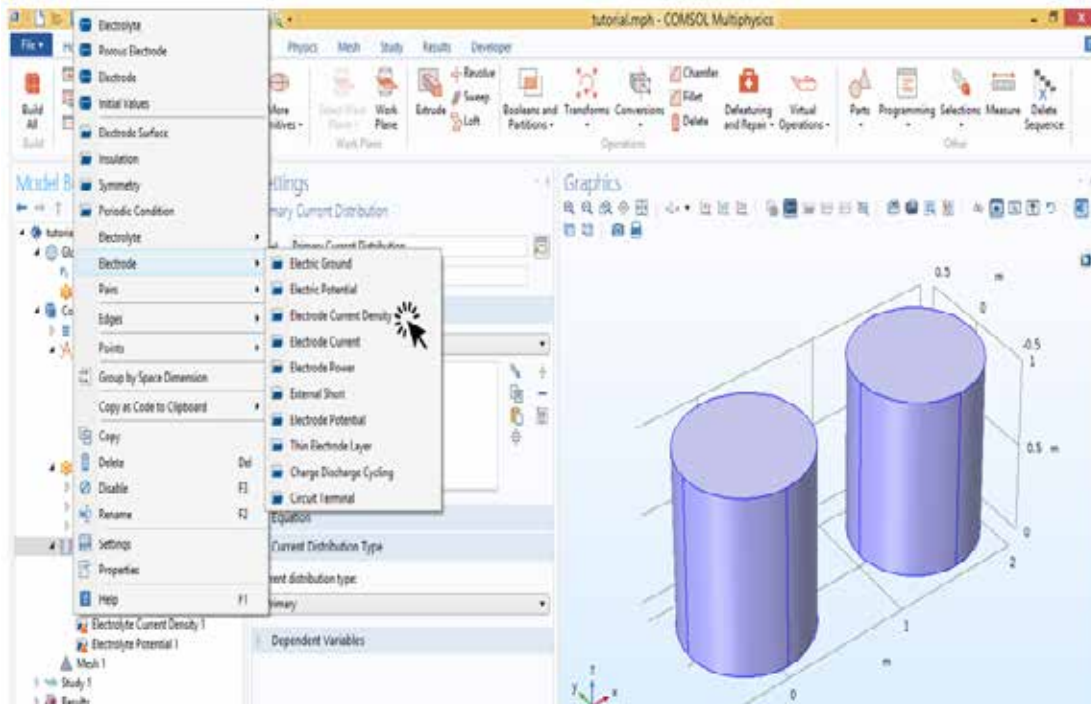




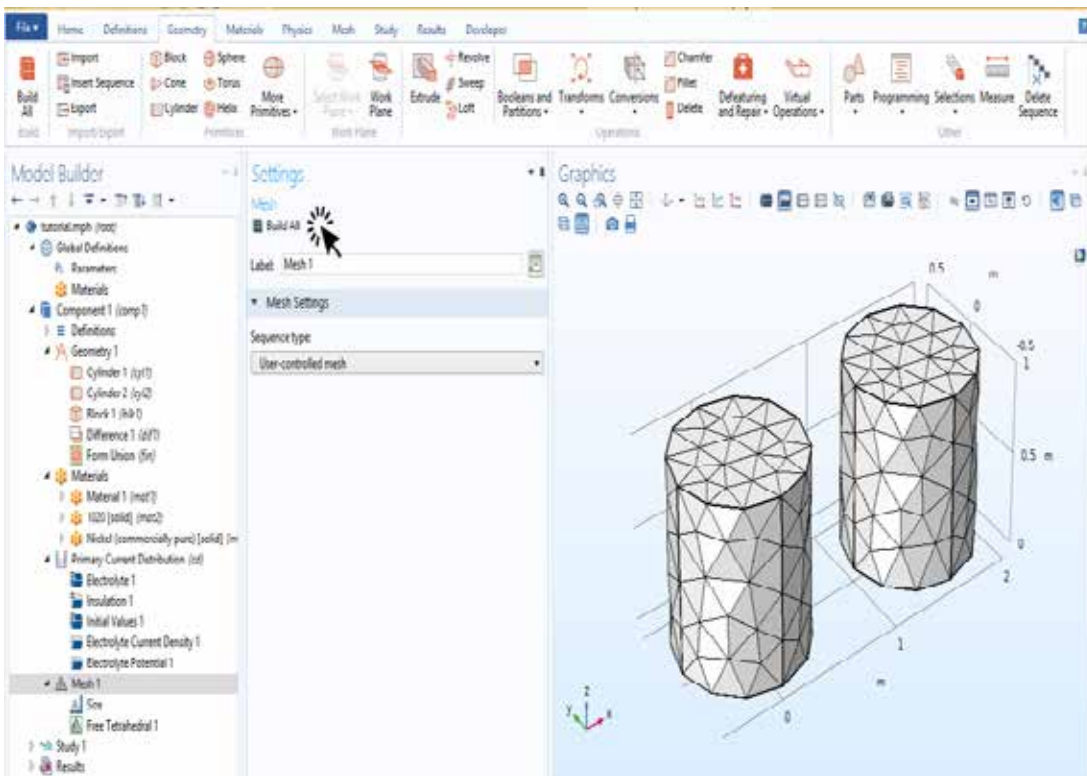
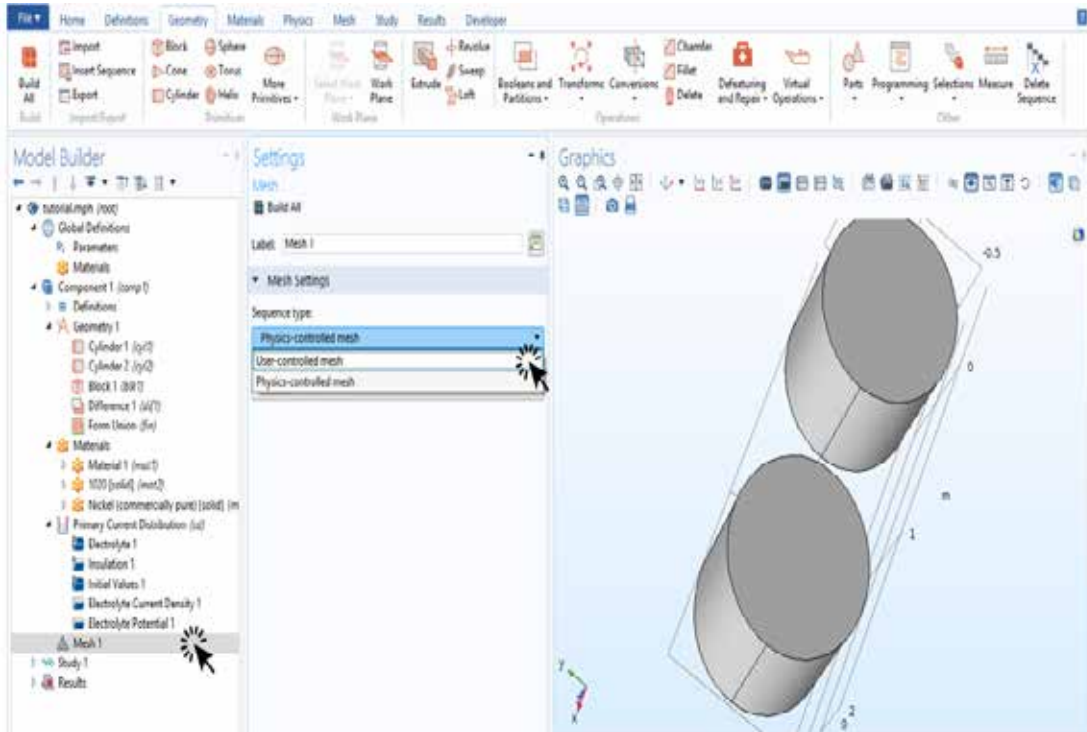
Seleccionar materiales en model builder



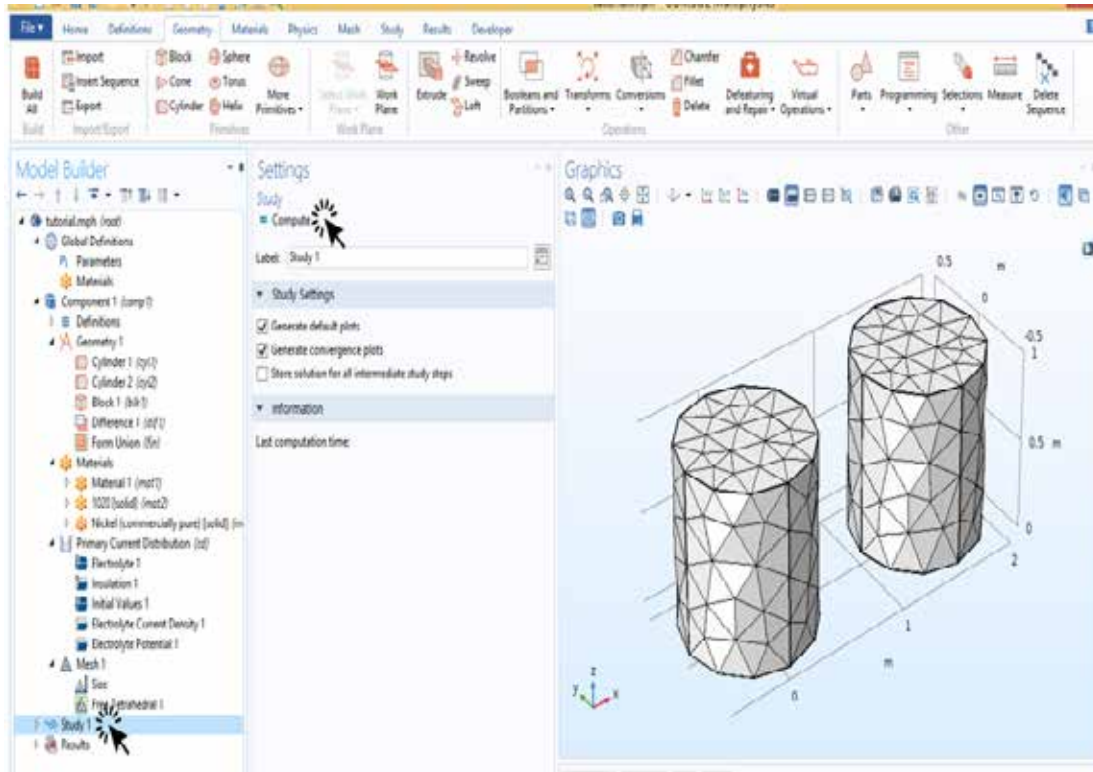
Agregar las características del electrolito



Construir el mallado



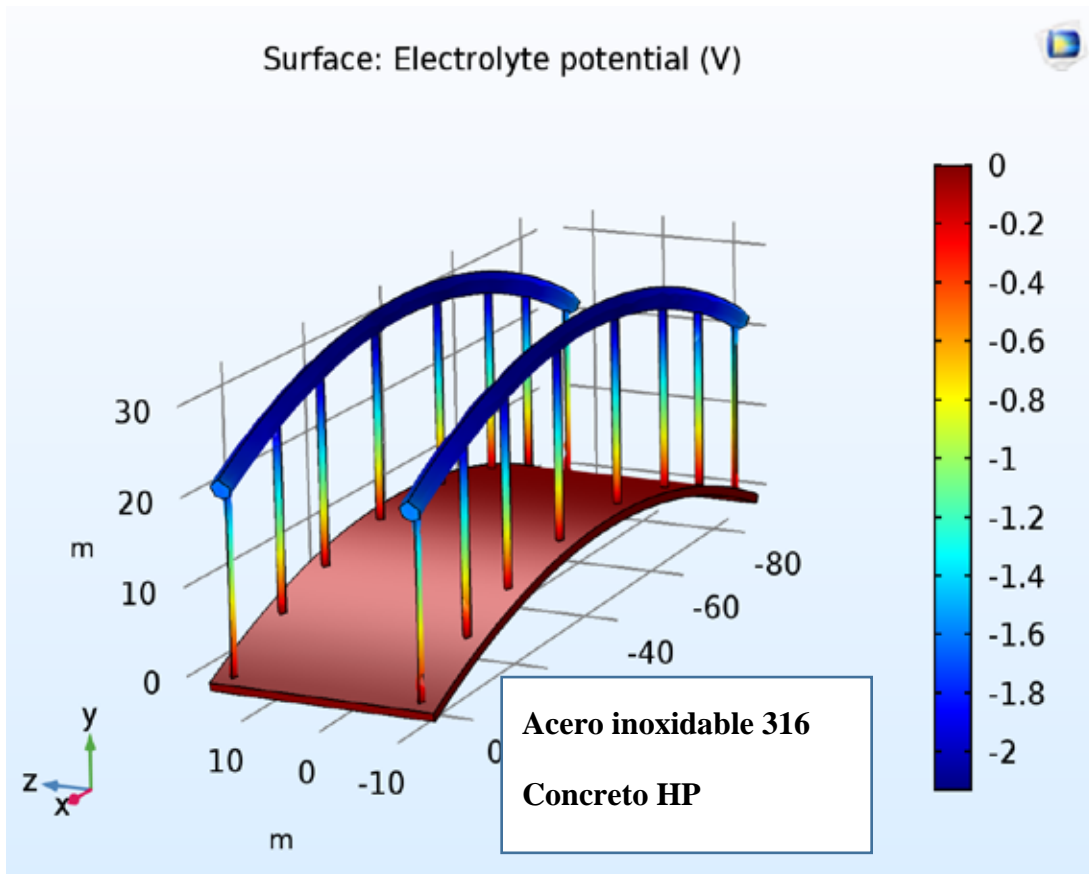
Seleccionar computer para ver resultados



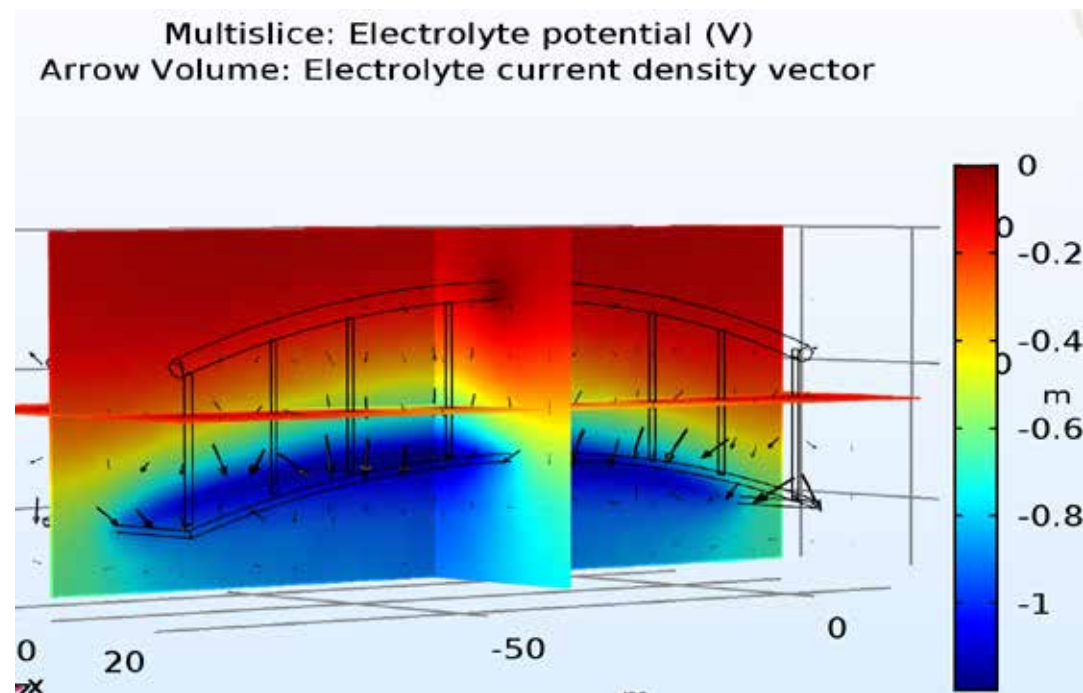
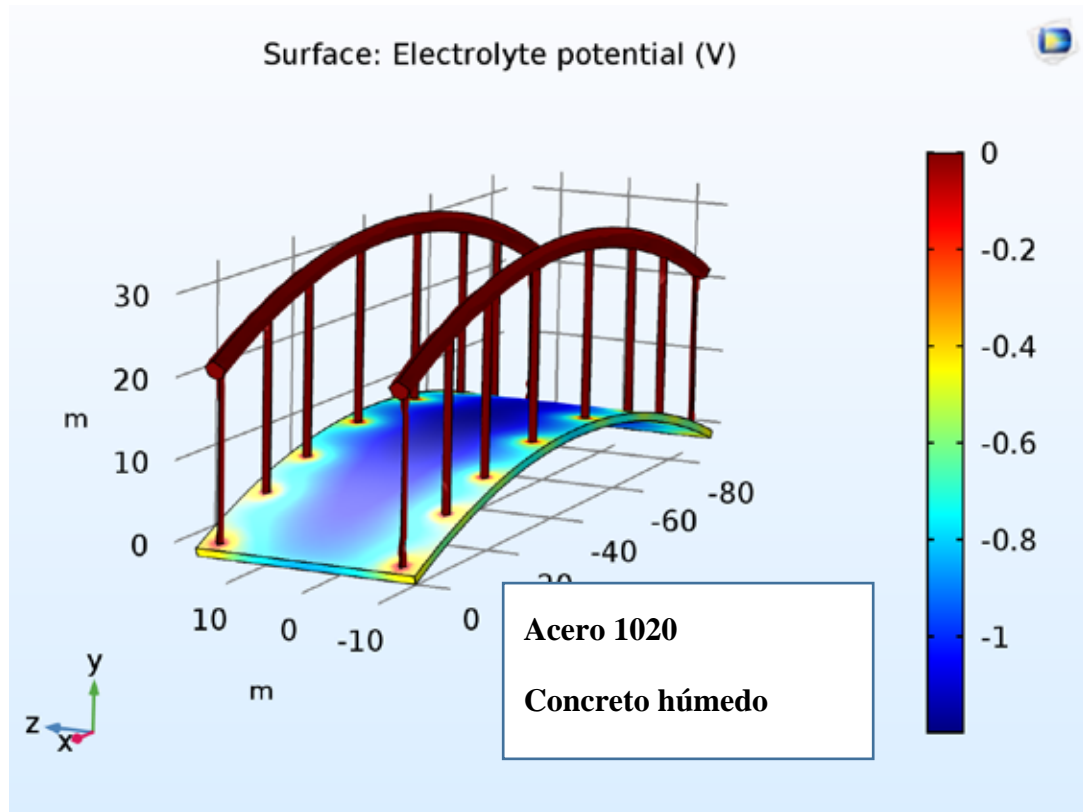
Apéndice B

En el apéndice B se mostraran una variedad de casos para observar el comportamiento de distintas estructuras.

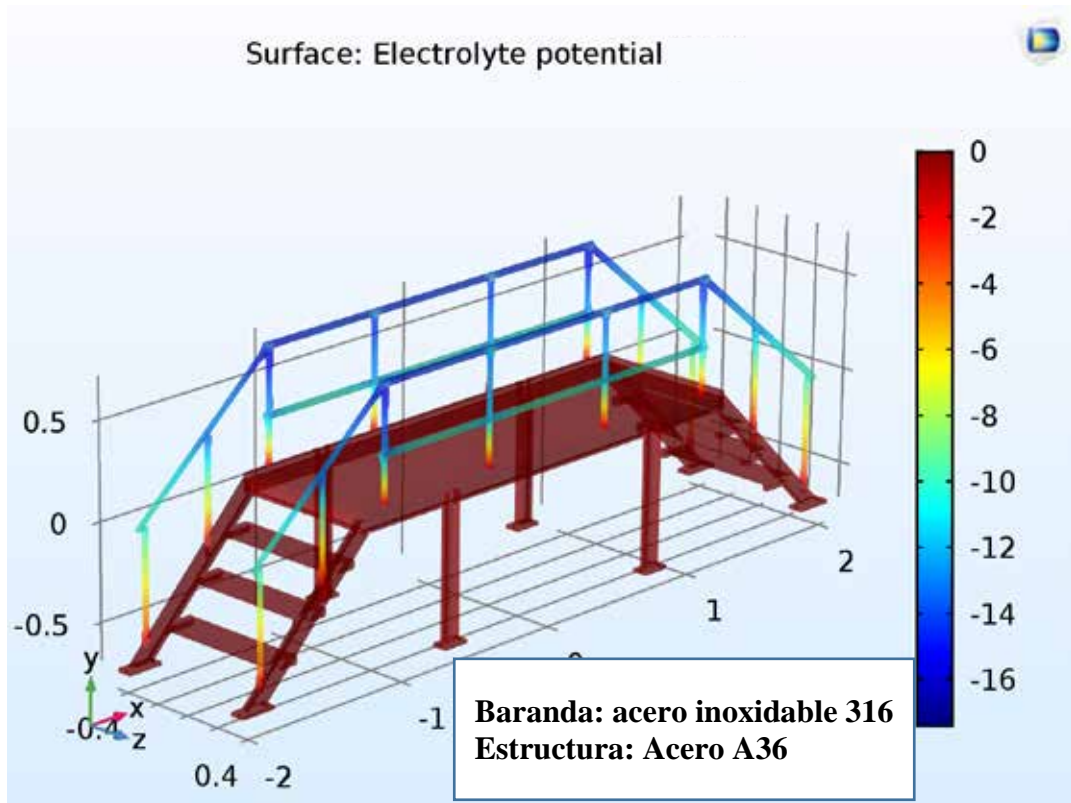
Caso 1



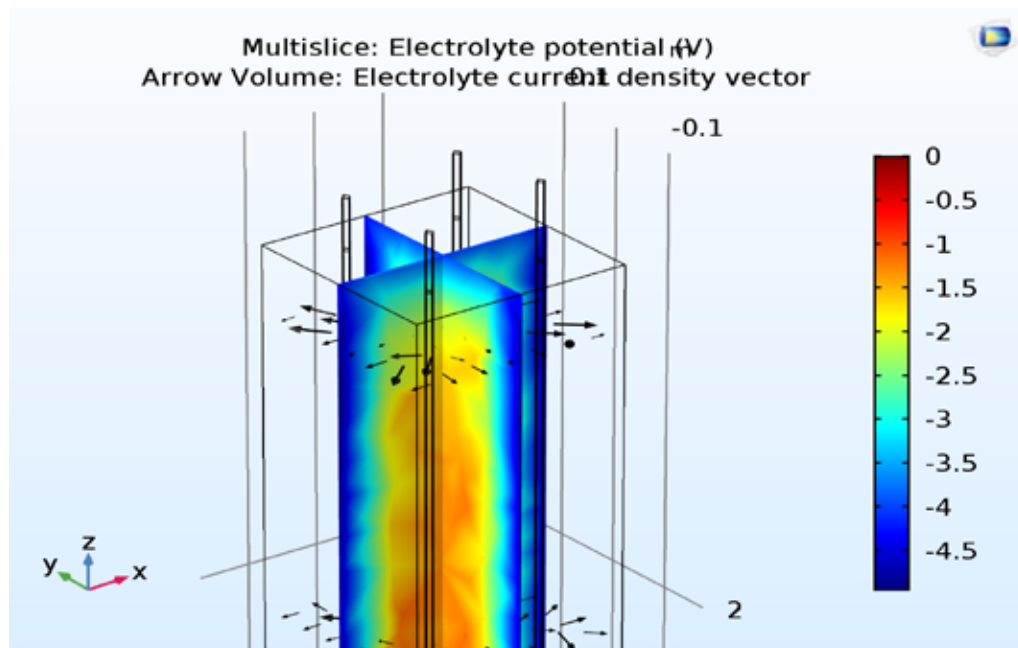
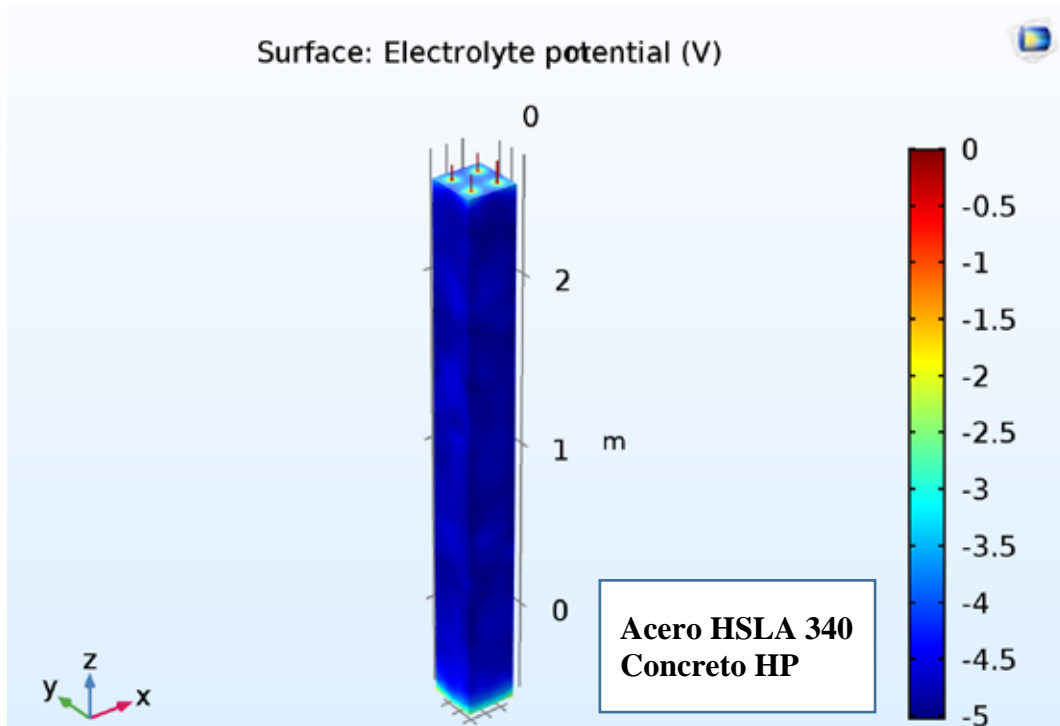
Caso 2



Caso 3



Caso 5



BIBLIOGRAFÍA

- Arias, F. (2006). **El proyecto de investigación, introducción, a la metodología científica**. Editorial: Episteme, C.A. 5ta edición. Caracas, Venezuela.
- Avendaño, E. (2006). **Detección, Tratamiento Y Prevención De Patologías En Sistemas De Concreto Estructural Utilizados En Infraestructura Industrial**. Costa Rica
- Emmons, Peter H. (1993). **Concrete Repair and Maintenance Illustrated**. R.S. Means Company, Estados Unidos.
- Helene, Paulo y Pereira Fernanda. (2003) **Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección**. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Bandeirantes Industria Gráfica. Guarulhos, Brasil.
- Jones Denny A. (1996) **Principles and prevention of corrosion**. Segunda Edición. Prentice Hall, Estados Unidos.
- Morales, V (1994). **Planteamiento y análisis de la investigación**. El dorado ediciones. Caracas. Venezuela.
- Parella Stracuzzi, S y Martins Pestana, F. (2010). **Metodología de la investigación cuantitativa**. Editorial: FEDUPEL. 3ra Edición. Caracas
- Richard, M. (2015). **Aplicación Del Programa Comsol Multiphysics En La Ingeniería Mecánica**. Colombia
- Sánchez De Guzmán, Diego. (2002). **Durabilidad y patología del concreto**. **Asociación Colombiana de Productores de Concreto**, Colombia.
- Tamayo y Tamayo. M (1997). **El proceso de la investigación científica**. Editorial: Limusa. México.