



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE  
PREVENCIÓN Y MODELACIÓN DE LA  
CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO EN  
LA INFRAESTRUCTURA URBANA E  
INDUSTRIAL.**

**Autores:**

Rivas, Rubén C.I. 26.793.176

Martinelli, Vito C.I. 26.734.643

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego

Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 871239



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

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PREVENCIÓN Y MODELACIÓN DE  
LA CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO EN LA  
INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL.**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

**INGENIERO MECÁNICO**

**Autores:**

Rivas, Rubén C.I. 26.793.176

Martinelli, Vito C.I. 26.734.643

**Tutor:** Ing. Donato Romanello

San Diego, Junio de 2020

**FI-M -011-2020-1CR (TG)**

Valencia, 08 de junio de 2020

Ciudadano:

Martinelli S., Vito J.

26.734.643

Rivas F., Ruben D.

26.793.176

Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° **02-2020** de fecha **11-02-2020** aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PREVENCIÓN Y MODELACIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO EN LA INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL** presentado por usted (es) como requisito para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Donato Romanello C.I: 4.131.877 como Tutor Académico que lo asesorara en el desarrollo de este proyecto.

**Atentamente,**

The image shows a rectangular stamp area. On the left side, there is a handwritten signature in dark ink. To the right of the signature is a circular official seal or stamp, which is partially obscured and difficult to read. Below the signature and seal, the name "Prof. Luis Lira" is printed in a bold, black, sans-serif font.

**Decano de la Facultad de Ingeniería**



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

**APROBACIÓN DEL TUTOR**

Quien suscribe, Ingeniero Donato Romanello, portador de la cédula de identidad N° V-4.131.877, en nuestro carácter de tutor del Trabajo de Grado presentado por los ciudadanos Martinelli Severeyn Vito Jesús, portador de la Cédula de Identidad N° V-26.734.643, y Rivas Fernández Ruben Darío, portador de la Cédula de Identidad N° V-26.793.176 titulado **DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PREVENCIÓN Y MODELACIÓN DE LA CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO EN LA INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL**. Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, acepto la tutoría del mencionado proyecto durante su etapa de desarrollo hasta su elaboración y evaluación según las condiciones de la coordinación de pasantías y trabajo de grado de la facultad de ingeniería de la universidad José Antonio Páez

En San Diego, a los 22 días del mes de junio del año dos mil veinte.

---

Ing. Donato Romanello

V-4.131.87

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Ruben Rivas**

En primer lugar, agradecer a Dios. Estoy seguro de que me ha acompañado durante todo este gran camino dándome fuerzas y ánimos para poder seguir, no dejándome solo en ningún momento. Luego, a mis pilares de vida, mis padres Clara y Ruben, no hay duda de que no estaría donde estoy sin su amor y apoyo incondicional. Gracias por guiarme siempre y por confiar en mis decisiones. A su vez, incluir a mi hermana Andrea quien siempre fue ejemplo a seguir para mí como estudiante. A todos ustedes, gracias. Les dedico este gran logro en mi vida.

Por último, quiero hacer mención especial a nuestro tutor el Prof. Romanello, por ayudarnos y guiarnos en este estudio. Así como también a compañeros que conocí a lo largo de la carrera y se volvieron grandes amigos. Entre ellos Katherine, José, Ricardo, Celso, Rakan y sobretodo, mi compañero de trabajo de grado Vito. Sin duda hicieron este camino inolvidable. Gracias.

### **Vito Martinelli**

Deseo expresar mi más grande agradecimiento, a todas aquellas personas que de una forma u otra han contribuido para que este proyecto se hiciera realidad.

En especial a dios porque su bondad infinita nos llana con fortaleza y existencia para desarrollar la presente investigación.

A mis padres Vito y Betsy, que su gran esfuerzo hizo posible yo cursara esta carrera y me animaron en todo momento para que siempre siguiera adelante. A mi hermana Victoria por el amor y solidaridad prestada a lo largo de toda mi vida y el apoyo brindado en el logro de este anhelado triunfo.

A mis profesores y tutores en especial al profesor Donato Romanello, por sus acertadas asesorías, apoyo incondicional, paciencia, perseverancia, comprensión y disposición para la elaboración de nuestro trabajo.

Y por último a mis amigos de la carrera José, Celso, Katherine, Rakan, Ricardo y muy especialmente a mi compañero de trabajo Ruben Rivas que sin ellos este camino habría sido muy difícil, por todos esos momentos en que estudiamos y pasamos tiempo juntos. Gracias mucha gracia siempre estarán presentes en mí.

## INDICE GENERAL

<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	xi
<b>INDICE DE ANEXOS</b> .....	xii
<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1

### **CAPÍTULO**

#### **I EL PROBLEMA**

1.1 Planteamiento del problema .....	3
1.2 Formulación del problema.....	4
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 .....	5
1.6 Limitaciones .....	6

#### **II MARCO TEÓRICO**

2.1 Antecedentes de la investigación.....	7
2.2 Bases teóricas .....	9

2.2.1 Corrosión.....	9
2.2.1.1 Tipos de Corrosión .....	12
2.2.1.2 Corrosión combinada con un fenómeno físico .....	15
2.2.1.3 Otros tipos de corrosión.....	15
2.2.2 Hormigón .....	17
2.2.2.1 Hormigón armado.....	17
2.2.2.2 Usos del hormigón.....	18
2.2.2.3 Características del hormigón .....	18
2.2.2.4 Cuidados del hormigón.....	20
2.2.3 Mecanismos de corrosión en hormigón armado .....	21
2.2.4 Efectos del medio ambiente sobre la corrosión.....	24
2.2.5 Durabilidad de las estructuras de hormigón armado .....	26
2.2.6 COMSOL Multiphysics.....	28
2.2.6.1 Modulo de corrosión de COMSOL Multiphysics .....	28
2.3 Definición de términos .....	29

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación .....	30
3.2 Diseño de la investigación.....	30
3.3 Nivel de la investigación .....	31
3.4 Población y Muestra .....	31
3.5 Técnica e instrumentos de recolección de datos.....	32

3.6 Fases de la investigación .....	33
<b>IV RESULTADOS</b>	
4.1 Causas generadoras de la corrosión en el hormigón armado .....	35
4.1.1 Características de la isla de Margarita, estado Nueva Esparta .....	38
4.1.2 Características del Estado Mérida.....	41
4.1.3 Características de la ciudad de Monterrey, estado Nuevo León, México ..	44
4.2 Simulación de la corrosión .....	47
4.2.1 Simulación del ambiente marítimo o playero. ....	56
4.2.2 Simulación del ambiente de montaña o de frío.....	60
4.2.3 Simulación del ambiente industrial.....	63
4.3 Análisis de los resultados de la simulación .....	66
4.4 Planteamiento del sistema de prevención.....	70
4.4.1 Parámetros a tomar en cuenta .....	70
4.4.2 Creación del sistema de prevención.....	74
<b>CONCLUSION</b> .....	78
<b>RECOMENDACIÓN</b> .....	80
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	81
<b>ANEXOS</b> .....	83

## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURAS</b>	<b>Pág.</b>
1. Representación de una celda electroquímica. ....	10
2. Serie galvánica para algunos metales y aleación comunes. ....	11
3. Tipo de viga de hormigón armado. ....	18
4. Deterioro del hormigón armado por corrosión de armaduras. ....	23
5. Evolución de la corrosión de armaduras en hormigón armado. ....	24
6. Mapa del Estado Nueva Esparta. ....	38
7. Mapa del Estado Mérida. ....	41
8. Mapa del Estado Nueva León, México. ....	44
9. Diseño físico de la columna en el software SolidWorks ....	47
10. Proceso de corrosión en el hormigón armado. ....	51
11. Constructor de modelo en COMSOL Multiphysics. ....	55
12. Superficie de electrodo en COMSOL Multiphysics. ....	56
13. Reacciones de los electrodos en COMSOL Multiphysics. ....	58
14. Potencial del electrolito del ambiente marítimo. ....	59
15. Vector de densidad de corriente de electrolito del ambiente marítimo. ....	59
16. Potencial del electrodo del ambiente marítimo. ....	60
17. Reacciones de los electrodos en COMSOL Multiphysics. ....	61
18. Potencial del electrolito del ambiente frío. ....	62
19. Vector de densidad de corriente de electrolito del ambiente frío. ....	62
20. Potencial del electrodo del ambiente frío. ....	63

21.	Reacciones de los electrodos en COMSOL Multiphysics. ....	64
22.	Potencial del electrolito del ambiente industrial. ....	65
23.	Vector de densidad de corriente de electrolito del ambiente industrial. ....	65
24.	Potencial del electrodo del ambiente industrial. ....	66
25.	Acabado superficial en hormigón. ....	72
26.	Tipos de protección de la corrosión. ....	73
27.	Potencial del electrolito, con sistema de prevención. ....	75
28.	Vector de densidad de corriente de electrolito, con sistema de prevención. ....	76
29.	Potencial del electrodo, con sistema de prevención. ....	76

## INDICE DE TABLAS

<b>TABLAS</b>	<b>Pág.</b>
1. Vida útil de los diferentes tipos de estructuras.....	27
2. Ficha de registro de datos del entorno.....	37
3. Ficha de registro de datos del entorno marítimo. ....	40
4. Ficha de registro de datos del entorno montañoso. ....	43
5. Ficha de registro de datos del entorno industrial.....	46
6. Criterio de evaluación de resistividad eléctrica en el hormigón. ....	52
7. Condiciones de exposición Límite por volumen de hormigón. ....	53
8. Potenciales de electrodo estándar vs electrodo de hidrogeno. ....	54
9. Condición de la corrosión de acuerdo al potencial eléctrico.....	67
10. Corrosión del refuerzo por densidad de corriente para estructuras en operación. ....	69
11. Resumen de datos obtenidos en la simulación. ....	70
12. Vida útil de estructuras de concreto estructural. ....	71
13. Resumen de datos obtenidos en sistema de prevención. ....	77

## INDICE DE ANEXOS

<b>ANEXOS</b>	<b>Pág.</b>
Anexo 1: Selección de tipo de estudio a realizar.....	84
Anexo 2: Interfaces físicas añadidas.....	84
Anexo 3: Asignar parámetros de la conductividad.....	85
Anexo 4: Zonas aisladas al medio ambiente.....	85
Anexo 5: Mallado de la estructura.....	86
Anexo 6: Asignación de material y conductividad para el acero AISI 1020.....	86
Anexo 7: Asignación de material y conductividad en ambiente marítimo.....	87
Anexo 8: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el ambiente marítimo.....	87
Anexo 9: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el ambiente marítimo.....	88
Anexo 10: Aplicación de los coeficientes de reacción en el ambiente marítimo. ....	88
Anexo 11: Asignación de material y conductividad en ambiente industrial. ....	89
Anexo 12: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el ambiente industrial.....	89
Anexo 13: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el ambiente industrial. ....	90
Anexo 14: Aplicación de los coeficientes de reacción en el ambiente industrial.....	90
Anexo 15: Asignación de material y conductividad en el ambiente montañoso.....	91
Anexo 16: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el ambiente montañoso. ....	91

Anexo 17: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el ambiente montañoso.....	92
Anexo 18: Aplicación de los coeficientes de reacción en el ambiente montañoso. .	92
Anexo 19: Asignación de material y conductividad en el sistema de prevención....	93
Anexo 20: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el sistema de prevención. ....	93
Anexo 21: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el sistema de prevención.....	94
Anexo 22: Aplicación de los coeficientes de reacción en el sistema de prevención.	94



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

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE PREVENCIÓN Y MODELACIÓN DE  
LA CORROSIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO EN LA  
INFRAESTRUCTURA URBANA E INDUSTRIAL.**

**Autores:**

Rivas, Rubén C.I. 26.793.176

Martinelli, Vito C.I. 26.734.643

**Tutor:** Ing. Donato Romanello

**Fecha:** junio 2020

**RESUMEN**

En el mundo de la construcción las principales fallas que tienen las infraestructuras urbanas e industriales son debidas a la corrosión que ocurre en estas, por lo tanto, es importante atacar esta problemática con urgencia haciendo énfasis en que este fenómeno es indetenible y que no se puede erradicar. Esta investigación hizo un estudio documental de las causas de la corrosión en el hormigón armado, reflejándose dentro de un análisis electroquímico en la estructura, la cual fue sometida a diferentes entornos como frío, marítimo e industrial, simulando el fenómeno de la corrosión en el software COMSOL Multiphysics y dando diferentes resultados en cada ambiente. Gracias al análisis se pudo crear un sistema de prevención para evitar estas fallas, ya que el no hacerlo implicaría un alto costo en reparaciones y mantenimiento que se pueden prevenir, así como un alto riesgo en la salud humana. Este sistema de prevención es una medida que se debería aplicar en toda estructura cuya vida útil sea extensa y sobretodo que se encuentren en ambientes agresivos. Al final se concluyó que se puede implementar fácilmente un nuevo sistema factible de preparación de las estructuras de hormigón armado, el cual tenga como principal objetivo la ralentización de la corrosión. Haciendo uso de medidas de prevención catódicas y mejorando su preparación.

**Descriptor:** Electroquímico, corrosión, prevenir, simulación.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de estructuras de hormigón armado, lo menos que se piensa es en cómo son afectadas por la corrosión, aun cuando las principales fallas que tienen las infraestructuras urbanas e industriales son debido a este fenómeno. La presente investigación propone desarrollar un sistema de detección, prevención y simulación de la corrosión en el hormigón armado en infraestructuras tales como la urbana y la industrial, la cual aporta un grano de arena más a la misión de ralentizar el proceso indetenible de la corrosión. El primer punto a desarrollar o atacar, son las causas que hacen que la velocidad de este fenómeno aumente, por lo tanto, gracias a la investigación se pudo crear un registro de factores involucrados en el tema tratado.

A lo largo del proyecto, se indagaron todas las variables que se necesitan para establecer cuando las características de un entorno son más influyentes en las estructuras y cuando es necesario un proceso más riguroso a la hora de la preparación de los materiales. Para facilitar lo mencionado antes, se usó un software de simulación CAD/CAE llamado COMSOL Multiphysics, en el cual se representó dichos entornos con sus características, esto sirvió para hacer un modelado del proceso y tener resultados rápidamente y aproximados a la realidad sin necesidad de invertir tiempo, dinero y otros factores en estudiar las estructuras.

La investigación se dividió en varios capítulos, los cuales son importantes para solución del problema planteado. En el capítulo I, el planteamiento del problema, se habló de la problemática y por qué debe ser acatada, además, se plantearon los objetivos generales y específicos. Se estableció el alcance que tiene la investigación y sus limitaciones.

En el capítulo II, el marco teórico, se realizó una recopilación de la información necesaria para realizar la investigación, sin este capítulo no hubiese bases de las cual sostenerse para llegar a una solución.

El capítulo III, marco metodológico, establece la estructura de nuestra investigación y los métodos de cómo se llevó a cabo el estudio, además de

implantarse aquí la población y la muestra, así como también las fases de la investigación.

El capítulo IV, resultados, en este llevaron a cabo las fases de la investigación planteadas en el capítulo anterior y se llevaron a cabo todos los procedimientos y se sacaron conclusiones.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del problema**

Históricamente la construcción ha protagonizado un papel importante en el desarrollo del hombre, siendo un campo que ha ido evolucionando frecuentemente, cumpliendo con la labor de formar el mundo como lo conocemos, desde grandes edificios y largos puentes, hasta pequeñas casas e infraestructuras. El rango de los materiales utilizados ha sido muy particulares y diversos con respecto a cada época, por ejemplo, en la edad media utilizaban principalmente piedras, barro y madera, en la época colonial algunos tipos de arcilla y adobe, y así hasta llegar a los materiales que se conocen hoy en día, siendo el hormigón uno de los más utilizados.

El hormigón es un material de construcción formado por una mezcla de cemento, arena, agua y grava o piedra machacada a porcentajes determinados. Este es reforzado interiormente por una armadura de barras de hierro o acero para, una vez fraguado, absorber los esfuerzos de tracción a que queda sometido. Esta combinación se lo conoce como hormigón armado.

Con el paso del tiempo, estas estructuras se ven seriamente deterioradas, ya sea por la aplicación de cargas de servicio que no estaban previstas a la hora de su diseño, por el desgaste habitual por contacto, u otra razón que no podemos controlar. Sin embargo, existen problemas que sí se pueden prever en las etapas iniciales del proyecto, como los que son debidos a la influencia que tienen los agentes externos sobre el material.

La corrosión es uno de los patógenos que se ve más influenciado por estos agentes externos, siendo uno de los daños más frecuentes y que ocasionan mayores deterioros en las estructuras de hormigón armado. Este perjudicial efecto se produce mayormente debido a la humedad que se encuentra dentro del hormigón, que actuando conjuntamente con el dióxido de carbono cambia la composición del

material, bajando su pH y dejando expuesto el acero a la corrosión, este proceso se le conoce como carbonatación.

Además, hay que agregar que la situación actual del calentamiento global ha empeorado el deterioro de las estructuras de hormigón armado, esto es debido al aumento excesivo de producción de dióxido de carbono en el planeta, ya sea por la sobrepoblación de vehículos de consumo de combustible fósil o por la falta de conciencia de las industrias al no tener un buen control de emanación de gases. Todo este ambiente, produce un efecto negativo en la estructura metálica del hormigón, ya que contribuye a la creación de sustancias o ácidos que aceleran el proceso corrosión de estos.

Es necesario atacar esta problemática de manera inmediata 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 encuentren en estado crítico. Por esta razón, se debe emplear la solución en la etapa de la preparación del hormigón, ya que hacerlo después significaría muchos más gastos en mantenimiento preventivo y correctivo de lo establecido, sin contar el riesgo de colapso de la infraestructura. Cabe destacar que el fenómeno de la corrosión no es algo que se pueda eliminar, pero se puede hacer lo posible para retrasarlo y alargar la vida útil de la edificación.

La investigación se enfocará en realizar métodos preventivos para evitar la corrosión en la estructura de hormigón armado. Todo mediante la utilización de software de modelación capaces de predecir la cantidad de acero corroído.

## **1.2 Formulación del problema**

¿De qué manera se podría combatir la corrosión en el hormigón armado en la infraestructura urbana e industrial?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar un sistema para la prevención y modelación de la corrosión en el hormigón armado en la infraestructura urbana e industrial.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Diagnosticar cuáles son las causas por la cual ocurre la corrosión en hormigón armado.
- Identificar las consecuencias de la corrosión en el hormigón armado.
- Simular mediante el uso del software COMSOL Multiphysics la corrosión que se puede presentar en el acero del hormigón armado. Estableciendo distintos ambientes.
- Determinar la factibilidad de la aplicación del sistema de prevención de la corrosión en el hormigón armado.

## **1.4 Justificación de la investigación**

Cuando se crea una estructura, se hace con el objetivo de que esta sea factible, confiable, segura y que tenga una larga vida útil. Todo esto depende en parte de la calidad de los materiales, la preparación y construcción de la estructura. Sin embargo, aun cumpliendo lo anterior existen ciertos patógenos, como lo es la corrosión, que no está dejando que las edificaciones cumplan con su vida útil, durando menos de lo preestablecido.

La presente investigación se justifica porque es necesario conocer el estado físico en el que se encuentra la estructura, así como también, tomar acciones que influyan en la velocidad de corrosión del hormigón armado, para que cumplan de forma óptima sus objetivos.

## **1.5 Alcance**

En el presente trabajo de grado se realizará una investigación, documentación y modelación, donde se buscarán las causas de la corrosión en el hormigón armado y se

creará un nuevo sistema de prevención, que será probado mediante la simulación en el software COMSOL Multiphysics en diferentes entornos, para determinar la velocidad de corrosión que existe con este sistema y compararla con la velocidad de corrosión sin él.

### **1.6 Limitaciones**

Limitaciones económicas: al ser dos personas realizando el trabajo, se ve limitada a la economía de estos y solo de estos debido a que este no está siendo financiado por ningún patrocinador externo, entonces si se llegan a generar gastos dentro de la investigación, los investigadores son responsable de pagarlo.

Limitación de recursos: esta investigación se pudo realizar con un ensayo real de hormigón armado para conseguir resultados más precisos y reales. Pero debido a la falta de recursos que poseen los investigadores no se podrá realizar. Solo realizando una modelación en computadora en lugar de realizar el ensayo practico en el hormigón armado.

Limitación de tiempo: esta investigación solo tiene una margen de realización de dos semestres académicos, lo cuales son 8 meses, lo cual limita a los investigadores a realizarla en un periodo de tiempo corto.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 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:

En primer lugar, Toro, Manuel (2019), desarrolló un trabajo de grado para optar por el título de ingeniería mecánica titulado **“Desarrollo De Un Sistema De Detección Y Prevención De Patologías En Sistemas Estructurales Utilizados En La Infraestructura Urbana E Industrial”** presentado en la Universidad José Antonio Páez. Este trabajo se realizó con la finalidad de crear un procedimiento para la detección, simulación y prevención de las patologías en sistemas estructurales utilizados en la infraestructura urbana e industrial. Se usó el software COMSOL multiphysics para modelar los sistemas estructurales, diagnosticar las patologías y combatir las planteando una metodología de detección y prevención. Donde al final se comparó un sistema estructural normal con la nueva metodología empleada para comprobar si era efectiva.

Dicho trabajo de grado contribuye de manera directa a la investigación presente, ya que estudia las patologías que existen en los sistemas estructurales de los edificios, donde el hormigón armado está enmarcado, y ayuda conocer cómo crear un sistema de prevención de manera adecuada, además nos da conocimientos básicos de cómo usar el software COMSOL multiphysics el cual también se planea utilizar en el presente de investigación.

Así mismo, Herrera, Mario (2017), realizó una tesis para optar por el título de ingeniero civil que tiene como nombre **“Corrosión del acero corrugado e integridad en estructuras de concreto armado en el asentamiento humano San José de Manzanares en el 2017”** presentado en la Universidad César Vallejo de Perú. Se hizo con la finalidad de analizar la influencia de la corrosión del acero corrugado en la integridad de estructuras de concreto armado en el Asentamiento

Humano San José de Manzanares. Analizando fenómenos como la sanidad del suelo, la humedad ambiental y la presencia de fisuras en las estructuras.

El trabajo de herrera ayuda a cómo realizar una apropiada detección de la corrosión que ocurre en las estructuras de hormigón armado, estudiando los fenómenos antes ya mencionados que afectan a que esta suceda. Por lo tanto, se tratará de estudiar estos factores lo más posible para la obtención de un sistema de prevención.

También, Simões, Gonçalo (2013) realizó un estudio para optar por el master de ingeniería civil titulado **“Estudio Experimental De Los Efectos De La Corrosión De Las Armaduras En Vigas Continuas De Hormigón Armado”** presentado en la Universidad Politécnica de Catalunya. Se enfocó en estudiar los efectos estructurales de la corrosión mediante la realización de ensayos de laboratorio sobre vigas continuas de hormigón armado sometidas a corrosión forzada, bajo diversos niveles de carga. Los resultados obtenidos destacan la variación de la curva tensión-deformación de las barras corroídas, donde se observa una pérdida de capacidad última, deformación última y de plasticidad en relación al acero corroído.

Debido a que no se realizarán ensayos prácticos de laboratorio, este trabajo brindará estos resultados, y se van a poder comparar con los de la presente investigación, la cual va realizar un conjunto de simulaciones mediante el uso del software COMSOL Multiphysics. Además de todo esto, este trabajo, ya que estudia los efectos de la corrosión en el hormigón armado, ayuda a ver la importancia que tiene la aplicación de sistemas de prevención en estas estructuras.

Por último, Bermúdez, Miguel (2006), desarrolló una tesis Doctoral para optar por el doctorado en ingeniería de caminos, canales y puertos titulado **“Corrosión De Las Armaduras Del Hormigón Armado En Ambiente Marino: Zona De Carrera De Mareas Y Zona Sumergida”** presentado en la Universidad Politécnica De Madrid. La investigación de Bermúdez tuvo como objetivo desarrollar un “Manual para el diseño y la ejecución de cajones de hormigón estructural”, el cual incluye apartados relativos a los materiales que debían utilizarse y a las medidas necesarias

que se debían adoptar para garantizar la durabilidad del hormigón de la estructura. Esta trata de contribuir al mejor conocimiento del comportamiento del hormigón armado en ambiente marino con fines normativos, abordando aspectos relativos tanto a la calidad exigible al hormigón situado en este ambiente como a la selección del método de ensayo adecuado para evaluar la durabilidad del hormigón armado.

Esta investigación brinda aspectos importantes para la realización del presente trabajo, ya que ayuda a ver los parámetros necesarios para realizar un sistema ejecutable para la protección del hormigón armado. Además de prestar el entorno marino, el cual es uno de los entornos que se estudiarán, dando la base necesaria para estudiar cómo afecta el fenómeno de la corrosión en un ambiente de mar.

## **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). Es decir, estas bases son importantes para la correcta obtención de los resultados, ya que es necesario recolectar todos los datos acerca del tema para explicar la problemática a partir de un conjunto de teorías y supuestos ya establecidos y publicados.

### **2.2.1 Corrosión**

Según Revie y Uhlig (2008), la Corrosión “es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas”. Para el caso del deterioro relacionado con otros tipos de materiales, como los polímeros y cerámicos, se utiliza el término degradación

Estos materiales metálicos son obtenidos a través del procesamiento de minerales y menas, que constituyen su estado natural, induciéndolos a un estado de mayor energía. Además, según Javaherdashti (2008), el fenómeno de la corrosión ocurre debido a que, con el tiempo, dichos materiales tratan de alcanzar su estado

natural, el cual constituye un estado energético de menor potencial, lo que les permite estabilizarse termodinámicamente.

ECCA, (2011), dice que la mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: unos electrodos (un ánodo y un cátodo), un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde de una solución acuosa, y una conexión eléctrica entre los electrodos. La figura 1 muestra de forma representativa un esquema de estos elementos, formando lo que se conoce como una celda electroquímica. Las ecuaciones de las reacciones que ocurren en los electrodos son las siguientes:

- En el ánodo:

Ambas reacciones ocurren de forma simultánea. Como se observa en las ecuaciones, el ánodo cede electrones al sistema cuando reacciona, aumentando su número de oxidación, cambiando de su estado metálico base a cationes que se disuelven en el electrolito, siendo este el material que se sufre el fenómeno de corrosión; mientras que, en el cátodo, los aniones metálicos absorben electrones, disminuyendo su número de oxidación, por lo que cambian a su estado base.

El potencial electroquímico define la susceptibilidad o la resistencia de un material metálico a la corrosión, cuyo valor varía en dependencia de la composición del electrolito. Cuanto más positivo sea el valor de dicho potencial, más noble (resistente) es el material. Mientras que, en el caso contrario, cuanto más negativo sea este, más reactivo es el material a la corrosión. La serie galvánica consiste es una tabla donde se ubican diferentes tipos de materiales respecto al potencial electroquímico de estos. La figura 2 muestra representativamente una tabla de serie galvánica para algunos metales y aleaciones comunes.



Figura 2. Serie galvánica para algunos metales y aleación comunes.

Fuente: ECCA (2011)

Los productos que se forman a partir del proceso de corrosión, sobre la superficie del material, pueden afectar de manera negativa o positiva, las propiedades del material, dependiendo de su naturaleza y las condiciones que lo rodean. Para el caso del hierro (y otros metales), el producto que se forma se conoce como herrumbre, y tiene una menor densidad que el metal base, lo que provoca que este se desprenda de la superficie, facilitando que la corrosión continúe ocurriendo, consumiendo el material.

Por otro lado, para otros tipos de metales, como el aluminio, el níquel o el cromo, los productos de la corrosión tienen una mayor densidad que el material base, formando una capa sólida y estable sobre la superficie de este, evitando que la corrosión se extienda, protegiendo al material. Este proceso se conoce como pasivación, fenómeno que brinda la denominación de inoxidable a un material como, por ejemplo, los aceros inoxidables.

A continuación, se presentarán algunos tipos de corrosión, siendo los que se pueden observar con mayor frecuencia. También se mencionarán los factores que mayor efecto tienen sobre la incidencia y la velocidad de este fenómeno. Y, finalmente, se presentarán algunos aspectos a tomar en cuenta respecto al control de la corrosión y la protección de materiales.

### **2.2.1.1 Tipos de Corrosión**

Existen muchos tipos de procesos de corrosión diferentes que se caracterizan dependiendo tanto de la naturaleza del material y de las condiciones del medioambiente, donde se desarrollen. Una forma común de clasificar los tipos de corrosión, es mediante las siguientes cuatro categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada, corrosión combinada con un fenómeno físico, y otros tipos.

- **Corrosión generalizada (uniforme)**

De acuerdo a Revie (2011), “la corrosión generalizada, también nombrada como corrosión uniforme, ocurre sobre toda la superficie del material de forma

homogénea, deteriorándolo completamente”. Este tipo de corrosión es el que mayor pérdida de material provoca, pero es relativamente fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente producido por este es de rara ocurrencia. Se puede observar comúnmente en materiales, sobre todo en la industria de la construcción, a base de hierro no aleado con metales inoxidables, como el níquel y el cromo.

La velocidad de corrosión para estos casos, es altamente influenciada por la existencia de impurezas y fases distintas en el material, ya que estas inducen a una variación en la energía potencial, formando electrodos a pequeña escala, propiciando el proceso de corrosión.

- **Corrosión localizada**

La corrosión localizada, al contrario de la corrosión uniforme, representa un mayor riesgo potencial, debido a su difícil detectabilidad ya que se manifiesta en zonas específicas en el material, determinadas tanto por la naturaleza del material, la geometría de este, y las condiciones del medio al que se somete. Los procesos de corrosión localizada de mayor ocurrencia son galvánicos, por fisura, por picaduras, por cavitación y microbiológica.

- **Corrosión galvánica**

Revie (2011) dice que, “la corrosión galvánica ocurre cuando existe una unión, física o eléctrica, entre metales de diferente naturaleza, lo cuales, en la presencia de un electrolito, forman una celda electroquímica, donde el material de menor potencial electroquímico es el que se corroe”.

Según Javaherdashti (2008), “un factor de importante consideración es la relación de área de la zona de contacto entre los materiales. Entre mayor sea la relación del ánodo respecto al cátodo, el proceso de corrosión ocurre con mayor velocidad”.

- **Corrosión por fisuras**

Este tipo de corrosión es similar a la corrosión galvánica, que se produce en zonas estrechas donde la concentración de oxígeno es mucho menor que en el resto

del sistema, y cuyo efecto induce a que estas zonas de menor concentración de oxígeno actúen como un ánodo, propiciando el proceso de corrosión, en las fisuras.

- **Corrosión por picaduras (pitting)**

La corrosión por picadura, conocida también como pitting se presenta en materiales pasivados, debido a las características geométricas del sistema, existe una acumulación de agentes oxidantes y un incremento del pH del medio, lo que propicia el deterioro de la capa pasivada, permitiendo que la corrosión se desarrolle en éstas zonas puntuales.

- **Corrosión por cavitación**

Revie (2011), define la corrosión por cavitación “ocurre en sistemas de transporte de líquidos, hechos de materiales pasivados, donde por cambios de presión en el sistema, se producen flujos turbulentos que forman burbujas de aire, las cuales implosionan contra el material del sistema, deteriorando la capa de pasivación, facilitando el desarrollo del proceso de corrosión, de forma similar a la corrosión por picaduras, cuya diferencia se observa, en que el efecto de la cavitación es de mayor tamaño”.

- **Corrosión microbiológica**

La corrosión microbiológica, en realidad no es un tipo de corrosión en sí, sino que más bien es un fenómeno que facilita el desarrollo de otros procesos de corrosión. Las bacterias son los microorganismos más influyentes en este caso, por lo que también es conocida como corrosión bacteriana y se produce en sistemas de transporte de líquido, facilitando la corrosión por picaduras.

La naturaleza del líquido que se transporta en estos sistemas, propicia la acumulación y reproducción de bacterias, las cuales se aglomeran, y propician las condiciones, como variación en la concentración de sales y oxígeno, para que se desarrollen otros procesos de corrosión como el pitting.

### **2.2.1.2 Corrosión combinada con un fenómeno físico**

Este tipo de corrosión también se puede incluir dentro de la clasificación de corrosión localizada, pero la diferencia con estos es que se encuentran condicionados por la presencia de un fenómeno físico, que funciona como iniciador del proceso de corrosión.

- **Corrosión – erosión**

Este tipo de corrosión se observa en sistema de transportes de fluidos hechos con materiales pasivados, donde existen partículas de mayor dureza que la capa de pasivación. Estas partículas al estar en movimiento, erosionan la capa pasivada, permitiendo que el proceso de corrosión se desarrolle.

- **Corrosión – tensión**

Según Revie (2011). “Ocurre cuando en un material, sometido a esfuerzo de tensión, ya sea de forma interna o externa, se forman pequeñas fisuras, que dan inicio al proceso de corrosión”. El material que permanece en ambos fenómenos, se deteriora con mayor rapidez que, si estuviese bajo el efecto individual de cada uno, ya que la corrosión debilita el material, lo cual permite que la tensión tenga mayor impacto, fracturando en mayor medida el material, lo cual a su vez incita a que la corrosión se propague en un área mayor, y así, sucesivamente.

- **Corrosión – fatiga**

Este proceso se desarrolla en materiales, sujetos a esfuerzos externos, similar al de tensión, con la diferencia de que estos esfuerzos son cíclicos o fluctuantes. De igual forma que con el proceso de tensión, el material se deteriora en mayor medida mediante la combinación de los dos fenómenos, comparado a cada uno por separado.

### **2.2.1.3 Otros tipos de corrosión**

También existen muchos tipos de corrosión que no caen dentro de las categorías anteriores. Algunos de estos son, la desaleación, la corrosión filiforme y la oxidación.

- **Desaleación**

De acuerdo a Revie (2011), “La desaleación es un proceso de corrosión que actúa sobre aleaciones metálicas, en donde uno de los elementos, de mayor afinidad con el oxígeno, se separa de la aleación y dejan una estructura porosa de pobres propiedades conformada por el resto de constituyentes”. El proceso se nombra alternativamente respecto al elemento que se separa de la aleación como, por ejemplo, la descincificación para el latón, aleación que sufre comúnmente de este tipo de corrosión, en la cual se separa el zinc de la matriz de cobre.

- **Filiforme**

Conforme a Revie y Uhlig (2008), “La corrosión filiforme se presenta en ambientes de alta humedad sobre materiales con recubrimientos orgánicos (pinturas), los cuales, al ser rayados, se induce el desarrollo de la corrosión, que se propaga como filamentos delgados”.

- **Oxidación**

La oxidación es un tipo de corrosión que se desarrolla en procesos de alta temperatura, en la presencia de algún gas oxidante, como el oxígeno, azufre y elementos halógenos. Las reacciones relacionadas son meramente químicas al no existir un electrolito de por medio, por lo que también se conoce como corrosión seca. Las moléculas del gas oxidante reaccionan con el material involucrado, donde, por efecto de la temperatura, el compuesto formado se difunde al interior del material, permitiendo que el proceso continúe, fragilizando el material.

Entre los elementos más imprescindibles que se usa en la construcción, debemos destacar la presencia e importancia del hormigón, un material elaborado a través de la mezcla de cal o cemento con grava, agua y arena. Al unirlos y dejarlas secar, se fragua, endureciéndose y consiguiendo una gran resistencia. Hablando en un lenguaje mucho más técnico, la creación del concreto implica la fusión de un aglomerante, agregados y agua, así como también puede contar con otros aditivos que cambien las características propias del producto.

## **2.2.2 Hormigón**

Dependiendo de sus componentes, el hormigón adquiere diferentes propiedades, adaptándose a diferentes usos. Así pues, se puede encontrar el hormigón ligero, el hormigón normal y el hormigón pesado. Cada tipo de mezcla tiene su uso, por lo que no todos reaccionan igual ante diferentes clases de esfuerzos de compresión. Por ello, el hormigón armado se utiliza en estructuras de acero y el hormigón asfáltico en carreteras.

El hormigón es un material utilizado desde la antigüedad, perfeccionándose durante siglos hasta la actualidad, que se puede conseguir un elemento muy útil para todo tipo de construcciones. Además, actualmente se suele incluir también materiales reciclados, por lo que se consigue cuidar el medio ambiente.

### **2.2.2.1 Hormigón armado**

Una estructura de hormigón armado está formada de hormigón (cemento, portland, arena y pedregullo o canto rodado) y de una armadura metálica, que consta de hierros redondos, la que se coloca donde la estructura, debido a la carga que soporta, que está expuesta a esfuerzos de tracción. En cambio, se deja el hormigón solo, sin armadura metálica, donde este sufre esfuerzos de compresión.

Tal disposición de los dos materiales (hormigón y hierro) está basado en el hecho de que el hormigón resiste de por sí muy bien a la compresión, hasta 50 kg por  $\text{cm}^2$ , siendo que el hierro presenta una gran resistencia a la tracción, de 1000 a 1200 kg por cm y más (figura 3).

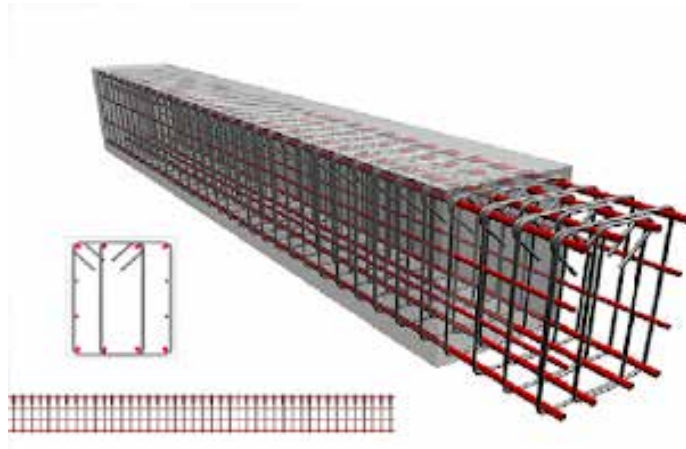


Figura 3. Tipo de viga de hormigón armado.

Fuente: Muñoz (2018)

#### **2.2.2.2 Usos del hormigón**

Este material es usado en mega construcciones, ya sea en puentes, grandes edificios, carreteras o túneles. Son construcciones que necesitan de una gran resistencia y durabilidad, por lo que el uso de este material es muy beneficioso. Durante su uso, la mezcla debe protegerse del exterior para que no pierda sus propiedades.

Dependiendo de su uso, existen diferentes tipos: hormigón armado, micro hormigón, concreto translúcido, permeable, ciclópeo y de alta densidad. Todos ellos imprescindibles para las construcciones de hoy en día que encontramos en todo el mundo.

#### **2.2.2.3 Características del hormigón**

Dependiendo de los materiales empleados para realizar la mezcla de hormigón, se verán potenciadas algunas características propias de este elemento. Sin embargo, se puede distinguir algunas características comunes:

- **Resistencia y durabilidad:** utilizado en muchas construcciones, el hormigón está presente en puentes, edificios o carreteras, ya que es un elemento con gran resistencia, una característica que aumenta con el tiempo. De hecho, es capaz de incrementar su fuerza con el paso del tiempo, soportando la fuerza de desastres naturales y accidentes. Además, no se debilita con el moho o la humedad.
- **Bajo mantenimiento:** es un material inerte, no poroso y compacto, por lo que no hay que hacer mucho esfuerzo en su mantenimiento y logra mantener sus propiedades claves durante mucho tiempo.
- **Resistencia al fuego:** otra de las características principales del hormigón es su resistencia al fuego, siendo una gran opción de material a la hora de proteger de incendios a un edificio.
- **Versatilidad:** como hemos mencionado anteriormente, el hormigón tiene presencia en multitud de edificios y grandes estructuras, por lo que es útil en muchos tipos de construcciones.
- **Masa térmica:** no solo es un material muy resistente, sino que es capaz de poner barreras al calor, reteniendo mejor las temperaturas. De esta manera, los edificios necesitarían menos calor durante las temporadas de frío y menor cantidad de refrigeración durante los meses de verano. Esto implica no solo una mayor resistencia a las temperaturas, sino también supone un gran ahorro en energía.
- **Asequibilidad:** el hormigón no es un material costoso, por lo tanto, es fácil justificar su uso en multitud de construcciones.
- **Reflexión de la luz:** el hormigón posee el llamado efecto albedo, es decir, cuanto mayor es la cantidad de luz que se refleja en este material, menor es el calor que absorbe.

- **Producción y utilización local:** al ser un elemento pesado, dificulta su traslado hasta la zona de la construcción. Por ello, siempre que se realiza la mezcla, la zona de producción no debe estar lejos de la zona de su empleo.

#### **2.2.2.4 Cuidados del hormigón**

Aunque sea un material muy resistente, el hormigón necesita de unos cuidados específicos para mantener sus propiedades en perfecto estado, cumpliendo con la finalidad de su uso. Los condicionantes meteorológicos a los que este elemento está expuesto son numerosos, por lo que hay que tener especiales cuidados adaptados a ellos.

Uno de los puntos claves del cuidado del hormigón es su curado, un proceso por el que se mantiene la humedad de la mezcla para evitar que el agua se evapore para completar el proceso de endurecimiento de la misma. Por ello, se humedece de manera periódica para que no se evapore la que es propia de la mezcla, conservando sus propiedades. Por otro lado, también pueden utilizarse telas para proteger la mezcla durante su uso, de manera que no se exponga al sol o al frío del exterior y se protejan las propiedades del hormigón. Este proceso debe durar entre cinco y siete días.

La exposición al frío es uno de los grandes problemas a los que se enfrenta el hormigón, ya que la mezcla. Para que este material obtenga resistencia, se debe hidratar la mezcla con líquido, por lo que estar expuesta a agua congelada dificulta que se culmine el proceso. En estados de menos de cinco grados ya se detectan dificultades en el fraguado de la mezcla, lo que puede repercutir en la durabilidad y resistencia del hormigón. Para luchar contra el frío, lo principal es no hacerlo durante las horas de mayor frío, utilizar menor cantidad de agua para el proceso de curado o usar aceleradores y aditivos que ayuden a mejorar el proceso. Así mismo, el uso de anticongelantes también puede ayudar a completar la mezcla.

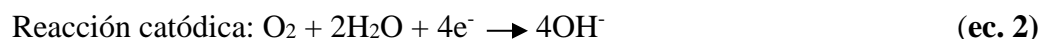
Por otro lado, cuando hay excesivas altas temperaturas también se puede afectar al proceso de curado y afectar a la resistencia del hormigón. En este caso, el uso de

aditivos poli funcionales será imprescindible, así como el añadir agua a la mezcla que ayude a conservar sus propiedades y mantenga la humedad.

### 2.2.3 Mecanismos de corrosión en hormigón armado

El acero dentro del hormigón se pasiva al formarse óxidos superficiales que protegen al metal subyacente. Esto se produce debido a la naturaleza altamente alcalina del hormigón, con un pH cercano a 13. La corrosión del acero en el hormigón puede comenzar cuando se produce una disminución del pH (debido a procesos de carbonatación o lixiviación de compuestos de calcio y óxidos alcalinos) a valores en los que los óxidos pasivantes son inestables, o cuando en la superficie del acero se dispone un contenido de iones cloruro suficiente tal que se producen deterioros localizados en la capa pasivante. En el primer caso, la corrosión se produce en forma generalizada, mientras que en el segundo la corrosión es localizada.

Una vez producida alguna de las condiciones despasivantes mencionadas, el proceso de corrosión electroquímica requiere de cuatro participantes necesarios: el ánodo que aporta electrones y se oxida (Ecuación 1), el cátodo donde se captan los electrones y se produce la reducción (Ecuación 2), el conductor electrónico entre ánodo y cátodo, y el conductor iónico o electrolito. Alternativamente, en un medio ácido la captación de electrones puede producirse por parte de los iones  $H^+$  según la reacción de la Ecuación 3.



De acuerdo a Tuutti (1982), “la velocidad del fenómeno de corrosión depende de la relación entre los procesos anódico y catódico (de oxidación y reducción). La menor de las velocidades de estos procesos determinará la velocidad de corrosión”. En el caso de las armaduras de acero dentro del hormigón, la velocidad pueda determinada por dos factores, la velocidad de llegada de oxígeno al cátodo para reducirse en su superficie, y la velocidad de transporte iónico en el electrolito.

En el primer caso se dice que el control es catódico, y se produce cuando no hay oxígeno disponible en cantidad, por ejemplo, el caso en que el hormigón de recubrimiento se encuentre saturado permanentemente. El segundo caso, se denomina de control anódico, y depende del electrolito (es decir, de la solución de poro del hormigón).

Según Rostam (2000), “el deterioro de una estructura de hormigón armado debido a la corrosión de armaduras se manifiesta por diversos mecanismos de trascendencia creciente” (Figura 4). Inicialmente las armaduras se encuentran pasivas dentro del hormigón, hasta que el proceso de corrosión se inicia con la despasivación de las armaduras, perdiéndose la protección química frente a la corrosión.

Ya comenzado el deterioro a una velocidad apreciable, un volumen suficiente de productos de corrosión conduce a la fisuración del hormigón de recubrimiento, perdiéndose la protección física frente al exterior. Si la fisuración avanza sin control, comienza el desprendimiento del recubrimiento y las armaduras se ven más expuestas al medio. Finalmente, ya sea por la pérdida de adherencia entre acero y hormigón o por la pérdida de sección de las armaduras, se produce el colapso de la estructura. Como referencia, generalmente se concibe como límite mínimo del nivel de comportamiento al que produce una fisuración generalizada.

Se establecen entonces dos períodos de desarrollo del proceso comprendidos dentro de la vida útil. Uno de iniciación y otro de propagación (Figura 5). El período de iniciación es el tiempo necesario de incubación de las condiciones necesarias para el comienzo de la degradación. El período de propagación es el tiempo transcurrido entre el inicio del proceso y el momento en el cual el grado de deterioro de la estructura es tal que no cumple con las condiciones de servicio requeridas.

Ya que el período de propagación de la corrosión de armaduras se desarrolla a una velocidad relativa elevada, resulta conveniente la evaluación de los parámetros que gobiernan el desarrollo del período de iniciación. En general se concibe como período de iniciación a aquel que se requiere para la despasivación de las armaduras,

mientras que los mecanismos de fisuración y desprendimiento del recubrimiento se conciben dentro del período de propagación.

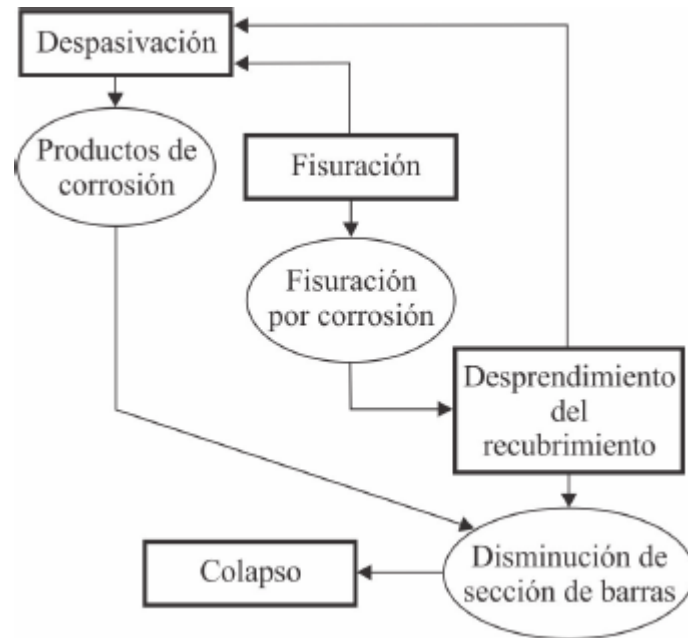


Figura 4. Deterioro del hormigón armado por corrosión de armaduras.

Fuente: Villagrán, Yury (2012)

Los factores que influyen en la duración del período de iniciación pueden ser internos o externos. Los factores internos se relacionan principalmente con las características del hormigón de recubrimiento. Entre ellos, los de mayor peso son los que determinan la resistencia del material al transporte de materia por su estructura: porosidad de la matriz cementícea (determinada por la relación agua/cemento y el curado utilizado), contenido y tipo de cemento, calidad de la interface matriz-agregado, y porosidad de los agregados. Los factores externos están determinados por la agresividad del medio, caracterizada por la temperatura media y humedad relativa, condición de los vientos y las precipitaciones, distancia y altura respecto al nivel del mar (en el caso de ambiente marino), películas protectoras y revestimientos de la

estructura. El grado de exposición disminuye al no haber un contacto directo con el medio.

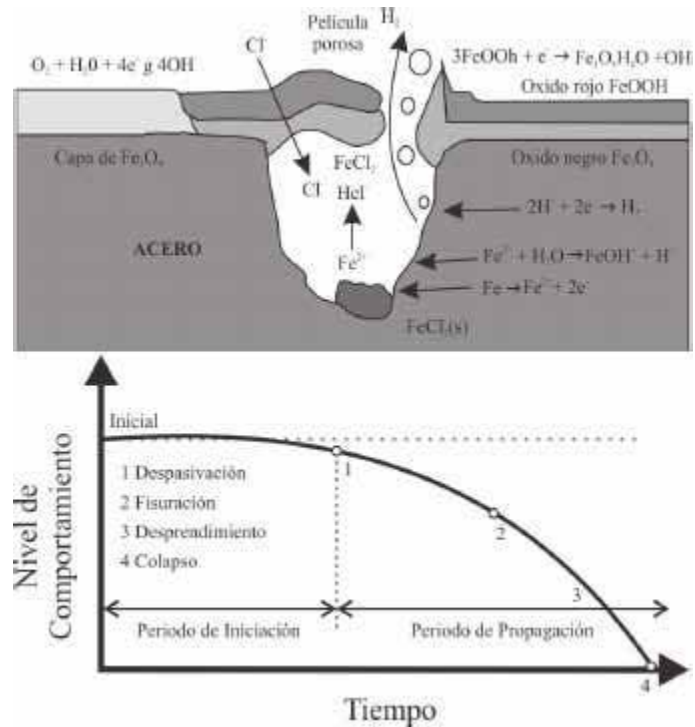


Figura 5. Evolución de la corrosión de armaduras en hormigón armado.

Fuente: Villagrán, Yury (2012)

#### 2.2.4 Efectos del medio ambiente sobre la corrosión

La corrosión atmosférica, que es la causa más frecuente de la destrucción de metales y aleaciones, es posible únicamente cuando la superficie metálica está humedecida. El mecanismo de corrosión es de naturaleza electroquímica.

El electrolito es una capa de humedad que unas veces es extremadamente delgada e invisible y otras moja perceptiblemente el metal. La corrosión depende del tiempo en que esta capa permanece sobre la superficie metálica.

Los contaminantes gaseosos y sólidos potencian el efecto corrosivo de los factores meteorológicos. Así, el proceso de corrosión depende fundamentalmente de la humedad relativa del aire y de los contaminantes presentes en el mismo.

El cloruro de sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) son los principales contaminantes corrosivos en la atmósfera. El primero es un contaminante "natural" y llega a la atmósfera proveniente del mar (atmósfera marina). El SO<sub>2</sub> se encuentra en el aire, y es originado principalmente por la combustión de combustibles fósiles. Los niveles más altos de contaminación sulfurosa se registran en las áreas industriales (atmósfera industrial) y en las grandes ciudades (atmósfera urbana). El grado de contaminación salina depende de la distancia al mar. Más allá de unos pocos cientos de metros del borde del mar, la salinidad y la velocidad de corrosión suelen decaer ostensiblemente.

La humedad relativa es importante en el grado de corrosión atmosférica. El hierro desnudo no se corroe en zonas urbanas ni industriales con una humedad relativa (HR) ambiente menor de 70%. La humedad crítica está asociada con la naturaleza higroscópica del sólido contaminante presente, como la de los productos de corrosión. Sus valores oscilan entre el 50 y el 70% en el acero, cobre, níquel y zinc.

Las partículas de polvos en suspensión en la atmósfera, en conjunción con la humedad, forman celdas de corrosión por aireación diferencial en la superficie. A través de la absorción de SO<sub>2</sub> también pueden acelerar la corrosión en la zona de contacto con el metal.

Tanto la exposición directa como el resguardo de la lluvia pueden ser beneficiosos o perjudiciales. El agua de lluvia puede lixiviar inhibidores solubles de revestimientos protectores, así como productos de corrosión con características similares.

Otro tipo de contaminantes que pueden estar presentes en ciertas atmósferas son los vapores de ácidos orgánicos de tipo alifático (fórmico, acético, propiónico, etc.), originados por degradación de algunas maderas, plásticos, gomas y pinturas, y constituyen otra fuente de corrosión atmosférica. En atmósferas húmedas concentraciones muy bajas de estos compuestos, hasta de 0.1 partes por millón (ppm) resultan agresivas para algunos metales.

### **2.2.5 Durabilidad de las estructuras de hormigón armado**

La Instrucción Española de Hormigón Estructural (2008), define “La durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis”.

La cuestión de la durabilidad de las estructuras de hormigón armado no se refiere únicamente a los procesos de deterioro por corrosión descritos anteriormente. A lo largo de este trabajo, se describen los fenómenos de durabilidad de estructuras cuando son sometidas a la corrosión de las armaduras, que es el principal objetivo, pero en la durabilidad se deben tener en cuenta otros procesos tales como: procesos biológicos en el hormigón, mecanismos de transporte en el hormigón, procesos químicos en el hormigón, procesos físicos en el hormigón, entre otros.

Como fue dicho anteriormente, la función principal de una estructura es resistir a las acciones a la que está sujeta durante el tiempo en que está en servicio, o sea, durante su vida útil. Durante ese periodo, la estructura no debe solamente ser capaz de soportar las acciones mecánicas, siendo también muy importante ser competente cuando se encuentra ante acciones ambientales en ese mismo periodo.

Aun, importa referir que hay procedimientos que mejoran la vida útil de las estructuras y que por eso se deben tener en cuenta en la fase de proyecto y en la fase de ejecución. En la fase de proyecto se debe incluir las medidas necesarias para que la estructura alcance la duración de la vida útil acordada, de acuerdo con las condiciones de agresividad ambiental y con el tipo de estructura. La agresividad a la que está sometida una estructura se identificará por el tipo de ambiente de acuerdo con clases generales de exposición frente a la corrosión de las armaduras y con clases específicas de exposición relativas a los otros procesos de degradación que procedan para cada caso.

Conforme al CEB/FIP Model Code 1990, publicado por Thomas Telford (1993) se entiende por Vida útil “el periodo de tiempo durante el cual la estructura es capaz de desempeñar las funciones para las cuales fue proyectada, sin necesidad de intervenciones no previstas”.

Según Simões Gonçalo (2013),

Las normas existentes, siguiendo el Código Modelo CEB/FIP 1990, exige que haya una relación entre el periodo de vida útil de la estructura en cuestión y la importancia que esta tiene, o sea, cuanto más el número de vidas de personas está en riesgo, mayor deberá ser el periodo de vida útil de la estructura. Este aspecto hace mucho sentido, ya que no se puede por ejemplo conceder el mismo período de vida útil a una estructura de almacenamiento agrícola y de un puente, una vez que la diferencia de las personas que utilizan estas estructuras es demasiado grande, y por eso tienen riegos diferentes. (pág. 40)

En el cuadro (tabla 1) que se sigue se demuestran los periodos de vida útil en función del tipo de estructura

<i>Tipo de estructura</i>	<i>Vida útil (años)</i>
Estructuras de carácter temporal	Entre 3 y 10
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal	Entre 10 y 25
Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas	Entre 15 y 50
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media	50
Edificios de carácter monumental o de importancia especial	100
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta	100

Tabla 1. Vida útil de los diferentes tipos de estructuras.

Fuente: EHE (2008)

## **2.2.6 COMSOL Multiphysics**

COMSOL es un software CAD/CAE utilizado para el modelado, la simulación y el análisis de fenómenos físicos 3D en ingeniería, adentrándose en problemas de fluidos, estructurales, térmicos, electromecánicos, entre otros, que permite definir la geometría 3D especificando datos como las cargas, materiales, flujos y finalmente la visualización previa del análisis para luego ejecutar el proceso y ver reportes finales. COMSOL Multiphysics trae consigo una cantidad de módulos que permiten al usuario abarcar una buena cantidad de áreas de la ingeniería, este proyecto usará el módulo de corrosión para las simulaciones.

### **2.2.6.1 Modulo de corrosión de COMSOL Multiphysics**

La mayor parte de la corrosión ocurre debido a los procesos de reacción electroquímica 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, comprender el grado en que podría producirse corrosión durante la vida útil de una estructura e implementar medidas preventivas para inhibir la corrosión electroquímica, a fin de proteger sus estructuras. El módulo se puede utilizar para simular corrosión a micro escala para investigar los mecanismos fundamentales y a escalas más grandes para determinar cómo proteger las estructuras masivas o de largo alcance de la corrosión.

El módulo de corrosión incluye características, interfaces y modelos de ejemplo que permiten un enfoque directo a la simulación de todos los procesos de corrosión electroquímica, como la corrosión galvánica, de picaduras y fisuras. El transporte en material corrosivo y corroído se explica a través del modelado dinámico de los cambios en la superficie corroída y el electrolito en contacto con dicha superficie. El módulo de corrosión incluye interfaces estándar para modelar el potencial de corrosión y las distribuciones de corriente de los procesos de corrosión donde la cinética de reacción electroquímica puede ser descrita por Tafel, Butler-

Volmer u otras ecuaciones definidas por el usuario. Las reacciones electroquímicas se resuelven completamente junto con potenciales eléctricos en electrolitos y estructuras metálicas, reacciones químicas homogéneas y fenómenos únicos de los procesos de corrosión, como el cambio de la forma de una superficie metálica debido a la corrosión.

### **2.3 Definición de términos**

**Carbonatación:** 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.

**Fisuras:** Son roturas que aparecen generalmente en la superficie del mismo, debido a la existencia de tensiones superiores a su capacidad de resistencia. Cuando la fisura atraviesa de lado a lado el espesor de una pieza, se convierte en grieta.

**Pasivación:** Es la formación de una película relativamente inerte sobre la superficie de un material (frecuentemente un metal), que lo enmascara en contra de la acción de agentes externo.

**Ph:** Medida de acidez o alcalinidad que indica la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución o sustancia.

**Oxidación:** Proceso químico que implica la pérdida de electrones por parte de una molécula, átomo o ion. Cuando esto ocurre, decimos que la sustancia ha aumentado su estado de oxidación.

**Reducción:** reacción química que consiste en la obtención de electrones por uno de los átomos involucrados en la reacción. El término se refiere al elemento que acepta electrones, ya que el estado de oxidación del elemento que gana electrones disminuye.

**Modelación:** es el proceso mediante el cual se crea una representación o modelo para investigar la realidad.

## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

El marco metodológico está referido al momento que alude al proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos; a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente operacionalizados. En este capítulo se detallan minuciosamente cada uno de los aspectos relacionados con la metodología que se ha seleccionado para desarrollar la investigación, los cuales deben estar justificado por el investigador, cada aspecto debe estar sustentado por el criterio de autores de libros de metodología, por lo que es importante que se acompañen de citas parafraseadas o textual con sus correspondientes soportes de autor. En esta sección se exponen de forma precisa el tipo de datos que se requiere indagar para el logro de los objetivos de la investigación, así como la descripción de los distintos métodos y las técnicas que posibilitarán obtener la información necesaria.

#### **3.1 Tipo de investigación**

La presente investigación se encuentra enmarcada en un tipo de investigación de proyecto factible que, según Arias, (2006, p. 134), señala: “Que se trata de una propuesta de acción para resolver un problema práctico o satisfacer una necesidad. Es indispensable que dicha propuesta se acompañe de una investigación, que demuestre su factibilidad o posibilidad de realización”. La investigación es de este tipo ya que se realizará un sistema de prevención en las estructuras de hormigón armado que podrá ser implementado de manera inmediata, gracias a los datos obtenidos en las simulaciones previas.

#### **3.2 Diseño de la investigación**

Según el autor Arias (2012), define “La investigación de campo es aquella que consiste en la recolección de todos directamente de los sujetos investigados, o de la realidad donde ocurren los hechos (datos primarios), sin manipular o controlar

variables alguna, es decir, el investigador obtiene la información, pero no altera las condiciones existentes.

Según los autores Palella y Martins (2010), define: “El diseño no experimental es el que se realiza sin manipular en forma deliberada ninguna variable. El investigador no sustituye intencionalmente las variables independientes. Se observan los hechos tal y como se presentan en su contexto real y en un tiempo determinado o no, para luego analizarlos. Por lo tanto, en este diseño no se construye una situación específica si no que se observa las que existen”. (pag.87)

De lo anteriormente dicho, esta investigación tiene un diseño de campo no experimental, debido a que se evalúan las variables que causan la corrosión en la estructura de hormigón armado, con la finalidad de simular el comportamiento de este fenómeno y después rediseñado la estructura, para poder protegerlo del mismo, creando e implementando un sistema de prevención contra la corrosión en el hormigón armado.

### **3.3 Nivel de la investigación**

La presente investigación es descriptiva y considerando los criterios de Arias (2012, p. 24), define “la investigación descriptiva consiste en la caracterización de un hecho, fenómeno, individuo o grupo, con el fin de establecer su estructura o comportamiento. Los resultados de este tipo de investigación se ubican en un nivel intermedio en cuanto a la profundidad de los conocimientos se refiere”. El trabajo se enmarca en un nivel descriptivo ya que se determinará los orígenes y las causas del fenómeno de la corrosión, realizando posteriormente las hipótesis y conclusiones respectivas, obtenidas del análisis de las simulaciones sobre el efecto de la corrosión en el hormigón tomando en cuenta diferentes entornos.

### **3.4 Población y Muestra**

Según Arias, (2006). Se entiende por población el "conjunto finito o infinito de elementos con características comunes, para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación. Esta queda limitada por el problema y por los

objetivos del estudio". (Pág. 81). En otras palabras, la población es un conjunto de individuos de la misma clase, limitada por el estudio. Dicho esto, el presente proyecto establece como población al conjunto de entornos o ambientes en los cuales se hará uso de sus respectivas características a la hora de hacer los estudios y simulaciones. Más específicamente, la población estará compuesta por: Un ambiente frío o de montaña, uno marítimo o costero y finalmente un ambiente industrial.

Así mismo, la muestra se define, según Tamayo T. Y Tamayo, M (1997), "es el grupo de individuos que se toma de la población, para estudiar un fenómeno estadístico" (p.38). Por lo tanto, las muestras en este caso serían los lugares específicos dentro de cada ambiente, que logren representarlos correctamente, donde se realizarán las simulaciones.

### **3.5 Técnica e instrumentos de recolección de datos**

Las técnicas constituyen, el momento donde el investigador selecciona las estrategias para recopilar los datos que alimentan el estudio. Desde el punto de vista, Hurtado de Barrera (1998) indica que: "Las técnicas de recolección de datos comprende procedimientos y actividades que le permite al investigador obtener la información necesaria para dar respuesta a sus preguntas de investigación.". (Pag.409). Es decir, la técnica indica cómo se va a recoger la información, posteriormente al ser procesada les dará sentido a los objetivos propuestos.

En consecuencia, para la obtención de la información se aplicarán las siguientes técnicas:

- Observación: La observación es una técnica que consiste precisamente en observar el desarrollo del fenómeno que se desea analizar. Éste método puede usarse para obtener información cualitativa o cuantitativa de acuerdo con el modo en que se realiza.
- Documentos y registros: Esta técnica consiste en examinar los datos presentes en documentos ya existentes, como bases de datos, actas, informes, registros de asistencia, etc. Por lo tanto, lo más importante

para este método es la habilidad para encontrar, seleccionar y analizar la información disponible.

- Software de simulación: Mediante programas digitales se pueden obtener datos muy cercanos a la realidad con los cuales se pueden trabajar para sacar hipótesis teóricas de un problema a tratar.

### **3.6 Fases de la investigación**

Según Sabino (1999, p. 58), “La fase metodológica de la investigación documental, es el estudio de problemas con el propósito de ampliar y profundizar el conocimiento de su naturaleza, apoyándose fundamentalmente en los trabajos previos desarrollados sobre la problemática planteado o relacionados directamente con ella, información y datos divulgados por medios impresos o audiovisuales, permitiendo realizar conceptualizaciones, reflexiones, conclusiones o recomendaciones acerca de la temática abordada en la investigación”.

#### **Fase I. “Diagnóstico de las causas que generan la corrosión en el hormigón armado”**

Mediante técnicas de recolección de datos, se obtienen una lista de factores que atribuyen a la aceleración de la corrosión en el hormigón armado. Estudiando la problemática en todos los entornos ya mencionados, es decir en qué se diferencian cada uno.

#### **Fase II. “Simulación del estado de las estructuras para evaluar las causas”**

Con la utilización del software COMSOL Multiphysics, y los datos recolectados previamente, se simulará la interacción entre las estructuras de hormigón y los diferentes entornos, de los cuales se observará como se fue deteriorando la estructura debido a la velocidad de la corrosión.

#### **Fase III. “Análisis de los datos obtenidos en la Simulación”**

Luego de realizar la simulación, se procederá a recopilar y utilizar los resultados obtenidos en el software COMSOL Multiphysics, de manera de que se

puedan formular hipótesis y conclusiones sobre los factores que afectan más en los entornos seleccionados.

**Fase IV. “Plantear un sistema de prevención teórico a partir de las hipótesis realizadas”**

Mediante las conclusiones e hipótesis realizadas en la fase III se tratará de crear un sistema de prevención el cual se probará su factibilidad mediante la simulación de este dentro de los entornos en el software COMSOL Multiphysics.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

En el siguiente capítulo se procederá a exponer todas las fases de la investigación establecidas en el Marco metodológico, estas a su vez están alineadas con el cumplimiento del objetivo general de la investigación el cual es “Desarrollar un sistema para la prevención y modelación de la corrosión en el hormigón armado en la infraestructura urbana e industrial”.

#### **4.1 Causas generadoras de la corrosión en el hormigón armado**

Cuando la corrosión logra afectar a los metales dentro del hormigón armado es sin duda, un gran problema. La mejor forma para comenzar a combatir esta complicación es analizando sus causas. Teóricamente, lo que ocurre son procesos que involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas) donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: unos electrodos (un ánodo y un cátodo), un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de casos corresponde de una solución acuosa, y una conexión eléctrica entre los electrodos. Pero, cuando se discute esto es fundamental tomar en cuenta varios factores que abarcan el ambiente de trabajo.

Los compuestos de calcio y los óxidos alcalinos junto con el cloruro de sodio (NaCl), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), entre otros, son los encargados de realizar la carbonatación o la lixiviación en el hormigón armado. Estos compuestos son los encargados de reducir el PH en la parte exterior del hormigón, ocasionando que este deje de proteger al metal. Por último, no hay que dejar por fuera el papel que juega la humedad, el polvo y la temperatura en las estructuras.

Dicho esto, la presente investigación está basado en un ambiente urbano e industrial, de las cuales se procederá a tomar en consideración dos ambientes urbanos:

1. Un ambiente marítimo o playero: Representado por el estado Nueva Esparta, o específicamente la ciudad de Margarita.
2. Un ambiente de montaña o de frío: Representado por el estado Mérida.

En cuanto al ambiente industrial se tomó en cuenta, a la ciudad de Valencia, pero debido al decremento de la actividad industrial en dicho lugar, el ambiente será representado por la zona industrial de Monterrey, en el estado Nuevo León, México, el cual a su vez es una de las zonas industriales más contaminantes del mundo.

Para la recolección de los datos necesarios en cada uno de los ambientes, se utilizaron 2 técnicas: En primer lugar, se aplicó un análisis documental, recaudándose información acerca de las condiciones ambientales de cada lugar, esto mediante libros, revistas, publicaciones de periódicos locales y sitios webs culturales. Sin embargo, se consideró que solo esta técnica no era suficiente, entonces se aplicó la observación para complementar la información obtenida, por lo tanto, la observación fue estructurada ya que se sabía de antemano los aspectos que se estudiarían, fue no participante ya que se utilizó medios alternativos como fotografías y videos y, por último, fue colectiva debido a que se realizó en conjunto.

A continuación, se mostrará la plantilla llenada con esta información que se usará en la fase 2 del presente trabajo de investigación.

<b>Registro de Datos</b>		
<b>Nombre:</b>	<b>C.I.:</b>	<b>Fecha:</b>
<b>Nombre:</b>	<b>C.I.:</b>	
<b>Entorno:</b>		
<b>Ubicación del Entorno</b>		
<b>Clima</b>		
<b>Temperatura promedio Anual</b>		
<b>Humedad relativa</b>		
<b>Hidrografía de la región</b>		
<b>Suelos</b>		
<b>Velocidad promedio del Viento</b>		
<b>Observaciones adicionales del entorno:</b>		

Tabla 2. Ficha de registro de datos del entorno.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

#### 4.1.1 Características de la isla de Margarita, estado Nueva Esparta

Se escogió la isla margarita como zona de estudio para el entorno costero ya que esta al ser una isla presenta costa en todas sus fronteras y además es la isla más poblada del Estado de Nueva Esparta, con una población de 400.000 habitantes aproximadamente. Siendo perfecta para estudiar el ambiente marítimo.



Figura 6. Mapa del Estado Nueva Esparta.

Fuente: Wikipedia (2007)

#### · Hidrografía

No existen corrientes importantes de agua permanentes, sino delgados ríos últimamente estacionales debido a los cambios climáticos que han elevado las temperaturas en todo el planeta en los últimos años. Secos la mayor parte del año y con torrenciales en los cortos períodos de lluvia. De ellos, los principales son el San Juan (posas de San Juan), San Francisco, La Asunción, El Valle, Chaguaramal, El Mucó, La Vieja, Negro y Tacarigua.

- **Suelos**

El suelo es delgado y poco desarrollado, sujeto a un intenso proceso erosivo por el sobrepastoreo. Las oscilaciones del nivel del mar y la deforestación realizada para el aprovechamiento agrícola contribuyen a esto. Los suelos de los valles, las tierras de mejor calidad, son bien desarrollados, tienen capa orgánica, están protegidos de la acción erosiva del viento y se encuentran cubiertos de vegetación, pero solo ocupan una pequeña proporción del estado. En las zonas de piedemonte, los conos de deyección y materiales coluviales dan lugar a suelos muy pedregosos. Las islas de Coche y Cubagua presentan suelos con salinidad y con una fuerte erosión resultante de la acción de los vientos, lo cual le confiere a su capa superficial un carácter pedregoso.

- **Clima**

Nueva Esparta posee un clima semiárido, con microclimas que van del árido muy cálido al semiárido cálido-moderado. Domina en Margarita el clima semiárido. En Porlamar la pluviosidad es solo de 399 mm. Anuales con una temperatura media de 27°C. Las zonas de mayor precipitación se localizan en la Serranía de El Copey llegando hasta 1.100 mm., que, junto a neblinas locales, permite el desenvolvimiento de bosques nublados, que derivan en laderas más bajas en formaciones de bosques secos pre montanos. La precipitación es menor en la Península de Macanao, fluctuando de 300 a 500 mm. Anuales, con temperaturas de 27°C a 28°C.

En Coche la temperatura media anual es también alta con precipitaciones de 512 mm. Anuales. Si se considera que, en los sitios litorales y playeros, como Porlamar, hay solo 66 días de lluvia apreciable al año. Presente una temperatura mínima de 24 ° C y una máxima de 34° C

- **Humedad**

La humedad relativa promedio es 80%.

<b>Registro de Datos</b>		
<b>Nombre:</b> Ruben Rivas	<b>C.I.:</b> 26.793.176	<b>Fecha:</b>
<b>Nombre:</b> Vito Martinelli	<b>C.I.:</b> 26.734.643	
<b>Entorno:</b> Urbano (marítimo o playero)		
<b>Ubicación del Entorno</b>	Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela	
<b>Clima</b>	Árido	
<b>Temperatura promedio Anual</b>	28°C	
<b>Humedad relativa</b>	80%	
<b>Hidrografía de la región</b>	Pocos ríos, mucha influencia de agua de mar	
<b>Suelos</b>	Sometido a procesos erosivos constantes	
<b>Velocidad promedio del Viento</b>	29.5 km/h	
<b>Observaciones adicionales del entorno:</b>		

Tabla 3. Ficha de registro de datos del entorno marítimo.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

#### 4.1.2 Características del Estado Mérida

El estado Mérida ubicado en la cordillera de Los Andes representa en esta investigación al ambiente frío o de montaña y se describirá sus condiciones ambientales seguidamente.

- **Limites:**
  - **Norte:** Zulia y Trujillo
  - **Sur:** Táchira y Barinas
  - **Este:** Trujillo y Barinas
  - **Oeste:** Táchira y Zulia

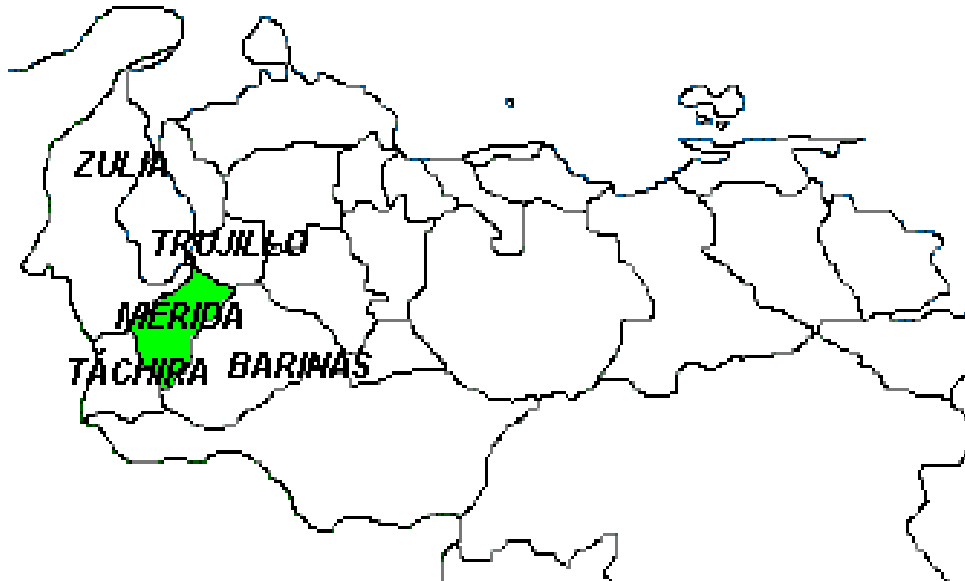


Figura 7. Mapa del Estado Mérida.

Fuente: VenezuelaTuya SA (1997)

- **Hidrografía:**

La hidrografía del Estado Mérida es muy variada, pues a lo largo y ancho de su geografía podemos encontrar ríos, riachuelos, quebradas, lagunas naturales y glaciares; inclusive Mérida tiene jurisdicción sobre una pequeña porción del Lago de Maracaibo, en donde ubicamos las playas Palmarito en el Municipio Tulio Febres Cordero en la zona Sur del Lago.

- **Suelo:**

Diversas clases de suelos se localizan en tierras de Mérida, con valores significativos para la producción agrícola y pecuaria y para las plantaciones forestales. En sectores de la montaña los suelos son por lo general poco profundos, pedregosos y con escasa presencia de materia orgánica. En los valles intramontanos se incrementa su capacidad agrológica, aunque suelen presentar pedregosidad interna y superficial y un pH ligeramente ácido. En el piedemonte tienden a ser poco profundos y con textura predominantemente arcillo-francosa. En la planicie sur lacustre se ubican los suelos con la más elevada capacidad agro-ecológica en extensas superficies y alto potencial agrícola, uno de los mayores del país

- **Clima:**

Mérida posee temperaturas características de cada subregión pudiendo alcanzar los 32 °C en la Zona Sur del Lago, temperaturas menos cálidas en la Zona metropolitana con valores alrededor de los 25 °C, valores más templados entre los 17° y los 22° hacia las zonas del Valle del Mocotíes y los Pueblos del Norte, y temperaturas por debajo de los 12 °C en los Pueblos del Sur y los Pueblos del Páramo, alcanzando inclusive valores por debajo de 0 °C en estos últimos.

- **Humedad Relativa:**

El promedio de humedad relativa anual es de 85%.

<b>Registro de Datos</b>		
<b>Nombre:</b> Ruben Rivas	<b>C.I.:</b> 26.793.176	<b>Fecha:</b>
<b>Nombre:</b> Vito Martinelli	<b>C.I.:</b> 26.734.643	
<b>Entorno:</b> Urbano (de montaña o de frio)		
<b>Ubicación del Entorno</b>	Estado Mérida, Venezuela	
<b>Clima</b>	Frio y húmedo.	
<b>Temperatura promedio Anual</b>	18°C	
<b>Humedad relativa</b>	85%	
<b>Hidrografía de la región</b>	Variada y abundante	
<b>Suelos</b>	Fértil, pH ligeramente ácido	
<b>Velocidad promedio del Viento</b>	3,3 km/h	
<b>Observaciones adicionales del entorno:</b>		

Tabla 4. Ficha de registro de datos del entorno montañoso.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

### 4.1.3 Características de la ciudad de Monterrey, en el estado Nuevo León, México.

Este lugar se escogió por tener una de los niveles más altos de contaminación gracias a su zona industrial, perfecto para estudiar el efecto de la carbonatación sobre el hormigón. Se encuentra en el noreste de México, en la Sierra Madre Oriental. Monterrey es parte del Área Metropolitana de Monterrey, cuya población es de 4,1 millones de habitantes.

- **Limites**

Está limitado al norte con los municipios de San Nicolás de los Garza y General Escobedo; al sur con los municipios de San Pedro Garza García y Santiago; al este con Guadalupe y Juárez; y al oeste con Santa Catarina y García.



Figura 8. Mapa del Estado Nueva León, México.

Fuente: Wikipedia (2003)

- **Hidrografía**

Cuenta con muy escasas corrientes permanentes de agua, la más importante es el Río Santa Catarina, que nace en la Sierra Madre, se alimenta de las lluvias que caen en La Huasteca, y cruza la ciudad de Poniente a Oriente, y algunos arroyos cuyos cauces están secos la mayor parte del tiempo; solo cuando es temporada de precipitaciones lucen una corriente, y la cantidad de agua que habrá en los arroyos dependerá de la intensidad de las lluvias.

- **Suelos**

Debido a la naturaleza mayormente sedimentaria del estado y a la predominancia de rocas como las calizas y lutitas, los suelos presentan una marcada tendencia arcillosa y calcárea, su principal forma de origen es la aluvial, es decir, por arrestare de materiales por agua. Se reconocen algunas zonas muy localizadas donde los suelos se han originado por intemperismo de rocas ígneas. De acuerdo a la clasificación internacional, los suelos que predominan en Nuevo León, son los litosoles, presentes en gran medida en la Sierra Madre Oriental mezclado en ciertas zonas con rendzinas

- **Clima**

El clima de Monterrey es semiárido cálido. La precipitación media anual es de alrededor de 600 mm repartida principalmente en los meses de verano, siendo septiembre el mes más lluvioso del año. La temperatura media es de 23 °C.

- **Humedad relativa**

La humedad relativa anual promedio es de 67%.

<b>Registro de Datos</b>		
<b>Nombre:</b> Ruben Rivas	<b>C.I.:</b> 26.793.176	<b>Fecha:</b>
<b>Nombre:</b> Vito Martinelli	<b>C.I.:</b> 26.734.643	
<b>Entorno:</b> Industrial		
<b>Ubicación del Entorno</b>	Ciudad de Monterey, estado Nuevo León, México.	
<b>Clima</b>	Semiárido cálido.	
<b>Temperatura promedio Anual</b>	24°C	
<b>Humedad relativa</b>	67%	
<b>Hidrografía de la región</b>	Escasas corrientes, único río Santa Catarina	
<b>Suelos</b>	Suelos litorales mezclados con suelos rendzinos.	
<b>Velocidad promedio del Viento</b>	5,3 km/h	
<b>Observaciones adicionales del entorno:</b>		

Tabla 5. Ficha de registro de datos del entorno industrial.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

## 4.2 Simulación de la corrosión

En esta fase se procede a realizar el modelado de las estructuras de hormigón armado con la ayuda del software SolidWorks (figura 9), en este caso la estructura será compuesta por una columna de 30cm x 30cm, con una altura de 2.5 metros y 4 varillas de acero con un diámetro de 1 pulgada cada una, cuya utilidad se encuentra muy frecuentemente en estructuras de no más de 3 pisos. Según la tabla 1, su vida útil preestablecida sería de 15 a 20 años. Su composición está representada por una capa de hormigón y un refuerzo de varillas de acero 1020 en su interior las cuales distan por igual a 47,3 mm del borde.

Luego se procede a utilizar el software COMSOL Multiphysics el cual permite por medio de una interfaz interactiva visualizar de forma más detallada y localizada los daños generados por la corrosión en cada ambiente. Esta plataforma además permite ingresar todos los datos recolectados en la fase 1 mediante las fichas de registros respectivas. Es de hacer notar que a pesar de que se usará el mismo tipo de columna para todos los ambientes, estos se diferenciarán gracias a que cada uno proporciona condiciones ambientales diferentes.

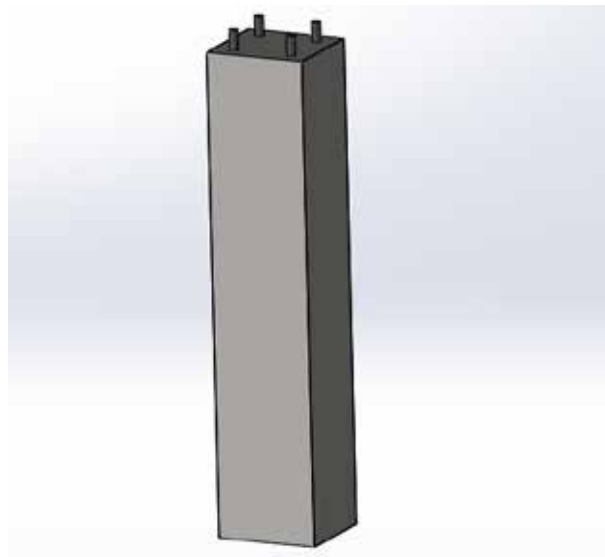


Figura 9. Diseño físico de la columna en el software SolidWorks

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

Para efectos de este trabajo se hará uso de un estudio estacionario dentro del software, esto debido a que todos los datos y parámetros que se utilizarán serán en función al momento cuando ya el hormigón se ha convertido en una solución electrolítica real para que la electrolisis ocurra. Esto es suficiente para realizar un análisis y detección de la corrosión en las estructuras.

Al momento de trabajar con el software COMSOL Multiphysics se hará uso del módulo de corrosión, en el cual se escogió la primera física “Distribución de corriente secundaria”, ya que esta interfaz explica el efecto de la cinética del electrodo, además de la resistencia de la solución electrolítica. La composición y el comportamiento del electrolito sigue a ley de ohm para la corriente. La densidad de corriente debida a las reacciones electroquímicas se describe como una función del sobre potencial o la sobretensión (diferencia entre el potencial real y el potencial de equilibrio). Esta interfaz física puede usar cualquier relación entre la densidad de corriente y el sobre potencial, por ejemplo, la ecuación de Butler-Volmer y la ecuación de Tafel incluidas como opciones integradas.

Esta última ecuación describe los limites anódico y catódico de la ecuación de Butler-Volmer y permite realizar una descripción de la reacción electroquímica del sistema. Por lo tanto, es la que se seleccionará a la hora de simular. El software pedirá ciertos parámetros que hay que proporcionar con la finalidad de obtener la densidad de corriente del sistema. Se puede determinar de la siguiente manera.

— (ec. 4)

Donde:

Sobre potencial. [V]

A: Pendiente Tafel. [V]

i: Densidad de corriente. [A/m<sup>2</sup>]

i<sub>0</sub>: Densidad de corriente de intercambio. [A/m<sup>2</sup>]

La densidad de corriente de intercambio depende de la naturaleza del electrodo, no solo de su estructura, sino también de parámetros como la rugosidad superficial, la pasivación de los óxidos, la transferencia de electrones y las especies absorbidas en la superficie, así como parámetros menos importantes como la temperatura. Se puede definir como la densidad de corriente que fluye igualmente en equilibrio y en ambas direcciones y representa las tasas de oxidación y reducción para un electrodo único dado en equilibrio y. Cuanto mayor es la densidad de la corriente de intercambio, más rápida es la reacción y viceversa. Estos parámetros se colocan a la hora de programar la simulación y viene representada por la siguiente ecuación.

$$j_0 = Fk_0(C_{oxy}^{1-\beta} C_{red}^{\beta}) \quad (\text{ec. 5})$$

Al momento de realizar simulaciones de corrosión, hay diferentes formas de aproximarse a su análisis real. Dicho esto, se hace uso de una multifísica uniendo la ya antes mencionada “distribución de corriente secundaria” con la interfaz de la física “transporte de especies diluidas”, ya que con esto se puede lograr una buena aproximación a lo que realmente está sucediendo en la estructura. Esta nueva física se utiliza para calcular el campo de concentración de un soluto diluido en un disolvente. Es decir, el transporte y las reacciones de las especies disueltas de los ambientes en la estructura y su efecto en ellas. Las fuerzas impulsoras para el transporte pueden ser la difusión, según la ley de Fick (ec. 6), o la convección, cuando se acopla al flujo de fluido, y la migración, cuando se acopla a un campo eléctrico. En el caso de este estudio, se utiliza la difusión como transporte de las especies debido a la naturaleza del ambiente.

$$\mathbf{N}_i = -D_i \nabla c_i \quad (\text{ec. 6})$$

Donde:

i: Especie a considerar

N: Flujo molar [ $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ ]

D: Coeficiente de difusión [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

c: Concentración [ $\text{mol}/\text{m}^3$ ]

Antes de entrar en la simulación es importante explicar lo que ocurre internamente en la estructura, la presencia de un metal de refuerzo dentro del hormigón causa que haya reacciones electroquímicas que pueden conllevar a su deterioro mediante la corrosión, este proceso de descomposición ocurre por la electrólisis. Para que suceda esto, debe existir la presencia de una región electrolítica y un electrodo, donde el ánodo pierde electrones y el cátodo los gana. En este caso, la región electrolítica está conformada por el hormigón, donde la acción del oxígeno que ha entrado por medio de la difusión a través del recubrimiento, reacciona con el agua contenida en los poros del hormigón, derivada de su proceso de construcción o de la humedad del ambiente, además, existen otros agentes externos o especies que pueden hacer del hormigón más conductivo y a su vez destruir la capa protectora del acero.

El electrodo está representado por el acero de refuerzo y es en esta zona en donde se ubican el ánodo y el cátodo. 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 ( $\text{Fe}^{2+}$ ). El cátodo es la localización donde el hierro no es consumido debido a que el oxígeno, en presencia de agua, acepta electrones y se reduce formando iones hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ). Por lo tanto, el flujo de electrones siempre será del ánodo al cátodo. Todo esto se muestra en la siguiente figura (figura 10).

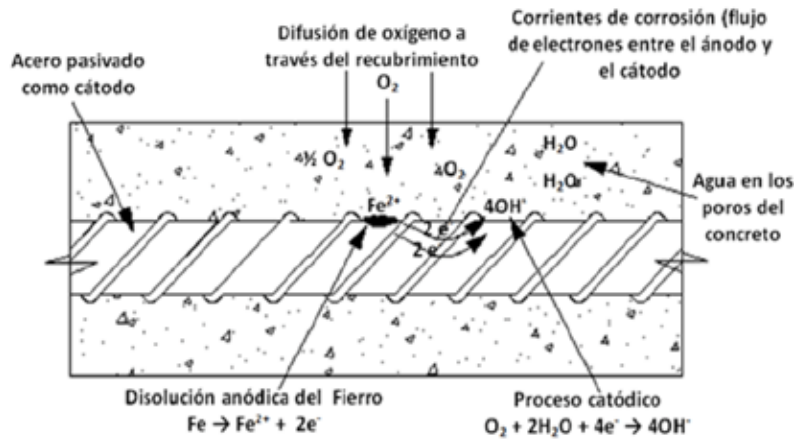


Figura 10. Proceso de corrosión en el hormigón armado.

Fuente: Luis Villeda (2011)

Para realizar la simulación es necesario tomar en cuenta las variables correctas de cada entorno, una de las principales, la cual es la que más varía, es la humedad, la cual al reaccionar con el dióxido de carbono define el grado de carbonatación que pueda existir, causando una cadena de efectos negativos. Como por ejemplo la disminución de la resistividad eléctrica en el hormigón, acelerando el paso de electrones en la estructura y a su vez permitiendo una mayor entrada de agentes externos al interior. Por lo tanto, se puede decir que, a mayor nivel de humedad en el ambiente, mayor probabilidad de corrosión hay en la estructura.

Cabe resaltar que la resistividad describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por ejemplo, un valor alto de resistividad indica que el material es un aislante mientras que un valor bajo indica que es un conductor. Además, está directamente relacionada con la composición interna que posee el hormigón, dentro de este apartado el parámetro más importante es la relación a/c, que es la relación entre agua y cemento al momento de realizar la mezcla y se calcula dividiendo la masa del agua por la del cemento contenidas en un volumen dado de hormigón. Para efectos de la simulación se va a utilizar una relación de 0,65 la cual representa una preparación ordinaria del hormigón, donde la relación alta hace que el

hormigón sea más trabajable. Esta relación afecta al grado de carbonatación en la estructura.

A continuación, se muestra una figura que nos indica la probabilidad de corrosión según el grado de resistividad en el electrolito (hormigón), la cual también nos ayuda evaluar en el tiempo el proceso.

Resistividad	Probabilidad de corrosión
<i>&gt; 100 - 200 kΩ-cm</i>	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
<i>50 a 100 kΩ-cm</i>	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, lo que dificulta el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
<i>10 a 50 kΩ-cm</i>	La porosidad interconectada de consideración en el concreto permite un transporte rápido de los agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.
<i>&lt; 10 kΩ-cm</i>	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, lo que permite que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión obtenido con la NMX-C-501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.

Tabla 6. Criterio de evaluación de resistividad eléctrica en el hormigón.

Fuente: Andrés Torres (2019)

El hormigón es un material altamente alcalino con un pH entre 12,6 y 13,8, principalmente debido a los hidróxidos de calcio, sodio y potasio presentes. Bajo estas condiciones de pH, el acero que se encuentra dentro del hormigón forma espontáneamente una capa pasiva, que, aunque de pocos nanómetros de espesor presenta una acción protectora. Sin embargo, esa película puede ser destruida por agentes agresivos tales como los iones cloruros, el dióxido de azufre y el CO<sub>2</sub>, lo que produce una despasivación del acero de refuerzo.

El proceso de carbonatación decrece el valor del pH del hormigón aproximadamente a 9. Para que la carbonatación tenga lugar es necesario que el dióxido de carbono entre en contacto con el agua y los componentes alcalinos presentes en los poros del hormigón, pero también el proceso de difusión del CO<sub>2</sub> no se producirá en hormigones que están totalmente saturados de agua y el CO<sub>2</sub> en hormigones totalmente secos no reacciona, es por ello que la humedad relativa ideal para propiciar el fenómeno está entre el 50 y el 80%. Resaltando que los ambientes a estudiar están dentro de este rango.

Con respecto a los agentes agresivos, se puede decir que la concentración de iones de cloruro tiene un alto impacto en la velocidad de corrosión, ya que funciona como un catalizador. A pesar de que dentro de la mezcla del hormigón exista una determinada concentración de estos iones, la cual debe estar bien definida (tabla 7), el verdadero peligro viene cuando por medio de la difusión, los iones penetran desde el exterior al hormigón. Aquí es donde pueden ocurrir varios fenómenos que contribuyan a la corrosión, como ayudar a que ocurra la carbonatación, incidiendo en los niveles de pH, y/o el agrietamiento en el recubrimiento del concreto.

Tipo de ambiente	Agresivo y expuesto a cloruro	Agresivo y no expuesto a cloruro	Construcción sobre el suelo y seca
Exposición límite por volumen	0.3 kg/m <sup>3</sup>	0.5 kg/m <sup>3</sup>	Sin limitación

Tabla 7. Condiciones de exposición Límite por volumen de hormigón.

Fuente: Humberto Girón (1998)

La incidencia del dióxido de azufre o sulfatos se presenta, cuando a través del agua, concentraciones relativamente altas entran en contacto con los compuestos hidratados de la pasta de cemento. Este contacto hace que se produzca una reacción química que genera expansión en la pasta y crea una presión capaz de romperla y

finalmente desintegrar el concreto. Es decir que el efecto perjudicial principal que trae esta especie son expansiones y rupturas en el hormigón, empeorando en gran cantidad la condición de protección de este.

El potencial de corrosión es un potencial mixto en el cual la velocidad de disolución anódica del electrodo es igual a la velocidad de reacciones catódicas y no hay corriente neta entrando o saliendo del electrodo. El potencial de corrosión y la corriente de corrosión son dos parámetros importantes que conecta la electroquímica fundamental y el comportamiento práctico de corrosión de los metales. El valor del potencial de corrosión indica el estado de un metal corroído, mientras que el de la corriente de corrosión refleja la tasa de corrosión instantánea en el momento de la medición. Para efectos del potencial de equilibrio se utilizará como referencia los valores estándares del potencial del electrodo comparados con un electrodo estándar de hidrogeno, algunos de ellos se muestran en la tabla 8.

<b>Potencial de electrodo estándar</b>				
<b>Elemento</b>	<b>Oxidante</b>		<b>Reductor</b>	<b>E (V)</b>
Na	Na <sup>+</sup> +		Na	
Cr	Cr <sup>3+</sup>		Cr	
Fe	Fe <sup>2+</sup> e		Fe	
<b>H</b>	<b>H<sup>+</sup></b>		<b>H<sub>2</sub></b>	<b>0.0000</b>
Cu	Cu <sup>2+</sup> +		Cu <sup>+</sup>	+0.159
O	O <sub>2</sub> H <sup>+</sup>		2H <sub>2</sub> O	+1.229
Cl	Cl <sub>2</sub>		-	+1.36

Tabla 8. Potenciales de electrodo estándar vs electrodo de hidrogeno.

Fuente: Wikipedia (2010)

La intensidad de corriente sirve para calcular la densidad de corriente del electrolito, cuya representación viene dada por un valor estándar en cada ambiente, cuando no existe ningún tipo de protección o prevención catódica. Por otra parte, se necesitan definir 2 valores estándares involucrados en las ecuaciones de Tafel, como la densidad de corriente de intercambio en las reacciones ( $i_{0\text{Hierro}} = 1 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$  y  $i_{0\text{Oxigeno}} = 1 \times 10^{-8} \text{ A/m}^2$ ) y la pendiente de Tafel ( $A_{c\text{Hierro}} = -0.25 \text{ V}$  y  $A_{a\text{Oxigeno}} = 0.41 \text{ V}$ ). Estos fueron tomados de la librería de COMSOL.

Luego de haber aclarado estas variables, se procede a realizar la simulación en cada entorno por separado. Independientemente del ambiente, al activar las 2 físicas que se usarán en COMSOL Multiphysics, el constructor de modelo, que es la ventana donde se visualizan todas las funciones y sub funciones que se pueden usar en la simulación. En la figura 11 se muestra el orden. Es de hacer notar que las sub funciones: reacciones en la superficie de electrodo, densidad de corriente de electrolito, coeficientes de reacción y concentración fueron agregadas adicionalmente para efectos de este estudio.

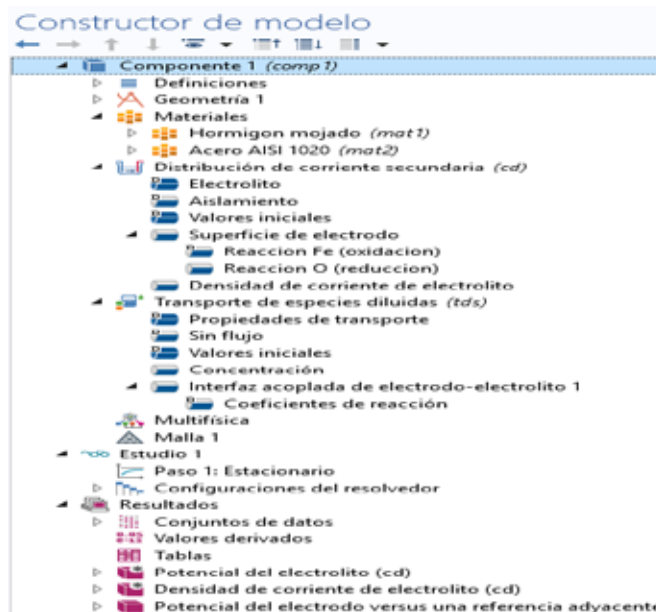


Figura 11. Constructor de modelo en COMSOL Multiphysics.  
Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

Además, al igual que el constructor de modelo, la superficie del electrodo también será igual para los 3 ambientes. Aquí se establece las especies disueltas-depositadas, que en este estudio debido a que la zona anódica es el acero, la especie disuelta es el hierro (Fe), con su densidad y masa molar especificada en la siguiente figura.

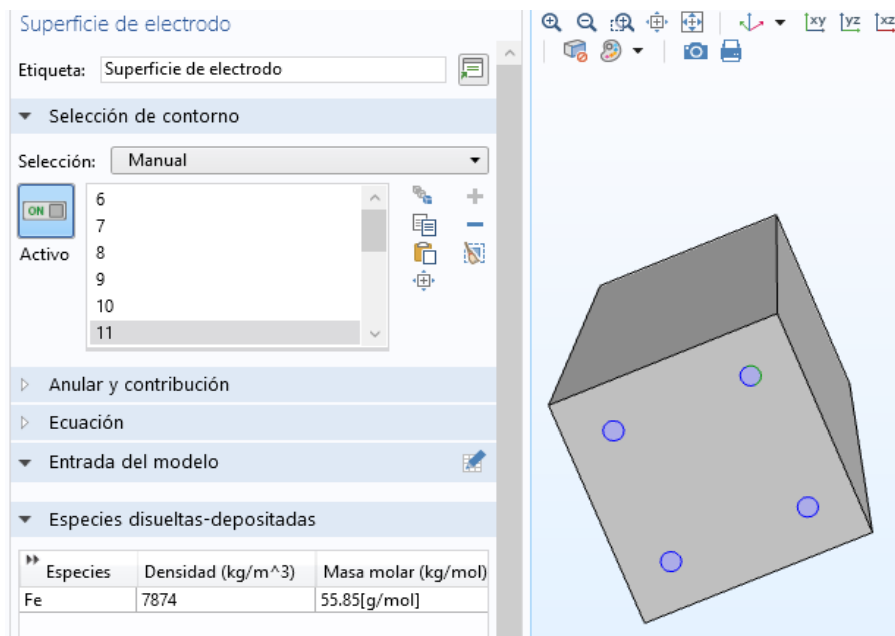


Figura 12. Superficie de electrodo en COMSOL Multiphysics.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

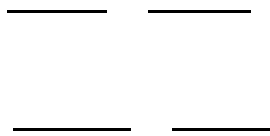
#### 4.2.1 Simulación del ambiente marítimo o playero.

Para este ambiente ubicado en la isla de Margarita del Edo. Nueva Esparta como referencia, hay una humedad relativa del 80% y una temperatura media de 28°C. Esto junto a las concentraciones de CO<sub>2</sub>, hace que el ambiente esté muy expuesto al proceso de la carbonatación y los iones de cloruro de sodio (NaCl) destruyen la capa protectora que cubre al acero y provocan una pequeña zona anódica con relación a la catódica. Por lo tanto, el ambiente es muy propenso a un proceso de corrosión acelerada, por lo cual se va a estudiar un caso donde este proceso ya haya

afectado al hormigón, es decir, donde la capa de pasivación del acero de refuerzo ya se haya eliminado.

la tabla 6, lo que quiere decir que el hormigón tiene una porosidad interconectada excesiva, este valor se puede representar en unidad de conductividad en el hormigón, que se traduce en 0,01 S/m. Además de una densidad de corriente de  $i_{\text{corr}} = 0,02 \text{ A/m}^2$  para ambientes playeros.

Con respecto a las reacciones, las cuales son las que actuarán con el electrodo, hay que definir la temperatura del ambiente y el potencial de equilibrio de cada sustancia con respecto a la tabla 7, siendo el agua representada por el oxígeno. Además, con respecto a las ecuaciones catódicas y anódicas de Tafel, hay que considerar las concentraciones de las especies diluidas o agentes externos presentes en el sistema, estas concentraciones son  $C_{\text{CO}_2} = 0.2 \text{ mol/m}^3$  y  $C_{\text{NaCl}} = 5.13 \text{ mol/m}^3$ . Se ven afectadas por la ec. 5 de la siguiente manera.



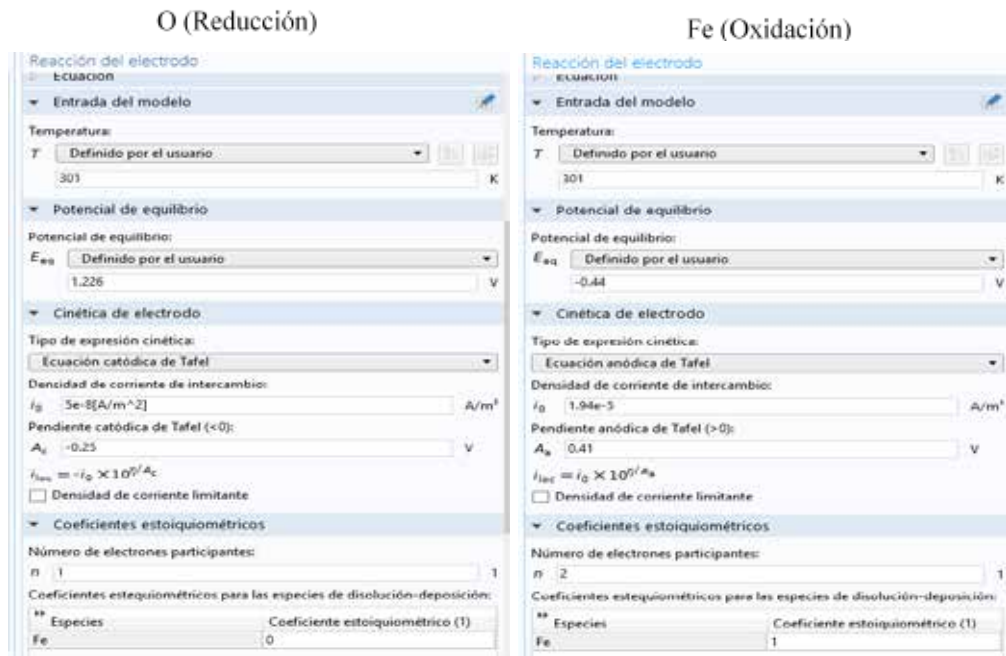


Figura 13. Reacciones de los electrodos en COMSOL Multiphysics.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

Por último, además de las concentraciones, en la física de transporte de especies diluidas hay que definir los coeficientes de difusión de los agentes externos siendo:  $D_{CO_2} = 1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  y  $D_{NaCl} = 1.41 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  (coeficiente de difusión para la sal en partículas de agua). Es importante aclarar que la conductividad es un valor necesario para que la simulación sea lo más realista posible, por lo tanto, la conductividad del acero SAE AISI 1020 es  $3 \times 10^6 \text{ S/m}$ , como bien se conoce. A continuación, se muestra el resultado de la simulación en el software COMSOL Multiphysics.

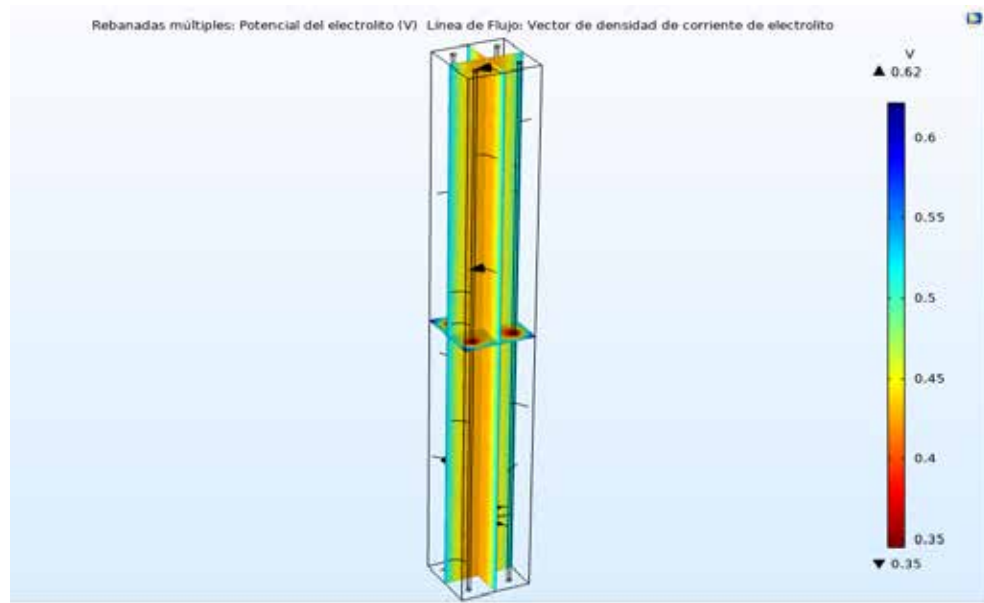


Figura 14. Potencial del electrolito del ambiente marítimo.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

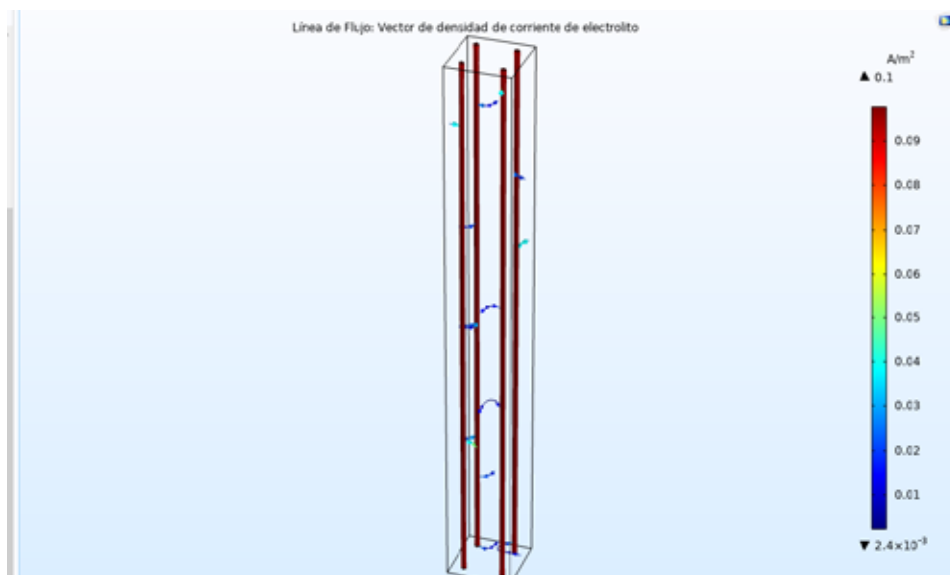


Figura 15. Vector de densidad de corriente de electrolito del ambiente marítimo.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

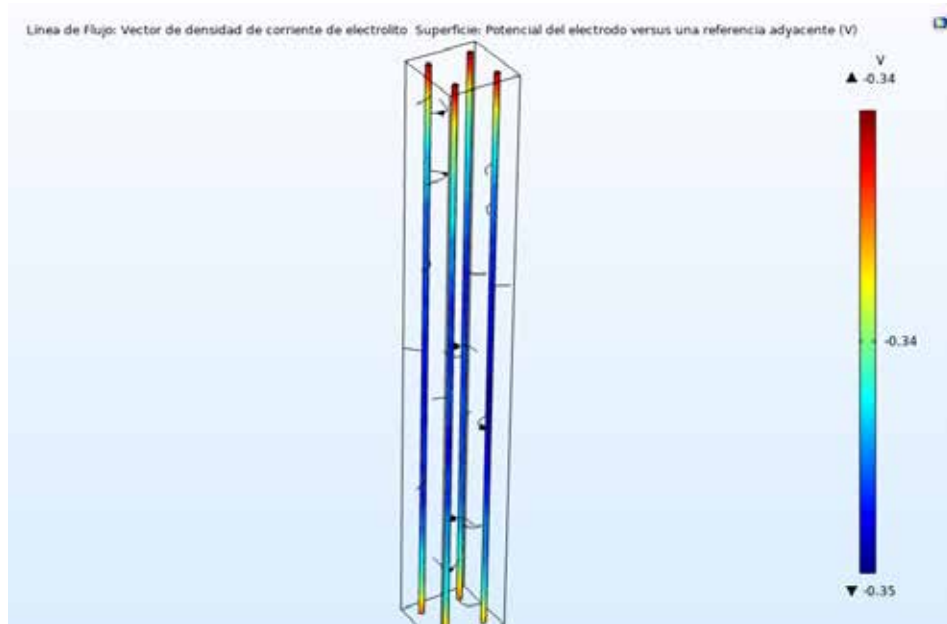


Figura 16. Potencial del electrodo del ambiente marítimo.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

#### 4.2.2 Simulación del ambiente de montaña o de frío.

El ambiente de montaña es representado por la ciudad de Mérida, Edo. Mérida la cual posee una humedad relativa del 85% (muy alta) y una temperatura promedio de 18°C (la más baja de los ambientes en estudio). Al igual que en el ambiente urbano anterior, existen altos niveles de humedad, por lo tanto, hay más probabilidades de que ocurra la carbonatación y la resistividad del electrolito se vea disminuida con el tiempo. Sin embargo, no existe ninguna otra especie que influya determinadamente en el ambiente, solo actuará el dióxido de carbono. Como la humedad es de 85% se

esto se traduce a una conductividad de 0,025 S/m. Además de una densidad de corriente de  $i_{\text{corr}} = 0,023 \text{ A/m}^2$ .

Las reacciones del electrodo solo se ven afectadas por la concentración del dióxido de carbono, la cual es la misma para todos los ambientes  $C_{\text{CO}_2} = 0.2 \text{ mol/m}$ . Igualmente ocurre con el coeficiente de difusión el cual viene dado por  $D_{\text{CO}_2} = 1 \times 10^{-7}$

m<sup>2</sup>/s, por lo que solo la densidad de corriente de intercambio del oxígeno va a cambiar.



Figura 17. Reacciones de los electrodos en COMSOL Multiphysics.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

A continuación, se muestra el resultado de la simulación en el software COMSOL Multiphysics del respectivo ambiente.

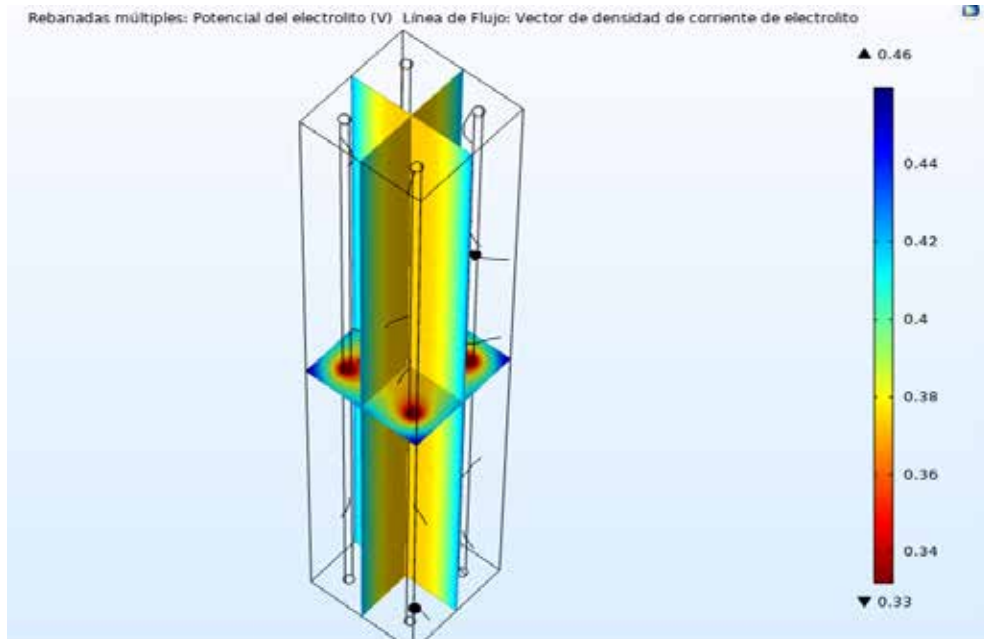


Figura 18. Potencial del electrolito del ambiente frío.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

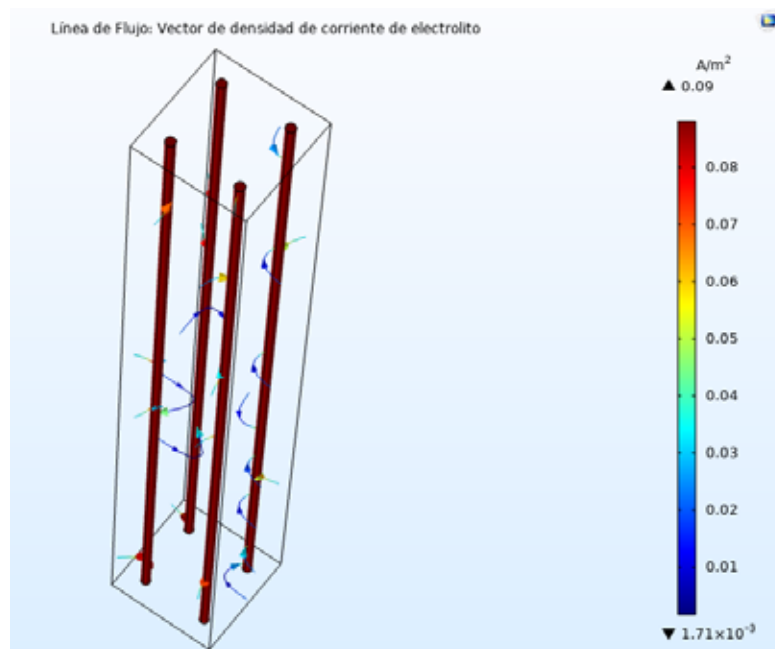


Figura 19. Vector de densidad de corriente de electrolito del ambiente frío.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

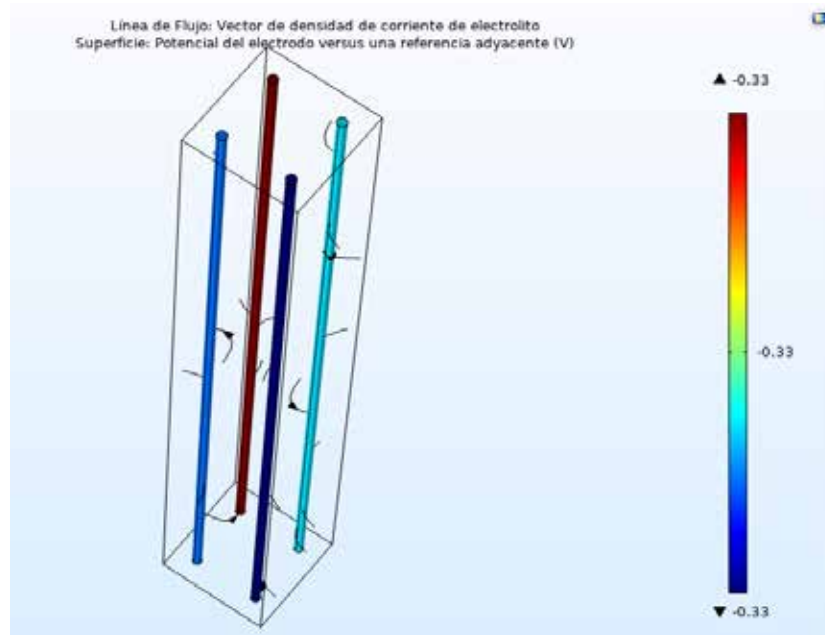


Figura 20. Potencial del electrodo del ambiente frío.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

#### 4.2.3 Simulación del ambiente industrial.

Para la zona industrial se usó la ciudad de Monterrey Edo. Monte León en México. Esta posee menos humedad relativa que los otros dos ambientes, pero presenta grandes concentraciones de CO<sub>2</sub>, así como también iones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) que al estar en ciertas condiciones puede convertirse en una sustancia muy ácida. La humedad relativa es del 63% y su temperatura es de 24°C, se usará una

densidad de corriente de  $i_{\text{corr}} = 0,018 \text{ A/m}^2$ . Es importante aclarar que estas tres estructuras simuladas no cuentan con ningún tipo de protección o prevención de la corrosión.

Dichas las especies que están en el ambiente, hay que proceder a colocar las nuevas densidades de corriente de intercambio. Adicionalmente, hay que establecer la concentración del dióxido de azufre la cual es  $C_{\text{SO}_2} = 0.5 \text{ mol/m}^3$ , según fuentes para ambientes industriales. Además, el coeficiente de difusión del SO<sub>2</sub> es  $1.9 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En este caso, las dos sustancias que están reaccionando con las partículas de agua están haciendo un papel de oxidación y por eso ambas dividen a la densidad de corriente original. Esto se puede observar en la ec. 5.

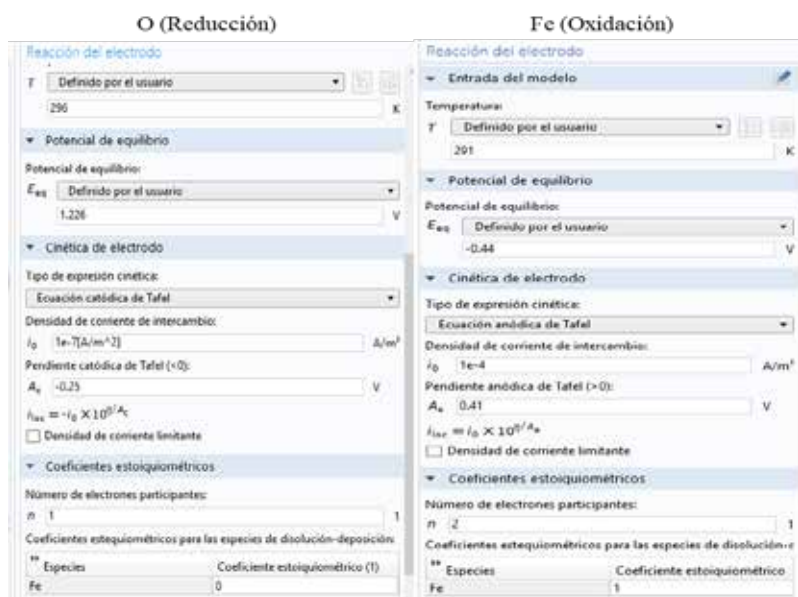


Figura 21. Reacciones de los electrodos en COMSOL Multiphysics.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

A continuación, se muestra el resultado de la simulación en el software COMSOL Multiphysics del respectivo ambiente.

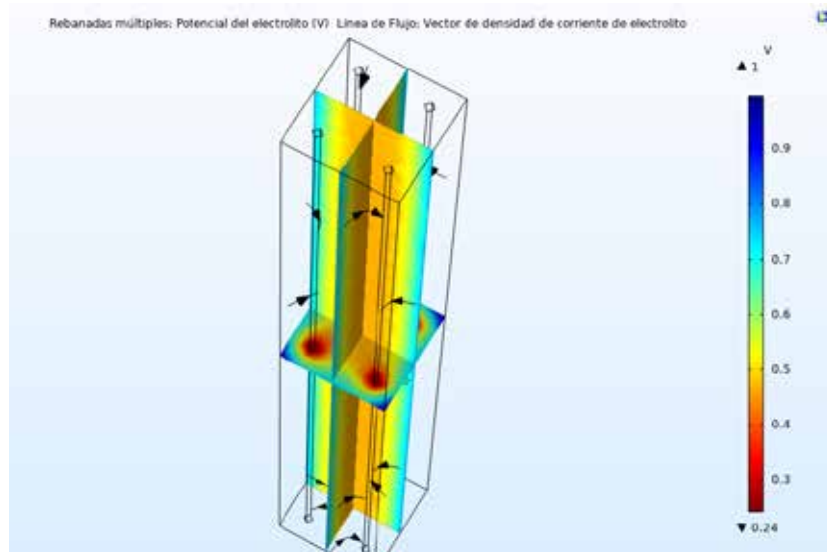


Figura 22. Potencial del electrolito del ambiente industrial.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

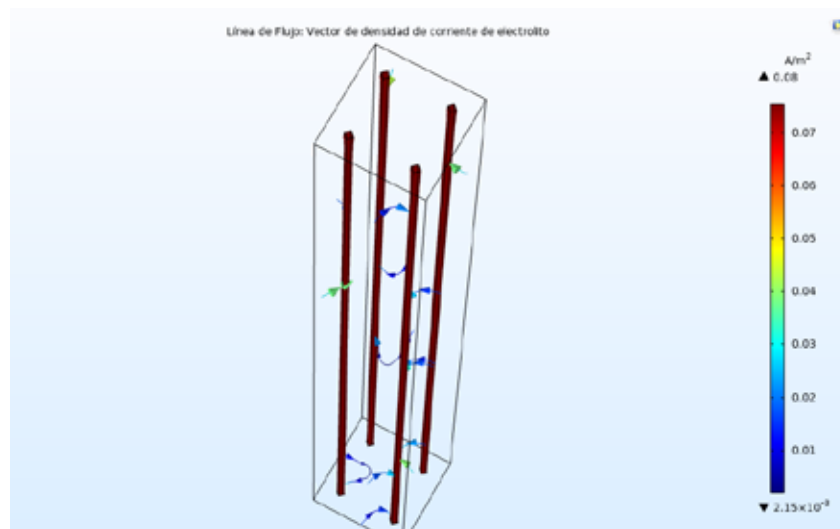


Figura 23. Vector de densidad de corriente de electrolito del ambiente industrial.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

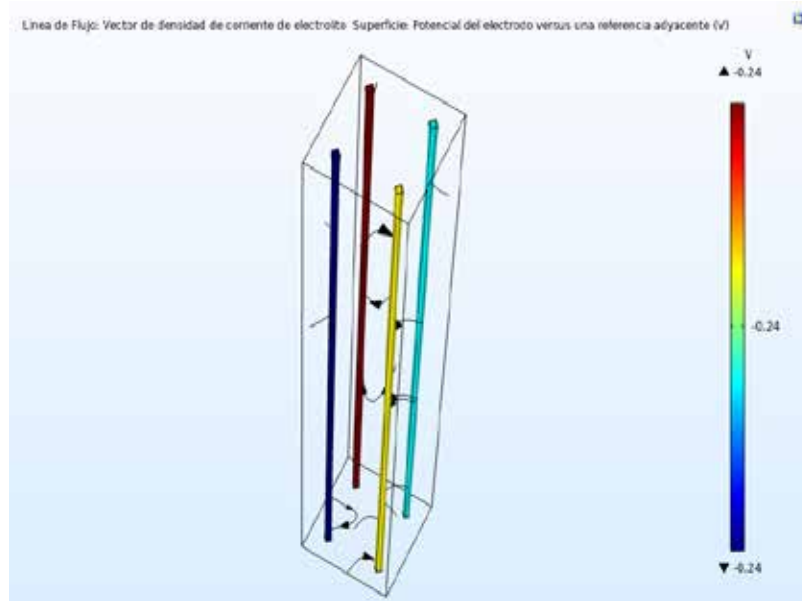


Figura 24. Potencial del electrodo del ambiente industrial.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

### 4.3 Análisis de los resultados de la simulación

Para empezar, se puede decir que el potencial eléctrico del electrolito, que es el que reacciona con el ambiente, demuestra las zonas afectada por la corrosión y cuanto es afectada por esta. Las zonas de color rojo son las partes donde se encuentran las estructuras del metal de refuerzo, y el valor indica que tan afectado puede estar por la corrosión, como se muestra en las figuras 14, 18 y 22. Como se puede observar, el menor potencial se encuentra en esta zona, esto es debido a que aquí se encuentra el intercambio de potencial entre el ánodo (acero pasivado) y el cátodo (moléculas de agua y oxígeno), esto se puede ver en la ec. 7. Por otra parte, se puede observar que, en la zona del hormigón más lejana al centro, el potencial es mayor debido a que no hay presencia de un ánodo que contrarreste el intercambio. Aun cuando puede influir la composición de la mezcla de preparación del hormigón, la influencia es mayor en el centro.

(ec. 7)

Esta grafica demuestra cómo se comporta el hormigón cuando recibe la acción de la humedad, junto con los demás agentes externos, que pueden ir disminuyendo su pH, deteriorando su estado físico provocando grietas o fisuras y cambiando su función de protector del acero a convertirse en una solución electrolítica que facilita el flujo de electrones entre el ánodo y el cátodo y acelerando el proceso. Por lo tanto, se puede decir que mientras más alto sea el potencial electrolítico cerca del acero de refuerzo, significa que el hormigón se ha deteriorado lo suficiente como para permitir que ocurra el proceso de electrolisis fácilmente.

El proceso de corrosión del acero del concreto puede ser monitoreado o evaluado con la medición del potencial eléctrico mediante el procedimiento conforme a la norma “ASTM C876-91 1999: 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, tales como electrodo de calomelanos saturado (SCE), electrodo de cobre/sulfato de cobre (CSE) o electrodo de plata/cloruro de plata.

Valores de Potencial Eléctrico ASTM C876		Condición de la Corrosión
(mV vs SCE)	(mV vs CSE)	
< -476	< -500	Corrosión Severa
< -276	< -350	Alta (<90% de Riesgo de Corrosión)
-126 a -275	-350 a -200	Riesgo Intermedio de Corrosión
> -125	> -200	Bajo (10% de Riesgo de Corrosión)

Tabla 9. Condición de la corrosión de acuerdo al potencial eléctrico

Fuente: ASTM C876-91 (1999)

Comparando esta tabla 9 con las figuras 16, 20 y 24, se puede observar que el potencial eléctrico del electrodo varia con respecto a su entorno y que los ambientes

urbanos (marítimo y de montaña) con un potencial de  $-0.35$  V y  $-0.33$  V respectivamente, son los más afectados por la corrosión, teniendo un riesgo menor al 90%. En cambio, el ambiente industrial con un potencial de  $-0.24$  V, posee un riesgo intermedio de corrosión. Sin embargo, en los 3 casos se puede observar que existe un gran peligro en las estructuras, ya que estos valores indican que la carbonatación va en un periodo avanzado y el hormigón ha perdido su función protectora y se ha convertido en una solución electrolítica.

El potencial del electrodo a diferencia del potencial electrolítico, es igual para toda la superficie, esto debido a que la estructura se ve afectada por motivos de la simulación, de manera uniforme por la difusión de la humedad,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , entre otros agentes, además de no presentar ningún tipo de fisura o grieta que pueda afectar este valor. Asimismo, se observa que el potencial es negativo porque hace referencia al ánodo que se oxida y en contraparte, el potencial electrolítico hace referencia al diferencial de potencial entre el ánodo y el cátodo (ec. 7).

En cuanto a la densidad de corriente se puede decir que mide el movimiento promedio de las cargas en un material, por lo que en las figuras 15, 19 y 23, se puede observar como en todo el acero de refuerzo está pasando la misma densidad de corriente, esto es debido a que las reacciones electroquímicas están sucediendo a lo largo de toda la superficie, conociéndose este tipo de corrosión como uniforme, así como también se observa la dirección de la corriente. En dichas figuras, se puede observar como la densidad de corriente varía con el flujo de electrones, estando este intercambio a lo largo de la superficie del acero y es por ello que se puede observar las líneas de flujo con diferentes valores.

Una manera de evaluar esto es usando los criterios generales para la corrosión que se han desarrollado a partir de investigaciones de campo y de laboratorio (Andrade, Alonso & González 1990), estas mediciones dependen de la temperatura y la humedad, así como también de los agentes destructores que se encuentren en el

ambiente y deben tomarse con un factor de precisión de 2, sin embargo, se pueden usar como referencia para el análisis.

Corriente de Corrosión ( $I_{corr}$ )	Corrosión en Refuerzo
$I_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$	Pasiva
$I_{corr} 0.1 - 0,5 \mu A/cm^2$	Baja a Moderada
$I_{corr} 0.5 - 1,0 \mu A/cm^2$	Moderada a Alta
$I_{corr} > 1,0 \mu A/cm^2$	Alta

Tabla 10. Corrosión del refuerzo por densidad de corriente para estructuras en operación.

Fuente: Andrade, Alonso & González (1990)

Gracias a la tabla 10, se puede observar que las figuras 15, 19 y 23, presentan un riesgo de corrosión moderado o alto ( $0.05 - 0.1 A/m^2$ ) y al igual que como se demuestra con el potencial eléctrico, representan un peligro en las estructuras. Es necesario aplicar un método de prevención de este fenómeno para que la vida útil de la estructura sea mayor. En conclusión, en este estudio se pudo observar que existe una corrosión uniforme y el ambiente que más corroe a su estructura es el ambiente marítimo o playero, esto se debe a que se encuentra en unas condiciones agresivas, donde los iones de cloruro juegan un papel importante en el deterioro de las estructuras, sin embargo, se atribuye este punto al porcentaje de humedad que hay en el ambiente, siendo este el factor más importante a combatir. En segundo lugar, se tiene al ambiente de montaña y, por último, se tiene al ambiente industrial que, a pesar de tener los agentes suministrados por las industrias, es el menos afectado por este fenómeno.

A continuación, se muestra la tabla 11, donde se recopila toda la información dicha antes y permite observar mejor las diferencias entre cada ambiente, así como se

exponen las razones por la que se recomienda aplicar un sistema de prevención de corrosión a la estructura.

Datos obtenidos de la simulación			
Ambiente	Marítimo	Montañoso	Industrial
Potencial del electrolito	0,35 V	0,33 V	0,24 V
Densidad de corriente	0,1 A/m <sup>2</sup>	0,09 A/m <sup>2</sup>	0,08 A/m <sup>2</sup>
Potencial del electrodo	-0,34 V	-0,33 V	-0,24 V
Condición de la corrosión	Alta - Alta	Alta - Moderada	Intermedio - Moderada

Tabla 11. Resumen de datos obtenidos en la simulación.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

#### 4.4 Planteamiento del sistema de prevención

Como se pudo observar en la fase anterior, una estructura de hormigón armado por si sola y sin protección alguna puede ser muy propensa a corroerse rápidamente, ocasionando daños irreversibles que a su vez están relacionados con lo económico y en la salud de las personas. Es por esto que en las últimas décadas se han realizado investigaciones que han proporcionado algunas soluciones para que la corrosión no sea un problema incontrolable en el ámbito de la construcción y así lograr construcciones más duraderas y seguras, con una durabilidad acertada desde su momento de construcción.

##### 4.4.1 Parámetros a tomar en cuenta

Por lo tanto, con la ayuda de toda la información recolectada anteriormente, con los resultados obtenidos en la simulación y con la información de las investigaciones realizadas sobre la prevención de este fenómeno, se puede decir que se tiene una base sólida para proponer un sistema eficiente y perdurable que permita prevenir la corrosión desde la etapa de diseño. Pero para esto, se necesitan tomar en cuenta varios parámetros que se expondrán a continuación.

- **Vida útil de la estructura:** Es el periodo de tiempo necesario para que una estructura llegue a su estado de colapso. Definir este parámetro es muy importante para comenzar con el diseño ya que, según esto, se puede tomar un criterio en relación a que tan necesario y estricto debe ser la aplicación de un sistema de prevención. Por ejemplo, para estructuras simples se puede estimar una vida útil de 50 años, pero para elementos más importantes puede llegar hasta 100 años de servicio.

Tabla 1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa Española del Concreto Estructural.	
Tipo de estructura	Vida útil
Estructuras de carácter temporal.	Entre 3 y 10 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandales, apoyos de tuberías).	Entre 10 y 25 años.
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas.	Entre 15 y 50 años.
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil; excepto obras marítimas, de repercusión económica baja o media.	50 años.
Edificios de carácter monumental o de importancia especial. Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta.	100 años

Tabla 12. Vida útil de estructuras de concreto estructural.

Fuente: NTCC, RCDF (2017)

- **Acabado superficial:** Este parámetro está relacionado con la resistividad de la estructura, si el acabado es muy rustico o muy poroso, será más propenso a que la humedad y los agentes externos entren al interior.



Figura 25. Acabado superficial en hormigón.

Fuente: Bainet Comunicación S.A. (2020)

- **Selección de material adecuado:** Una buena preparación de los materiales es fundamental para combatir a la corrosión, por ejemplo, es un error usar arena o agua de playa como parte de la mezcla para preparar el hormigón, ya que estos contienen un alto porcentaje de minerales que pueden acelerar el proceso, como el cloruro Cl. Dicho esto, utilizar cemento de buena calidad es imprescindible, es necesario que este tenga buena relación A/C, que se refiere la relación agua / cemento (a/c), que posee el hormigón, de esta depende la resistencia y durabilidad, es necesario un buen balance de estas dos al momento de hacer la mezcla, una relación agua/cemento baja, conduce a un hormigón de mayor resistencia que una relación agua/cemento alta.

Cuanto más alta sea esta relación, el hormigón será más trabajable, un exceso de agua lleva a que las partículas lleguen a un punto en el que no absorben más agua, por lo que quedan espacios vacíos en los que nada actúa, lo que lo hace más susceptible a la carbonatación por lo general para obtener una buena hidratación del hormigón se necesita una relación a/c de 0,4 a 0,6.

En cuanto al acero, en el presente estudio se seguirá usando el AISI 1020 para efectos de comparación, sin embargo, se recomienda usar aceros al

carbono-manganeso o de alta resistencia y baja aleación, como por ejemplo los HSLA o micro aleados.

- **Protección adecuada del acero:** Existen muchas maneras de hacer una película pasiva en el acero de refuerzo para proteger la estructura de la corrosión. Se puede decir que las más comunes son los inhibidores de la corrosión, ya sean anódicos, catódicos o mixtos; los recubrimientos metálicos, orgánicos o inorgánicos; la adición de materiales minerales como el humo de sílice, la escoria granulada, la ceniza volante, entre otros; y las técnicas electroquímicas en las cuales se pueden mencionar la protección catódica, la prevención catódica, la extracción electroquímica de cloruros y la realcalinización electroquímica.



Figura 26. Tipos de protección de la corrosión.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

- **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. Este trabajo 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.

- **Prevención de la humedad:** Hay muchas formas de proteger a estructuras de hormigón de la humedad ocurrida por capilaridad. Para evitar estos daños los especialistas recomiendan impermeabilizar previamente las superficies que estarán en contacto directo e indirecto con el agua, pues el proceso siempre será más efectivo y económico si se realiza durante la construcción. Existen varios tipos de impermeabilizantes: aditivos, líquidos, pastosos y laminares.

#### **4.4.2 Creación del sistema de prevención**

Una vez descrito estos parámetros, se puede proceder a crear el sistema de prevención ideal para este estudio. Es importante aclarar que este sistema servirá para los 3 ambientes en cuestión, ya que sus propiedades serán tan buenas que no hará falta agregar más características. Por lo tanto, se ha mencionado antes en este trabajo que la estructura es de carácter simple, entonces se puede asumir una vida útil de 50 años. Tendrá un acabado superficial con poca porosidad para garantizar la mayor resistividad en el hormigón, según la tabla 7

del material ya no se usará hormigón mojado, sino que se seleccionará un hormigón armado de buena calidad en la librería de materiales de COMSOL Multiphysics, el cual posee una relación a/c de 0,42, sin embargo, el acero seguirá siendo el mismo AISI 1020.

Al acero de refuerzo se le agregara un recubrimiento de polianilina (PANI), el cual es uno de los polímeros conductores electrónicos más estudiados en la actualidad

debido a su notable estabilidad química, térmica y ambiental, además proporciona una protección en contra del hidrogeno y los efectos negativos que este puede traer como agrietamiento, ampollamiento o fragilización en el material, lo que conduciría a una modificación de las propiedades mecánicas del metal, tales como la ductilidad y tenacidad. Con esto, el potencial de equilibrio sube a  $E_{\text{corr}} = -0,23 \text{ V}$ .

Por último, se le agrega una prevención catódica como método preventivo de mantenimiento, el cual se ve directamente influenciado por el umbral de contenido de cloruro en la estructura. Esto hace que se apliquen bajas densidades de corrientes, utilizándose una de  $I_{\text{corr}} = 2 \text{ mA/m}^2$ . Esto es para mantener el acero de refuerzo en condiciones pasivas, aún en presencia de altos contenidos de cloruros. Establecidos los nuevos valores se procede a realizar la simulación nuevamente.

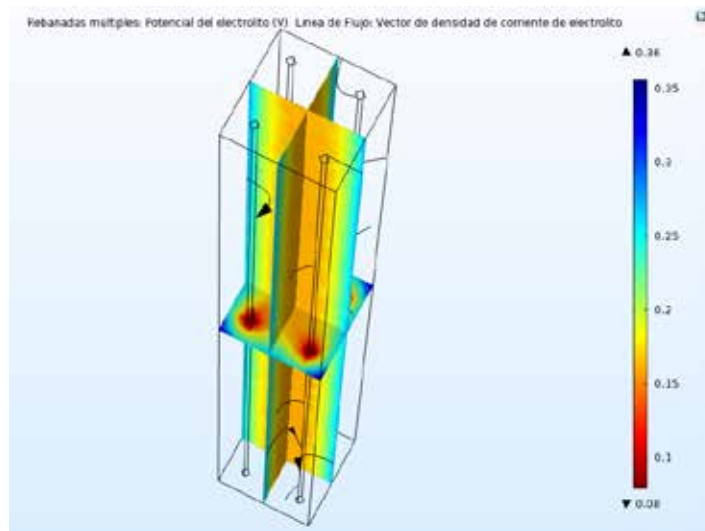


Figura 27. Potencial del electrolito, con sistema de prevención.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

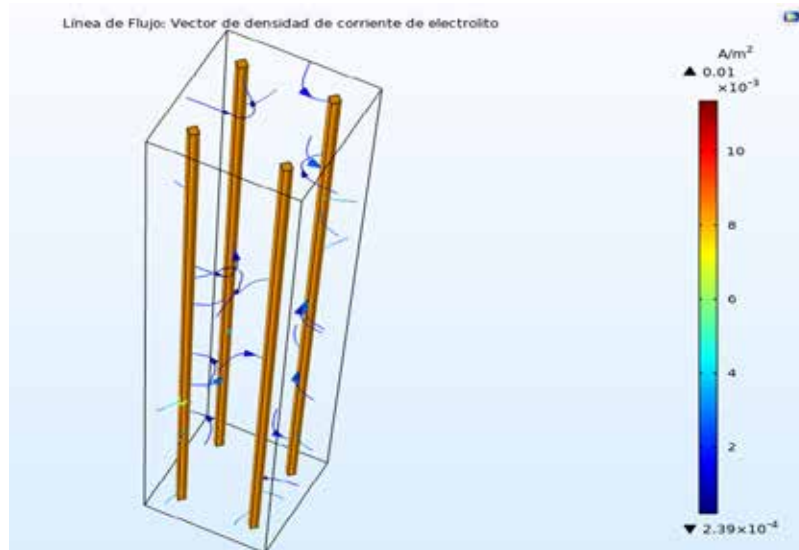


Figura 28. Vector de densidad de corriente de electrolito, con sistema de prevención.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

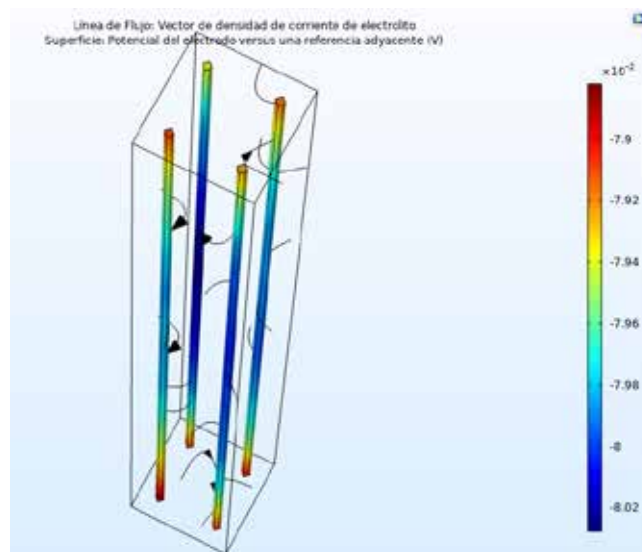


Figura 29. Potencial del electrodo, con sistema de prevención.

Fuente: Martinelli - Rivas (2020)

Luego, fijándose en las tablas 8 y 9 de métodos de evaluación de la corrosión tenemos que, en la figura 29 del potencial del electrodo, hay valores más altos o más

positivos, aun en el centro de la estructura donde se encuentra el acero de refuerzo, esto se puede catalogar como una condición de corrosión baja (riesgo de 10% o menos), mejorando así el resultado de los 3 estudios anteriores en gran escala. Y aunque sigue existiendo la corrosión se considera que no es tan grave, hay que aclarar que erradicar este fenómeno en un 100% es imposible, ya que su efecto siempre estará presente debido al ambiente que ataca constantemente a las estructuras, sin embargo, se pueden reducir estos efectos.

Por último, en cuanto a la figura 28, se puede observar que con ese valor de densidad de corriente menor a  $0.01 \text{ A/m}^2$ , existe una capa pasiva activa según la tabla 9, la cual es la mejor protección que puede tener el acero de refuerzo. Sin embargo, al igual que en la otra figura, la corrosión disminuyó en gran escala. Por lo tanto, se considera que el sistema de prevención fue exitoso. Todas las simulaciones dentro de este estudio se realizaron en consideración de que los agentes involucrados en la carbonatación, así como demás agentes externos, entraron en la estructura meramente por difusión a través del hormigón, obviando cualquier daño físico en la estructura como grietas o fisuras, así como la exposición directa del acero de refuerzo al entorno exterior, estos factores aumentarían la velocidad del proceso en gran manera.

A continuación, se muestra la tabla 13, donde se recopila toda la información dicha antes y permite observar mejor los resultados obtenidos en este nuevo sistema de prevención y compararlos con los anteriores en la tabla 11.

Datos obtenidos de la simulación			
Parámetros	Potencial electrolítico	Densidad de corriente	Potencial del electrodo
Sistema de prevención	0.08 V	$0.01 \text{ A/m}^2$	-0.0802 V

Tabla 13. Resumen de datos obtenidos en sistema de prevención.

Fuente: Martinelli – Rivas (2020)

## CONCLUSION

La investigación tenía como objetivo general “Desarrollar un sistema para la prevención y modelación de la corrosión en el hormigón armado en la infraestructura urbana e industrial”, con el sustento de que este fenómeno presenta las principales causas de deterioro en las infraestructuras de hormigón armado. Para solucionarlo se realizó una investigación documental donde se presentaron las causas de la corrosión en las estructuras de diferentes entornos, realizando luego un modelado lo más cercano a la realidad posible dentro del software de simulación COMSOL Mutliphysics. Luego de esto se realizó un sistema de prevención de la corrosión y se comprobó su factibilidad usando este mismo software. Dicho esto, se pudo concluir lo siguiente.

- Las principales causas de la corrosión en estructuras de hormigón armado son las especies que provocan la carbonatación, con la humedad como factor principal, la cual se convierte en un medio conductor para que este fenómeno ocurra. Así como el dióxido de carbono que, al reaccionar logra bajar el pH altamente alcalino del hormigón, causando inestabilidad en la capa pasivada del acero.
- Los iones de cloruro y los sulfuros son los agentes externos que más se deben tomar en cuenta en el entorno a la hora de crear un sistema de prevención de corrosión, ya que estos pueden servir como catalizadores del proceso o bien contribuir creando fisuras y/o agrietamientos en la superficie del hormigón, siendo estos últimos factores decisivos en el proceso.
- Una estructura de hormigón armado sin ningún tipo de protección o prevención a la corrosión genera consecuencias irreversibles que significan un peligro para el bienestar humano, así como un alto gasto económico en reparación de daños.

- El alto porcentaje de humedad relativa y la significativa concentración de iones de cloruro hicieron que el ambiente urbano-marítimo diera los valores más altos en el riesgo de corrosión y, por lo tanto, que sea el entorno más agresivo y propenso a corroerse. Esto se debe a que la mezcla de estos agentes deteriora muy rápido las propiedades de protección del hormigón, al mismo tiempo que aumenta la conductividad eléctrica acelerando el proceso.
- Con el porcentaje más alto de humedad relativa, el ambiente urbano-montañoso solo necesitó de eso, más las concentraciones de dióxido de carbono para situarse en el segundo lugar de la predicción de corrosión. Por lo tanto, se observa una vez más que la humedad es un factor clave en este proceso.
- El ambiente industrial es el más seguro de los 3, esto a pesar de tener la incidencia del dióxido de azufre en su entorno, pero la humedad relativa no era tan alta, por lo que la zona electrolítica no tenía tanta conductividad eléctrica ni potencial eléctrico. Sin embargo, este tipo de agente significa un riesgo de agrietamiento constante en la estructura, por lo que es probable la aparición de corrosión por picadura.
- La selección y preparación de los materiales para la construcción es vital en este estudio, en particular una baja relación agua-cemento proporciona resistencia y durabilidad. Además de evitar el uso de agua o arena de mar para las mezclas, debido a sus concentraciones de cloruros.
- Los resultados de la predicción de corrosión con el sistema de prevención vieron una gran mejoría en todos los parámetros evaluados. La aplicación de medidas como una buena preparación del hormigón mejorando sus propiedades químicas, la incorporación de un recubrimiento de polianilina sobre el acero de refuerzo proporcionando una protección en contra del hidrogeno y la implementación de una prevención catódica hicieron que se evidencie una viabilidad en la aplicación de este sistema.

## RECOMENDACIÓN

De este proyecto se pueden realizar una serie de recomendaciones para:

Investigadores posteriores:

- Realizar un estudio temporal, combinando el desgaste por la carbonatación y la presencia de agentes agresivos. Viendo la evolución de este fenómeno a través del tiempo.
- Buscar entornos diferentes para compararlos con los de la presente investigación.
- Realizar el estudio cuando la estructura presenta daños físicos.
- Fomentar el uso del software COMSOL Multiphysics y sus diferentes módulos de simulación.

Constructoras:

- Mejorar la relación de los materiales al producir el hormigón armado.
- Tener clara la función que tendrán las estructuras para así, usar los métodos de protección y prevención catódicas adecuadas.

## BIBLIOGRAFÍA

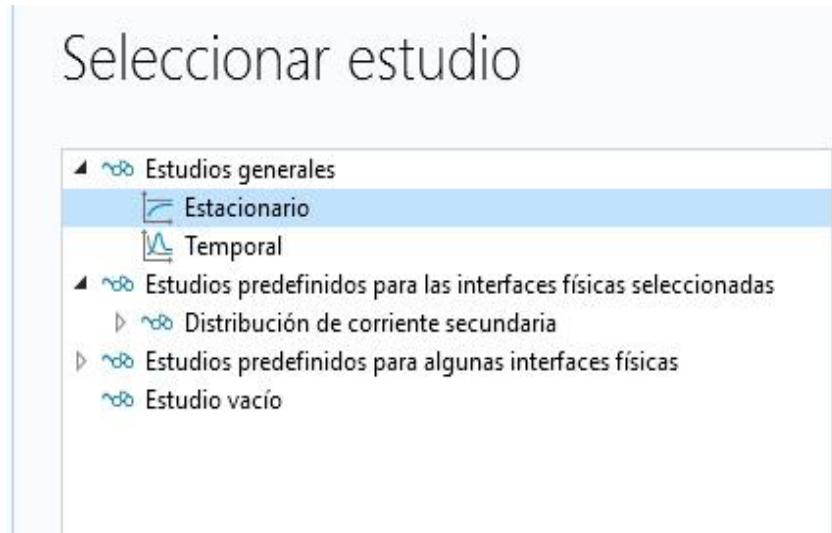
- Arias, F. (2006). **El proyecto de investigación, introducción, a la metodología científica**. Editorial: Episteme, C.A. 5ta edición.
- Revie R. W. (2011). **Uhlig's Corrosion Handbook**. Editorial: Wiley & Sons, Inc.
- ECCA (2011). **The Basics of Corrosion. Documento en línea**. Disponible en: <http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%20021211.pdf>. [Consulta: 21 de diciembre, 2019]
- Hurtado, J. (2010). **Guía de Comprensión Metodológica**. Tercera Edición. Editorial: Fundación SYPAL.
- Revie R. W. y Uhlig H. H. (2008). **Corrosion and Corrosion Control – An Introduction to Corrosion Science and Engineering**. Wiley & Sons, Inc
- Salazar, J. (2015). **Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)**. Documento en línea. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>. [Consulta: 21 de diciembre, 2019]
- Villagrán, Y. (2012). **Corrosión localizada en estructuras de hormigón armado**. Documento en línea. Disponible en: [https://www.academia.edu/4443093/Corrosi%C3%B3n\\_localizada\\_en\\_estructuras\\_de\\_hormig%C3%B3n\\_armado](https://www.academia.edu/4443093/Corrosi%C3%B3n_localizada_en_estructuras_de_hormig%C3%B3n_armado). [Consulta: 21 de diciembre, 2019]
- Yugovich, P (2010). **Vida útil de las estructuras, dónde estamos y hacia dónde vamos**. Documento en línea. Disponible en: <http://www.ing.una.py/pdf/1er-congreso-nacional-ingcivil/32es-ho-32.pdf>. [Consulta: 19 de diciembre, 2019]
- A. M. Aguirre (2013). **Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas**. Documento en línea. Disponible en:

<https://pdfs.semanticscholar.org/17ef/b38e32e5ac728b6bf66244cf0918ce54d8d2.pdf>. [Consulta: 1 de junio, 2020]

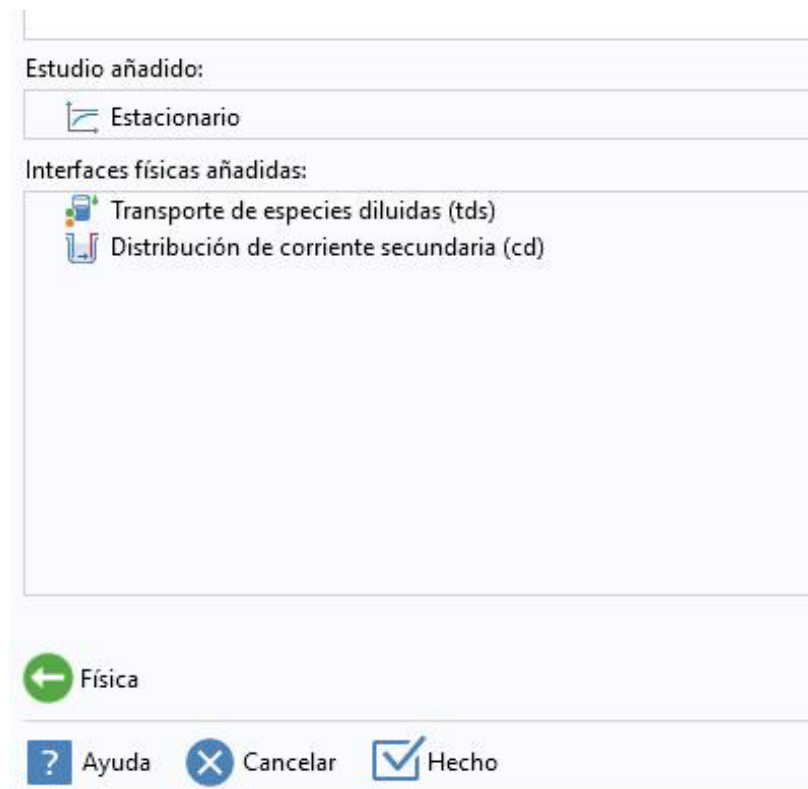
Girón, H. (1998). **Ataque por cloruros en el concreto**. Documento en línea. Disponible en: <http://www.imcyc.com/revista/1998/oct/ataque.htm>. [Consulta: 1 de junio, 2020]

## **ANEXOS**

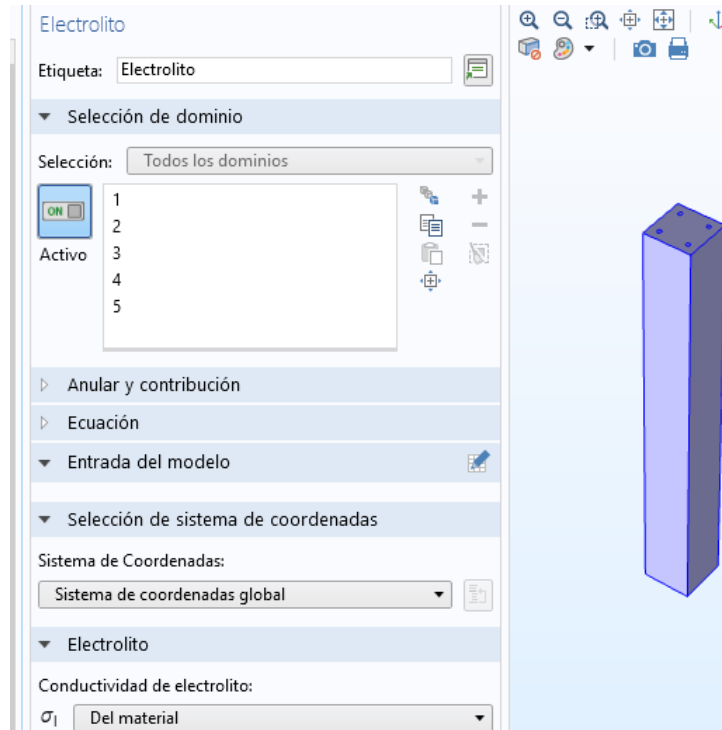
### Anexo 1: Selección de tipo de estudio a realizar.



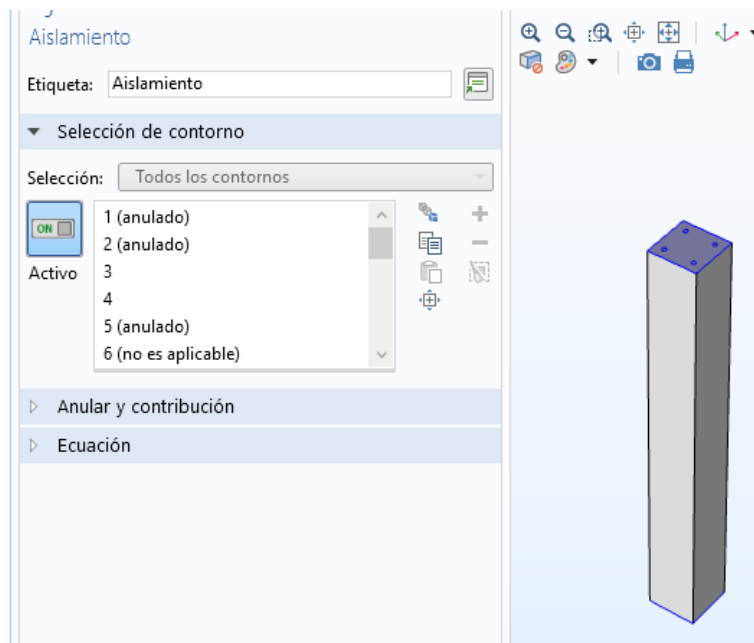
### Anexo 2: Interfaces físicas añadidas.



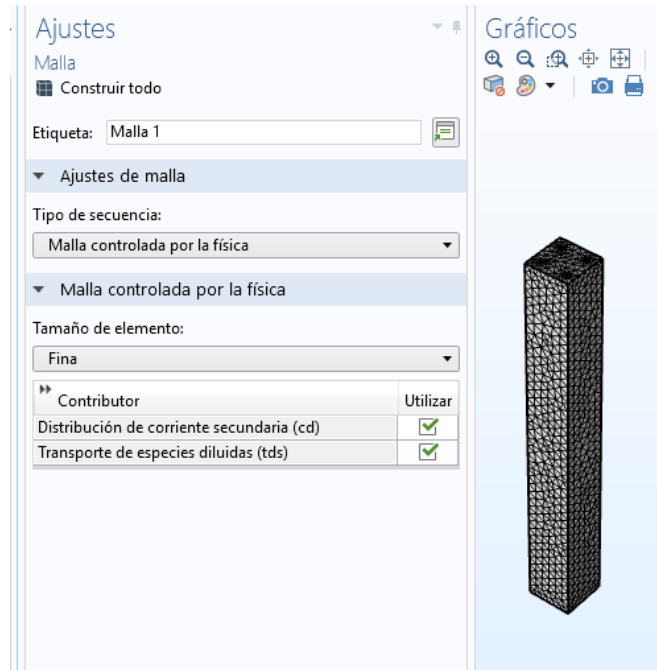
### Anexo 3: Asignar parámetros de la conductividad.



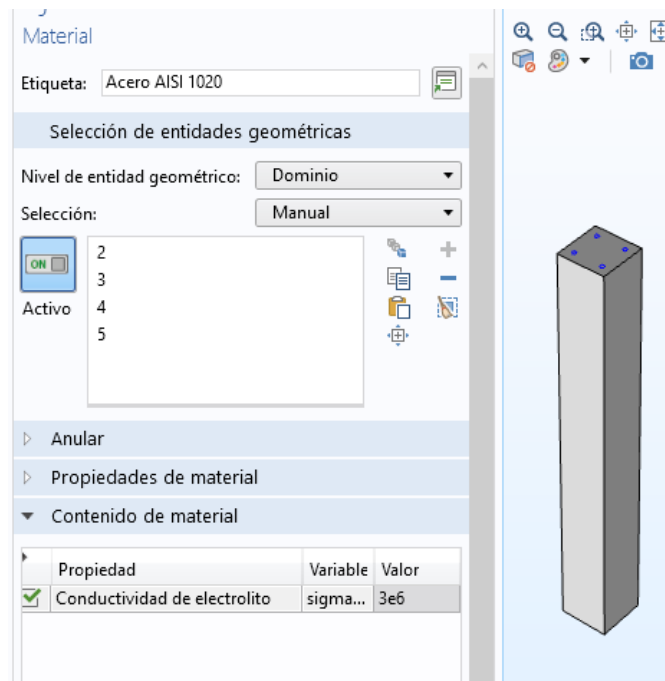
### Anexo 4: Zonas aisladas al medio ambiente.



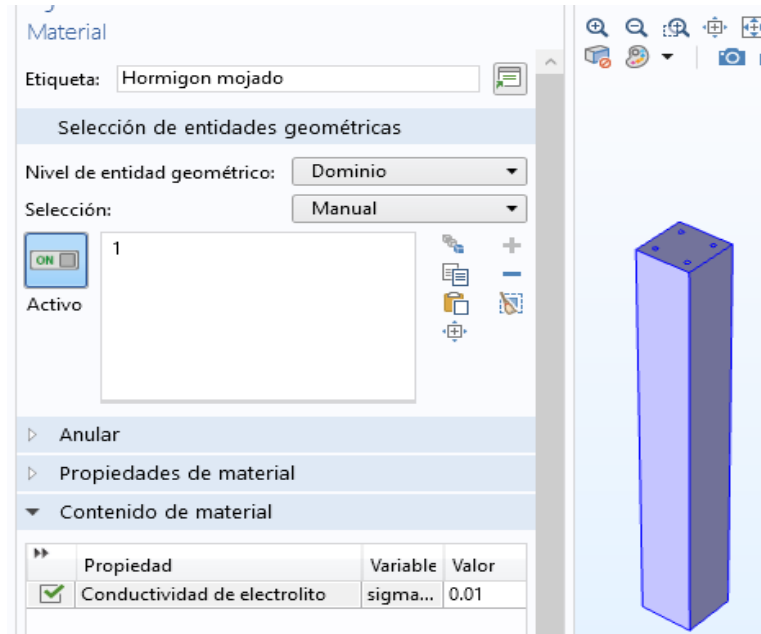
## Anexo 5: Mallado de la estructura.



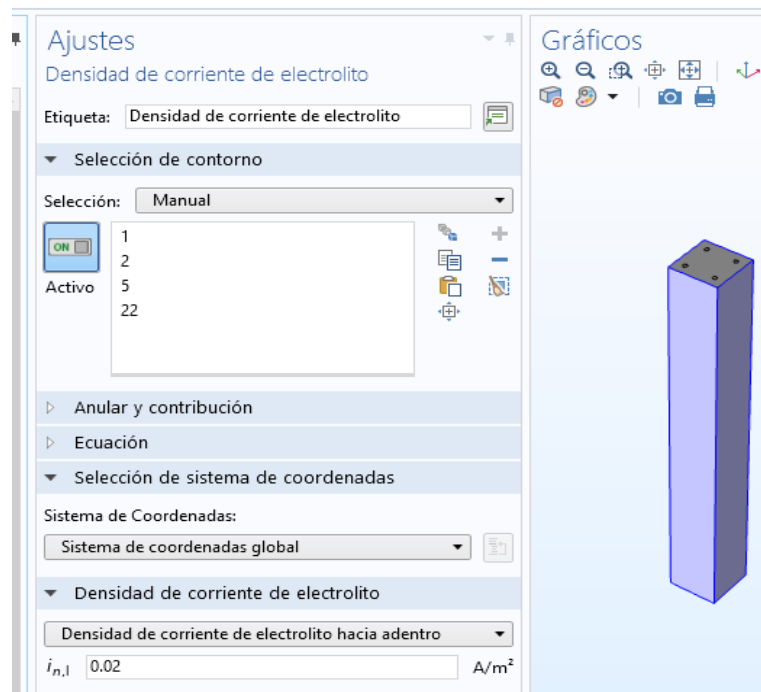
## Anexo 6: Asignación de material y conductividad para el acero AISI 1020.



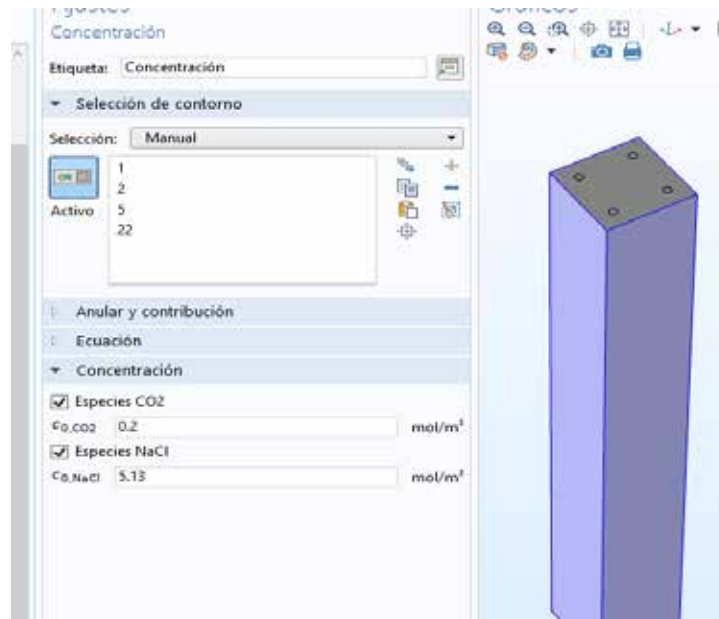
## Anexo 7: Asignación de material y conductividad en ambiente marítimo.



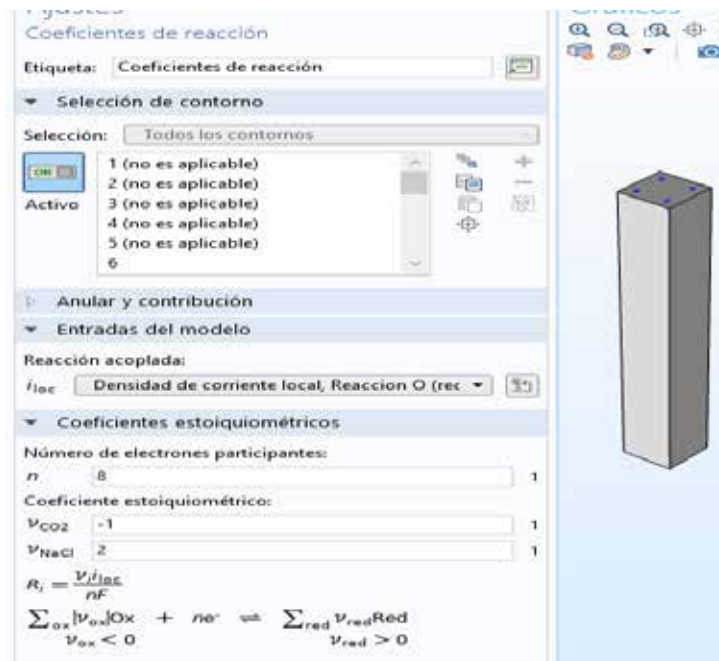
## Anexo 8: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el ambiente marítimo.



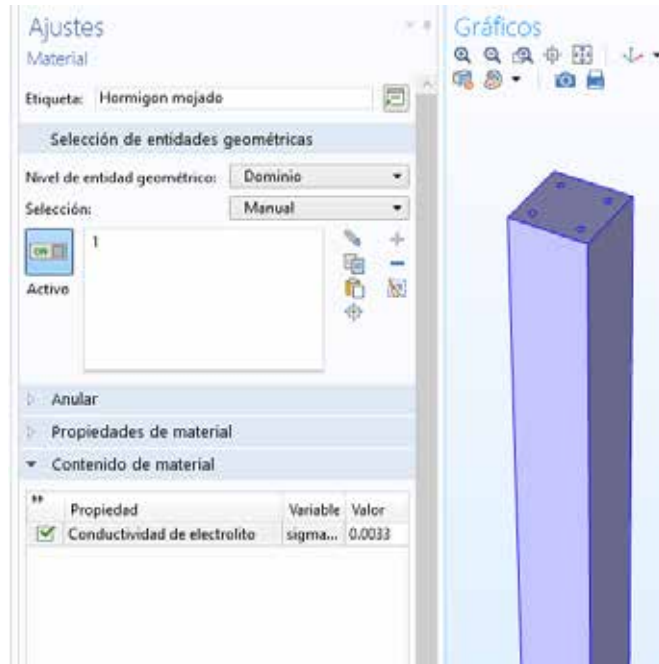
**Anexo 9: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el ambiente marítimo.**



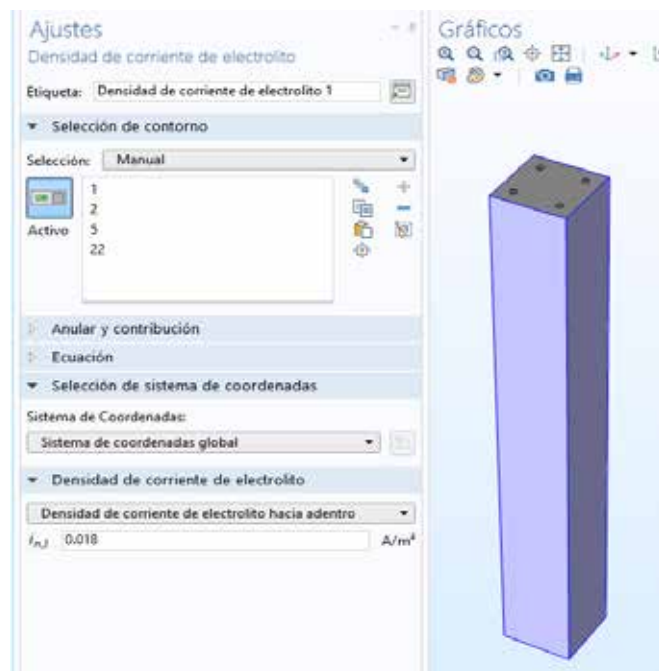
**Anexo 10: Aplicación de los coeficientes de reacción en el ambiente marítimo.**



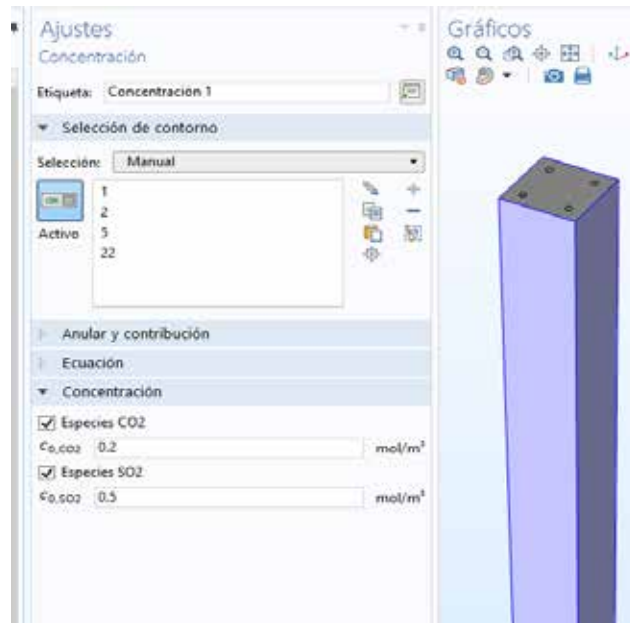
### Anexo 11: Asignación de material y conductividad en ambiente industrial.



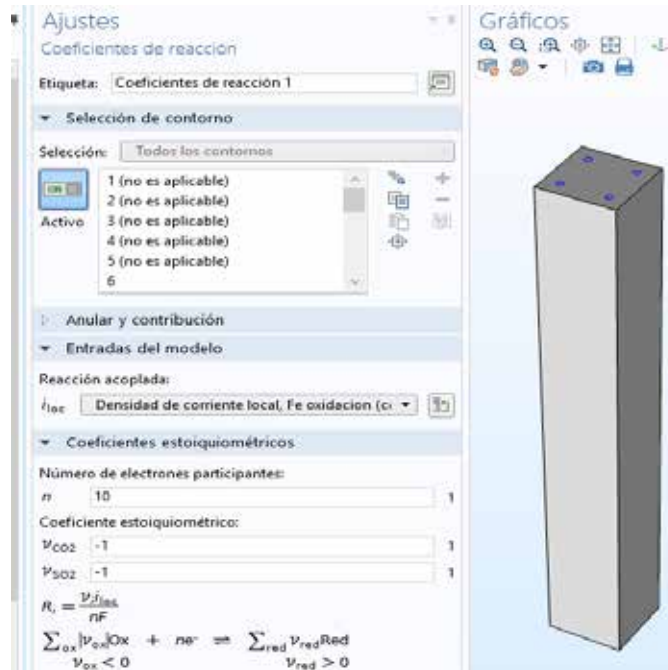
### Anexo 12: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el ambiente industrial.



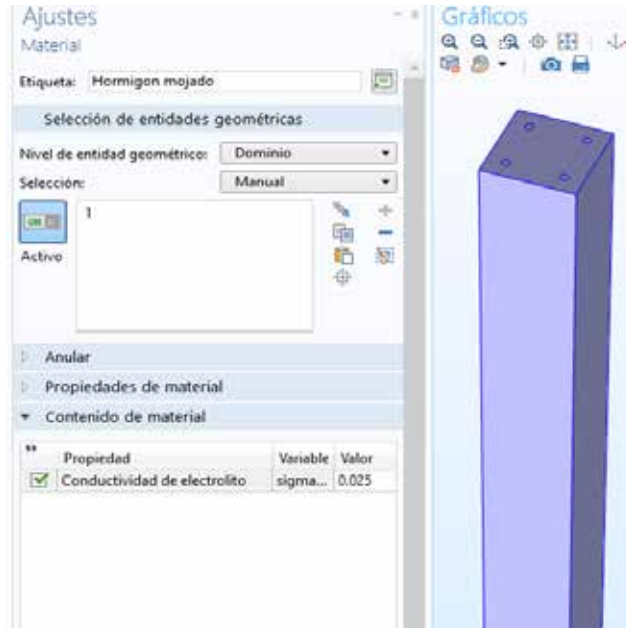
**Anexo 13: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el ambiente industrial.**



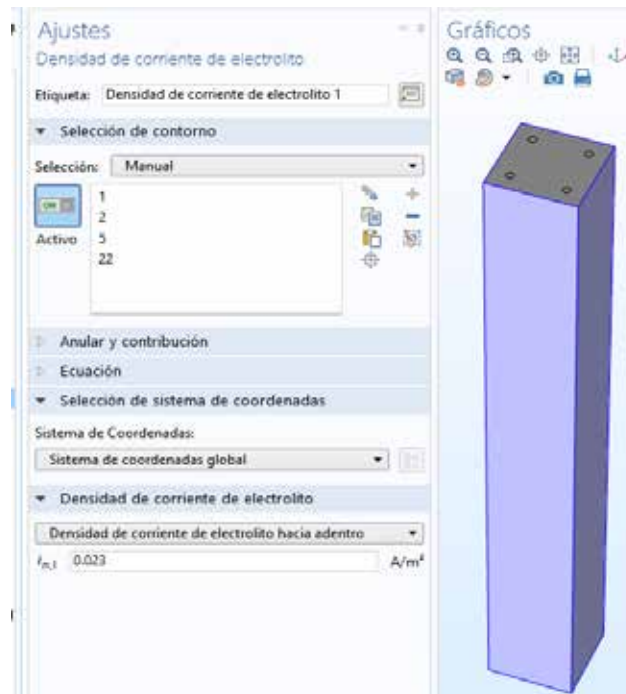
**Anexo 14: Aplicación de los coeficientes de reacción en el ambiente industrial.**



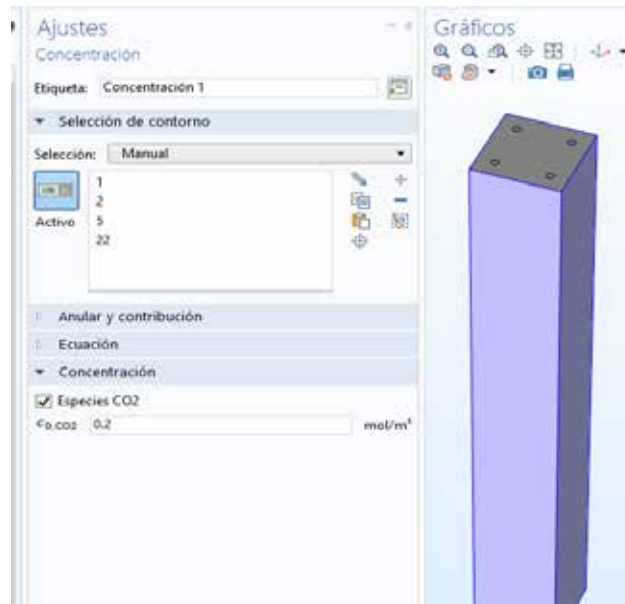
**Anexo 15: Asignación de material y conductividad en el ambiente montañoso.**



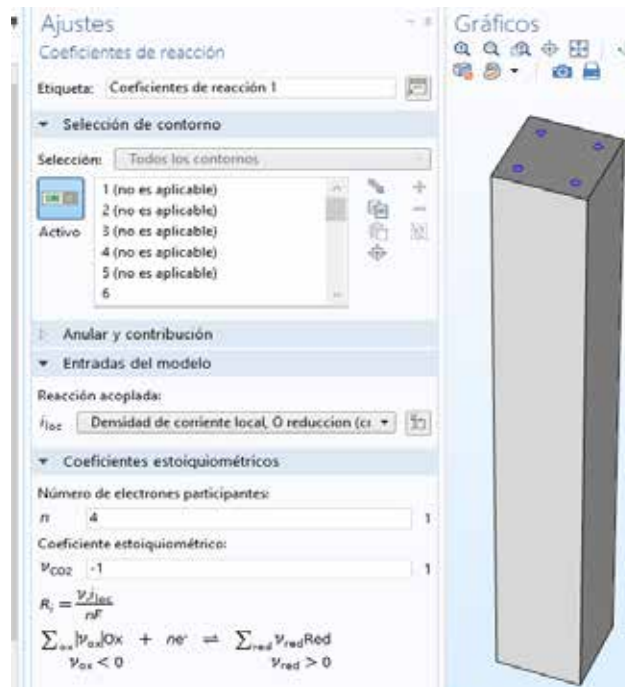
**Anexo 16: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el ambiente montañoso.**



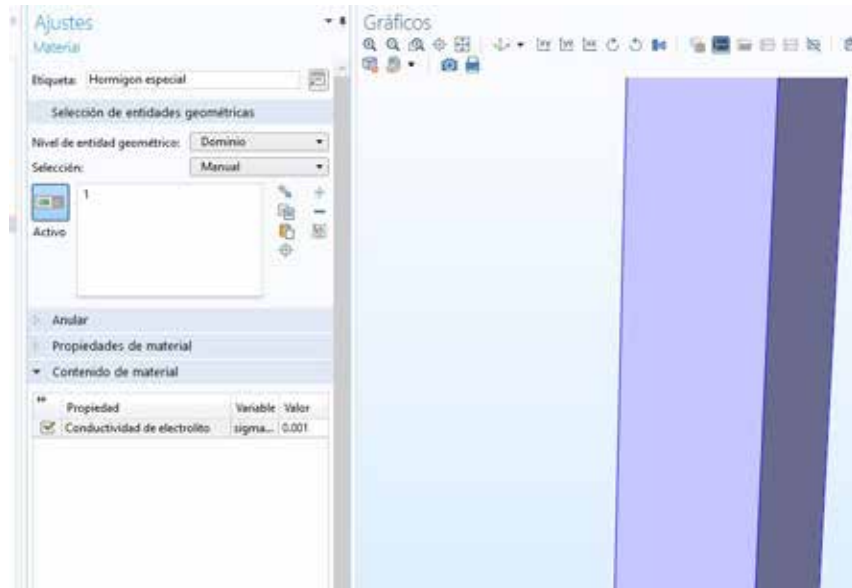
**Anexo 17: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el ambiente montañoso.**



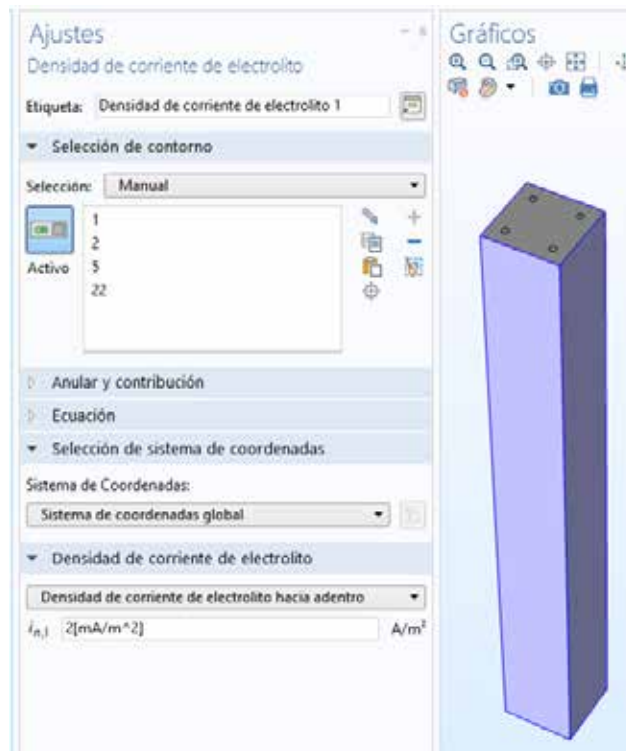
**Anexo 18: Aplicación de los coeficientes de reacción en el ambiente montañoso.**



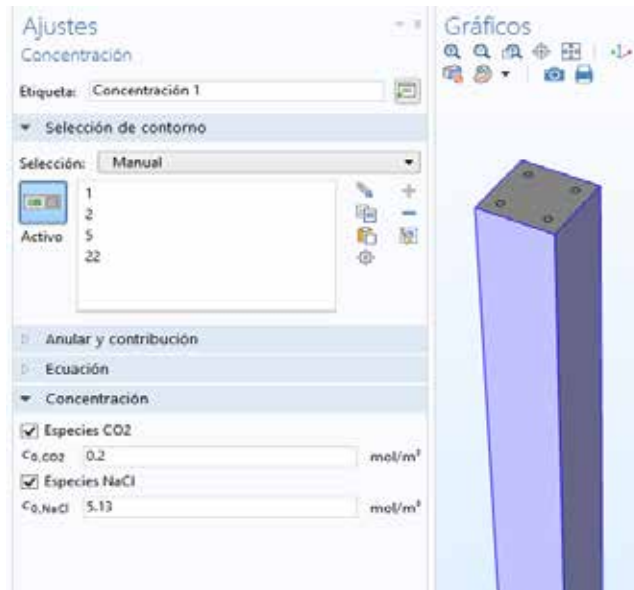
**Anexo 19: Asignación de material y conductividad en el sistema de prevención.**



**Anexo 20: Asignación de la densidad de corriente y delimitación del electrolito en el sistema de prevención.**



**Anexo 21: Aplicación de las concentraciones de especies disueltas en el sistema de prevención.**



**Anexo 22: Aplicación de los coeficientes de reacción en el sistema de prevención.**

