

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ENSAYOS Y RECOMENDACIONES PARA EL CONCRETO EN  
ESTRUCTURAS CERCANAS AL MAR**

**Trabajo de investigación para la obtención del grado académico de  
BACHILLER EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORES:**

Llallire Pariona, Ayrton Bruno  
Pacheco Uribe, Edson Teobaldo  
Pineda Miranda, César Augusto  
Rivera Benavides, José Andrés  
Salinas Bernuy, Felix Francis

**ASESOR:**

Villagomez Molero, Diego

**Lima, agosto de 2020**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca analizar las patologías que sufren las estructuras de concreto armado, especialmente en edificaciones destinadas a uso educativo, que se encuentran ubicadas en zonas cercanas al mar. Dicho análisis servirá para diagnosticar los tipos de daño y su efecto en la durabilidad de las estructuras, de tal manera que, se puedan efectuar un conjunto de recomendaciones y especificaciones técnicas tanto para edificaciones existentes como para aquellas que serán construidas en el futuro. Primero, se realizó la revisión de la literatura para comprender el comportamiento del concreto armado, los entornos marinos y las patologías que se generan a partir de estos. De las cuales, se identificó que los fenómenos de corrosión en el acero de refuerzo y carbonatación en la mezcla de concreto, son los más influyentes en el desempeño de este tipo de edificaciones. A partir de ello, en segundo lugar, para el desarrollo de la investigación, se analizó el caso del Colegio Militar Leoncio Prado, ubicado en el distrito costero de La Perla, debido a que visualmente se evidenció un deterioro prominente en diferentes elementos estructurales. Asimismo, para corroborar el efecto del ambiente costero, se recolectó información meteorológica (temperatura, humedad, precipitación y velocidad del viento) proveniente de la estación Jesús María. En tercer lugar, se realizó un análisis comparativo, de los diferentes tipos de ensayos destructivos y no destructivos, que permiten evaluar el estado de los elementos de concreto armado, con el objetivo de examinar la conveniencia de su aplicación en el medio local y principalmente en instituciones educativas. En cuarto lugar, debido a la coyuntura originada por el COVID-19, no fue posible ejecutar los ensayos anteriormente mencionados y, por lo tanto, los resultados presentados se extrajeron del estudio: “Evaluación de daños por agresión ambiental en viviendas de concreto reforzado” realizado por Rómel Solís Carcaño, Eric Moreno, Felipe Jiménez Torres & Victorino Rosas Pérez. Finalmente, la evaluación de dichos resultados se utilizó de base para proponer las recomendaciones y especificaciones técnicas requeridas.

# ÍNDICE

## ÍNDICE DE TABLAS

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| 1. GENERALIDADES  | 1  |
| 1.1. INTRODUCCIÓN   | 1  |
| 1.2. JUSTIFICACIÓN  | 2  |
| 1.3. ALCANCE  | 3  |
| 1.4. OBJETIVOS  | 3  |
| 1.4.1. OBJETIVO GENERAL   | 3  |
| 1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS  | 3  |
| 1.5. METODOLOGÍA  | 3  |
| 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA  | 5  |
| 2.1. CONCEPTOS GENERALES  | 5  |
| 2.1.1. CONCRETO ARMADO  | 5  |
| 2.1.2. COMPONENTES DEL CEMENTO  | 5  |
| 2.1.5. DURABILIDAD  | 7  |
| 2.1.6. PATOLOGIA DEL CONCRETO   | 8  |
| 2.2. DAÑOS POR AGRESIÓN AMBIENTAL                                       | 8  |
| 2.2.1. PARÁMETROS CLIMÁTICO AMBIENTALES Y CONTAMINANTES<br>ATMOSFÉRICOS | 8  |
| 2.2.2. SULFATOS EN EL CONCRETO  | 8  |
| 2.2.3. IONES CLORURO EN EL CONCRETO                                     | 10 |
| 2.4. DAÑOS EN CONSTRUCCIONES CERCANAS AL MAR                            | 12 |
| 2.4.1. MAR PERUANO  | 12 |
| 2.4.2. ZONAS DE EXPOSICIÓN  | 13 |
| 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN                                       | 14 |
| 3.1. PROCEDIMIENTOS   | 14 |
| 3.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS EDIFICACIONES                             | 14 |
| 3.1.2. ANÁLISIS VISUAL  | 18 |
| 3.1.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS  | 21 |
| 3.1.3.1. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS                                       | 21 |
| 3.1.3.2. TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS                                     | 25 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 3.1.3.3. | TERMOGRAFÍA INFRARROJA (TIR)                      | 27 |
| 3.1.3.4. | MICROSCOPIA ÓPTICA                                | 29 |
| 3.1.4.   | ENSAYOS DESTRUCTIVOS                              | 30 |
| 3.1.5.   | PROTECCIÓN DEL CONCRETO SOMETIDO A MEDIOS MARINOS | 31 |
| 3.1.6.   | SOFTWARE DE MONITOREO                             | 33 |
| 3.2.     | RESULTADOS  | 35 |
| 4.       | RECOMENDACIONES                                   | 38 |
| 5.       | COMENTARIOS Y CONCLUSIONES                        | 40 |
| 6.       | REFERENCIAS                                       | 41 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabla 2-1: | Componentes del cemento.....   | 5  |
| Tabla 2-2: | Vida útil nominal de diferentes tipos de estructura.....   | 7  |
| Tabla 2-3: | Niveles de exposición relacionados a un $f'c$ mínimo.....  | 9  |
| Tabla 2-4: | Requisitos para concreto expuesto a soluciones de sulfatos.....  | 10 |
| Tabla 2-5: | Categorías de corrosividad atmosférica.....  | 11 |
| Tabla 2-6: | Contenido máximo de iones cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo.....                         | 12 |
| Tabla 3-1: | Características del Colegio Leoncio Prado.....   | 16 |
| Tabla 3-2: | Registro meteorológico para el mes de junio 2020 en la estación Jesús María, Lima                                  | 17 |
| Tabla 3-3: | Promedio de datos meteorológicos.....  | 18 |
| Tabla 3-4: | Probabilidades de corrosión de acuerdo a la relación $E_{corr}$ vs $ESC$ según el criterio de R. Stratful.....     | 24 |
| Tabla 3-5: | Condición del acero de refuerzo de acuerdo a la relación $E_{corr}$ vs $ESC$ según el criterio de R. Stratful..... | 24 |
| Tabla 3-6: | Lista de bacterias utilizadas para curar grietas en el concreto.....   | 32 |
| Tabla 3-7: | Resultados de las pruebas de campo en la investigación base.....   | 36 |
| Tabla 3-8: | Resultados de las pruebas de laboratorio en la investigación base.....   | 36 |
| Tabla 4-1: | Análisis comparativo de ensayos no destructivos.....   | 38 |
| Tabla 4-2: | Análisis comparativo de ensayos destructivos.....  | 39 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1-1: Inspección de Estructura de Muelle de Carga y Descarga en Lima, Perú- 2006. Exposición a ambiente de inmersión en agua de mar y a la agresividad atmosférica corrosiva marina. .... | 1  |
| Figura 1-2: Muro de concreto reforzado dañado por efectos de corrosión.....   | 2  |
| Figura 2-1: Corrosión en el acero de refuerzo .....   | 11 |
| Figura 2-2: (a) Variación de la temperatura y (b) el contenido de salinidad del mar peruano al 04/06/20 .....   | 12 |
| Figura 2-3: Zonas de exposición.....  | 14 |
| Figura 3-1: Ejemplo de especificaciones técnicas estructurales para una institución educativa en el Perú .....  | 15 |
| Figura 3-2: Ubicación del Colegio Leoncio Prado .....   | 16 |
| Figura 3-3: Fachada del Colegio Leoncio Prado .....   | 17 |
| Figura 3-4: Clasificación de las áreas según la inspección visual de la estructura.....   | 19 |
| Figura 3-5: Plano de planta del Colegio Leoncio Prado .....   | 19 |
| Figura 3-6: Cortes y elevación del Colegio Leoncio Prado.....   | 20 |
| Figura 3-7: Distribución de áreas del Colegio Leoncio Prado.....  | 20 |
| Figura 3-8: Estado de deterioro de un pabellón del Colegio Leoncio Prado .....  | 21 |
| Figura 3-9: Mecanismo para la ejecución de ensayos electroquímicos .....  | 22 |
| Figura 3-10: Medición de la resistencia a la polarización .....   | 23 |
| Figura 3-11: Diagrama de Evans .....  | 23 |
| Figura 3-12: Circuito equivalente tipo Randles .....  | 25 |
| Figura 3-13: Curva de extrapolación de Tafel .....  | 25 |
| Figura 3-14: Tipos de deterioro por corrosión en el concreto (a) Grietas, (b) Despostillado y (c) Fractura en capas.....  | 27 |
| Figura 3-15: Aplicación de termografía infraroja en puentes .....   | 29 |
| Figura 3-16: Evaluación del concreto mediante microscopía óptica .....  | 29 |
| Figura 3-17: Bacterias utilizadas para sanar el agrietamiento en el concreto .....  | 32 |
| Figura 3-18: Diagrama de flujo de análisis del software .....   | 34 |
| Figura 3-19: Interfaz del software de carbonatación .....   | 35 |

## 1. GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es la mezcla de materiales (arena, grava, agua, acero, etc.) más utilizada en la industria de la construcción, esto debido a su efectividad para soportar esfuerzos mecánicos y a su poca necesidad de mantenimiento durante su periodo de vida. Sin embargo, cuando se encuentra sometido a condiciones atmosféricas severas puede incrementar su vulnerabilidad, acortando su tiempo de vida estimado, este es el caso de las edificaciones construidas cerca a las costas marinas. Debido a las reacciones químicas que se generan en los componentes del concreto reforzado, producidas por agentes marinos que penetran las estructuras, se originan daños (Figura 1-1) que afectan su durabilidad, poniendo en riesgo la calidad y seguridad de las mismas. En tal sentido, el presente trabajo de investigación pretende analizar qué tipo de daños, y en qué magnitud, se producen en edificaciones, especialmente educativas, construidas en zonas costeras. Del mismo modo, se pretende analizar qué tipo de soluciones son aplicables para aminorar los daños anteriormente mencionados, de tal manera que se pueda generar un conjunto de recomendaciones y especificaciones técnicas para las edificaciones que se encuentran expuestas al mar.



**Figura 1-1: Inspección de Estructura de Muelle de Carga y Descarga en Lima, Perú- 2006.  
Exposición a ambiente de inmersión en agua de mar y a la agresividad atmosférica corrosiva marina.**

Fuente: <http://americanperu.blogspot.com/2007/08/estructuras-expuestas-corrosin-marina.html>

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Cuando las edificaciones de concreto reforzado están sometidas a condiciones meteorológicas extraordinarias, como las producidas por las zonas costeras, se producen daños que pueden ocasionar la ruptura o falla de las mismas, acortando su tiempo de vida útil o durabilidad. Para el caso de centros educativos, que reciben un presupuesto menor para mantenimiento o reparación de infraestructura, estos daños podrían generar pérdidas humanas y materiales irreparables.

Se define la durabilidad como la resistencia que tienen los materiales o estructuras, a los efectos del tiempo, ataques químicos, incendios o cualquier agente que ocasione deterioro, manteniendo sus características de forma, calidad y resistencia en condiciones originales (Hernández, 2006)

Los daños que afectan la durabilidad de las estructuras provienen, principalmente, de los gases y líquidos que se introducen en las mismas, tales como el oxígeno, los cloruros, el agua, etc.; estas sustancias ocasionan diversas reacciones químicas que maltratan las estructuras, siendo la corrosión del acero de refuerzo, la que más daño genera, llevando la estructura a estados críticos (Lamond, 1997).

El presente trabajo pretende hacer un diagnóstico de aquellas estructuras que están sujetas a este tipo de reacciones químicas, debido a que se encuentran en zonas cercanas al mar, y analizar el efecto que estas tienen en su durabilidad.



**Figura 1-2: Muro de concreto reforzado dañado por efectos de corrosión**

Fuente: Evaluación de daños por agresión ambiental en viviendas de concreto reforzado (Romel Solís et al., 2008)

### 1.3. ALCANCE

Se estudiarán las edificaciones de uso educativo, de concreto reforzado, construidas en zonas costeras. Mediante el análisis de los ensayos mecánicos idóneos, se evaluará la magnitud del daño que ocasionan los agentes marinos en las propiedades de las estructuras. Finalmente se ejecutará un conjunto de especificaciones y recomendaciones para este tipo de estructuras.

### 1.4. OBJETIVOS

#### 1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar las patologías que sufre el concreto reforzado en estructuras de centros educativos cercanos al mar.

#### 1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Definir y caracterizar las edificaciones a analizar.
- b) Identificar el tipo de deterioro que sufren las edificaciones seleccionadas.
- c) Analizar el tiempo en el cual el concreto de las edificaciones seleccionadas sufre deterioro.
- d) Analizar el tipo de ensayos que permiten cuantificar el deterioro en las edificaciones seleccionadas.
- e) Establecer una guía de recomendaciones y especificaciones técnicas para las edificaciones seleccionadas.

### 1.5. METODOLOGÍA

#### ACT.1 Caracterización de las edificaciones a analizar

T.1 Revisión del estado del arte sobre el diseño estructural en edificaciones cercanas al mar.

T.2 Elección del tipo de infraestructura a analizar

T.2 Elección de las condiciones ambientales del tipo de infraestructura a analizar

T.3 Análisis de resultados

#### ACT.2 Evaluación de las sustancias que pueden generar daño en el concreto en zonas cercanas al mar

T.1 Revisión del estado del arte sobre las sustancias, de un entorno marino, que pueden generar deterioro en el concreto

T.2 Definir los periodos de estudio y establecer un tiempo estimado de deterioro

T.2 Definir los tipos de deterioro

T.3 Análisis de resultados

#### ACT.3 Analizar los ensayos in situ, de laboratorio y no destructivos, que permitan estimar la calidad del concreto expuesto a un medio marino



T.1 Revisión del estado del arte sobre los ensayos in situ en el concreto expuesto a un medio marino

T.2 Revisión del estado del arte sobre los ensayos en el concreto expuesto a un medio marino

T.4 Evaluación de la conveniencia de incorporar los ensayos analizados en el presente estudio.

T.5 Análisis de resultados

ACT.4 Analizar los estudios de aditivos, componentes biológicos y otros, que pueden ayudar a prevenir el deterioro del concreto

T.1 Revisión del estado del arte sobre los aditivos químicos que pueden ayudar a prevenir el deterioro del concreto expuesto a un entorno marino

T.2 Revisión del estado del arte sobre los aditivos biológicos que pueden ayudar a prevenir el deterioro del concreto expuesto a un entorno marino

T.3 Evaluación de la conveniencia de incorporar los aditivos analizados en el presente estudio.

T.4 Análisis de resultados

ACT.5 Analizar los sistemas de monitoreo de deterioro del concreto

T.1 Revisión del estado del arte sobre los sistemas de monitoreo que pueden ayudar a prevenir el deterioro del concreto expuesto a un entorno marino

T.2 Evaluación de la conveniencia de incorporar los sistemas de monitoreo analizados en el presente estudio.

T.3 Análisis de resultados

ACT.6 Establecer una guía de recomendaciones y especificaciones técnicas

T.1 Elección de los ensayos in situ que permitan analizar, adecuadamente, el deterioro del concreto expuesto a un medio marino

T.2 Elección de los ensayos de laboratorio que permitan analizar, adecuadamente, el deterioro del concreto expuesto a un medio marino

T.3 Elección de los ensayos no destructivos que permitan analizar, adecuadamente, el deterioro del concreto expuesto a un medio marino

T.4 Elección de los aditivos químicos que permitan reducir, adecuadamente, el deterioro del concreto expuesto a un medio marino

T.5 Elección de los aditivos biológicos que permitan reducir, adecuadamente, el deterioro del concreto expuesto a un medio marino

T.6 Elección de los sistemas de monitoreo que permitan prevenir, adecuadamente, el deterioro del concreto expuesto a un medio marino

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. CONCEPTOS GENERALES

#### 2.1.1. CONCRETO ARMADO

Según la norma E.060 “Concreto Armado”, el concreto es el material resultante de la mezcla y la unión de agregados gruesos y finos (grava y arena) con la pasta que se obtiene añadiendo agua al cemento Portland (un conglomerante) o cualquier otro cemento hidráulico. En cuanto al concreto armado, la norma indica que consiste en un concreto reforzado con una cierta cantidad de acero, de modo que pueda ser empleado como un elemento estructural en una edificación. El concreto armado es el material de construcción más usado en la actualidad en todo el mundo para muchos tipos de proyectos debido a que presenta un complemento óptimo entre dos materiales como el acero y el concreto. El primero, brinda la capacidad de resistir esfuerzos de tracción en el elemento, mientras que el concreto se aporta en la resistencia en compresión y en el recubrimiento del acero contra agentes nocivos, como lo son los cloruros y los sulfatos.

#### 2.1.2. COMPONENTES DEL CEMENTO

Para entender cómo se desarrollan las distintas reacciones químicas y las consecuencias que acarrearán, es necesario conocer los compuestos químicos en el cemento y cómo influyen sus concentraciones en las distintas propiedades del material producido. A continuación, se presenta una tabla con los principales compuestos químicos resultantes del proceso de cocción del clínker, la materia prima del cemento, su nomenclatura y el rango usual de concentración, en porcentaje.

Tabla 2-1: Componentes del cemento

| Componentes                                | Nomenclatura | Masa   |
|--|--------------|--------|
| Silicato tricálcico o <b>alita</b>         | $C_3S$       | 45-75% |
| Silicato dicálcico o <b>belita</b>         | $C_2S$       | 7-32%  |
| Aluminato tricálcico o <b>aluminato</b>    | $C_3A$       | 0-13%  |
| Aluminoferrita tricálcica o <b>ferrita</b> | $C_4AF$      | 0-18%  |
| Yeso                                       | $CSH_2$      | 2-10%  |

Fuente: Ciencia de los materiales, Bertolotti

Los primeros dos componentes, la alita y la belita, son los principales responsables de la velocidad de la ganancia de resistencia del concreto cuando este es hidratado, mientras que el yeso retrasa la fragua y la ferrita es el único componente con átomos de hierro. El aluminato es el componente más interesante a analizar desde el punto de vista de la durabilidad del concreto, pues es el elemento que reacciona con los sulfatos que pueden encontrarse, en solución, en el agua de mar.

### 2.1.3. AGUA PARA LA MEZCLA

Este componente es de suma importancia debido a que produce la hidratación del concreto y la ganancia de resistencia a partir de las reacciones químicas que concluyen en la generación de los compuestos finales del concreto. Entonces, el agua debe ser potable o lo más cercana a esta característica posible, dado que esto asegura una poca o nula concentración de impurezas que puedan producir alteraciones en la hidratación del concreto, retrasos del fraguado y endurecimiento, una resistencia menor a la de diseño de mezcla o atentados contra su durabilidad. (Treviño, 1998)

Las aguas que contienen materiales y compuestos orgánicos o que puedan formar compuestos ácidos, tales como azúcares, taninos, sulfatos o aceites; o las que contengan materiales residuales de plantas industriales o de tratamiento son dañinas para el concreto, al igual que las aguas originarias de ríos, pantanos, ciénagas o mares. Estas últimas, en pueden ser usadas en elementos preferiblemente no estructurales como sardineles de concreto simple o afines, dado que reduce la resistencia del mismo en un 13%. En el caso de elementos armados y pretensados, no es factible emplear el agua marina ya que el ataque de cloruros a la armadura es peligroso y compromete al elemento, sobre todo en concreto preesforzado pues la sección del acero es menor. (Fernández Cánovas, 1996).

### 2.1.4. ADITIVOS

Sustancias que se añaden a la mezcla del concreto antes o durante el amasado para brindarle ciertas propiedades adicionales para lograr un buen desempeño (Quintan, 2005). En el caso del concreto expuesto al ambiente marino, se vislumbran los siguientes aditivos como componentes que aumenten su durabilidad:

- Inhibidores de la corrosión:

Este aditivo funciona como un modificador de la matriz de reacciones en el proceso de la hidratación del concreto. Gracias a él, se genera una distribución uniforme de poros más pequeños que los del concreto sin aditivos, también llamados microporos. Este aditivo también acelera la velocidad de hidratación, reduciendo el exceso de agua que es expulsada a la superficie como agua de sangrado, disminuyendo la cantidad de poros. En conclusión, este aditivo reduce la permeabilidad de la mezcla.

- Ánodos de sacrificio:

Mitiga el daño producido por la corrosión del acero al formarse la celda galvánica en la interfaz del acero de refuerzo. Estos ánodos de sacrificio pierden electrones y estos son recibidos por el acero, el cual no es afectado por la oxidación y preserva, de esta manera, su capa de pasivación.

- Aditivos plastificantes:

Es la medida más simple en cuanto a aditivos se refiere. Este compuesto permite usar una relación agua/cemento menor que a la de una mezcla convencional, con lo cual se reduce la cantidad de agua empleada en el elemento, su porosidad y su resistencia. La principal diferencia con el aditivo inhibidor de la corrosión es que en este caso el contenido de agua para la mezcla es menor, mientras que para el primero, el diseño de mezcla es similar a uno convencional, puesto que el inhibidor consume una mayor cantidad de agua, lo cual concluye en el mismo resultado: una menor permeabilidad.

### 2.1.5. DURABILIDAD

La durabilidad de un concreto puede definirse (ACI 318-08) como su resistencia a la acción de agentes externos, tales como el clima (temperatura y humedad), a los ataques químicos (sulfatos y cloruros), a la abrasión o a cualquier otro tipo de deterioro. Bajo estas condiciones, es necesario realizar un diseño acorde a la vida útil del proyecto a edificar. La vida útil es, según la ISO13823: 2008, el periodo efectivo durante el cual una estructura o cualquiera de sus componentes satisfacen los requisitos de desempeño en el proyecto, sin acciones imprevistas de mantenimiento y reparación. Esta norma define también a la vida residual como el tiempo iniciado a partir del momento en que la estructura alcanza el anterior límite aceptable, es decir, cuando la estructura necesita reparaciones y mantenimiento para evitar un posible fallo y colapso total. A continuación, se presentan la tabla obtenida del que estima la vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura:

**Tabla 2-2: Vida útil nominal de diferentes tipos de estructura**

| <b>Tipo de estructuras</b>  | <b>Vida útil nominal</b> |
|---|--------------------------|
| Estructuras de carácter temporal  | Entre 3 y 10 años        |
| Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal  | Entre 10 y 25 años       |
| Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas  | Entre 15 y 50 años       |
| Edificios de viviendas u oficinas y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media | 50 años                  |
| Edificios de carácter monumental o de importancia especial  | 100 años                 |
| Puentes u otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta   | 100 años                 |

Fuente: Ministerio de Fomento – Gobierno de España (2010)

Entonces, es necesario estudiar las posibles causas de detrimento de la vida útil de las estructuras proyectadas, de forma que empiecen su vida residual en el mayor tiempo posible.

### 2.1.6. PATOLOGIA DEL CONCRETO

La revista “Construcción y Tecnología en Concreto, en su edición de marzo de 2017, define a la patología del concreto como “el estudio sistemático de los procesos y características de las “enfermedades” o los “defectos y daños” que puede sufrir el concreto, sus causas, sus consecuencias y sus remedios.” Es aquella parte de la durabilidad que se refiere a los signos, causas posibles y diagnósticos que experimentan las estructuras de concreto. Dentro del cuantioso número de agentes externos que amenazan la durabilidad del concreto se encuentra el efecto del ambiente marino, caracterizado por un contenido de sulfatos e iones cloruros.

A continuación, se clasifican y ejemplifican las distintas patologías del concreto:

Ataque físico: Erosión, acción de la helada

Ataque químico: Ácidos, sulfatos, reacción de los álcalis, componentes orgánicos

Corrosión en las armaduras: Carbonatación, acción de los cloruros

Daños no estructurales: Asiento plástico, retracción plástica, contracción térmica inicial, retracción hidráulica

Daños estructurales: Compresión, tracción, flexión, cortante, torsión, rasante, punzonamiento.

Daños por eventos extraordinarios: Fuego, sismo, impacto, empuje y asiento del terreno, suelos expansivos.

## 2.2. DAÑOS POR AGRESIÓN AMBIENTAL

### 2.2.1. PARÁMETROS CLIMÁTICO AMBIENTALES Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) plantea una metodología para medir la agresividad ambiental de un entorno (Norma 9223:2012), la cual considera dos aspectos principales: tiempo de humectación y velocidad de deposición de  $\text{SO}_2$  y de iones de cloruro

### 2.2.2. SULFATOS EN EL CONCRETO

Los sulfatos son elementos químicos que se pueden encontrar en ambientes marinos y generan procesos químicos de deterioro en los elementos de concreto armado. Para que estos produzcan una repercusión importante en la durabilidad es necesario que se encuentre cierta concentración importante de sulfatos y un material de transporte como el agua; si no se presenta una cantidad considerable de agua o humedad, es decir, no hay transporte, la reacción probablemente no será

importante para la durabilidad del concreto. La reacción de los sulfatos se presenta principalmente con los aluminatos (C3A) del concreto endurecido, es por ello que mientras menor sea el contenido de este elemento en el cemento, ya sea con un cemento Portland tipo II o V, menor será el perjuicio de la reacción. Según Otazzi (2019), esta reacción genera la formación de yeso y etringita, cierto gel que permite la hidratación del concreto en su fase inicial del fraguado. Sin embargo, el yeso es aproximadamente dos veces en volumen los compuestos iniciales y la etringita que se genera luego de haber endurecido el concreto es perjudicial pues esta presenta un volumen mayor que los aluminatos, lo cual produce expansiones volumétricas en el hormigón y estas, a su vez, tensiones internas que dan lugar a fisuraciones por tensión dentro del elemento. Se considera un fenómeno localizado o puntual debido a que estas tensiones aparecen solo en zonas donde el contenido de aluminatos es alto, sin embargo, es un fenómeno que aumenta exponencialmente, pues al aumentar el tamaño de las fisuras y la porosidad del concreto, permite un mayor paso de agua con contenido de sulfatos. Es por ello que se busca producir concretos más densos e impermeables, de modo que sean cada vez más resistentes al ataque por sulfatación. A continuación, se presenta una tabla que relaciona la exposición a los sulfatos, la relación agua/cemento y el  $f'c$  mínimo sugerido por Casas, J (2010):

**Tabla 2-3: Niveles de exposición relacionados a un  $f'c$  mínimo**

| <b>Tipo de exposición a los sulfatos</b> | <b>Sulfatos (SO<sub>4</sub>) en agua (p.p.m)</b> | <b>Relación Agua/Cemento Recomendada</b> | <b><math>f'c</math> Mínimo</b> |
|--|--|--|--------------------------------|
| Despreciable                             | 0 a150   | --                                       | --                             |
| Moderada                                 | 150 a 1500                                       | 0.5                                      | 280                            |
| Severa                                   | 1500 a 10000                                     | 0.45                                     | 315                            |
| Muy severa                               | >10000   | 0.45                                     | 315                            |

Fuente: Casas, J (2010)

En comparación, se presenta la tabla “Requisitos para concreto expuesto a soluciones de sulfatos”, una tabla de la norma E.060 “Concreto Armado” similar a la anterior presentada, en la que además se sugiere el tipo de cemento adecuado para tratar el nivel de exposición de sulfatos:

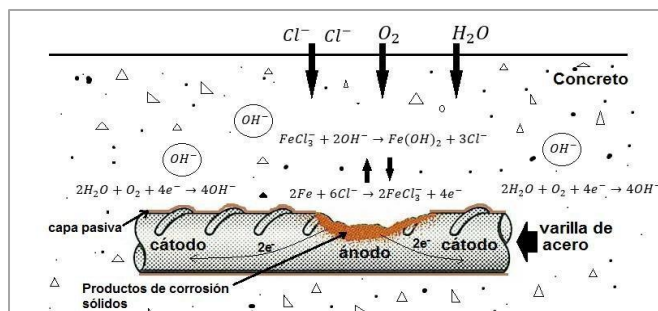
Tabla 2-4: Requisitos para concreto expuesto a soluciones de sulfatos

| Exposición a sulfatos | Sulfato soluble en agua (SO <sub>4</sub> ) presente en el suelo, porcentaje en peso | Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) en agua (p.p.m) | Tipo de cemento  | Relación máxima agua - materia cementante (en peso) para concretos de peso normal | f'c mínimo (MPa) para concretos de peso normal y ligero |
|-----------------------|---|---|--|---|---|
| Insignificante        | 0 a 0.1   | 0 a 150                                     | --   | --  | --  |
| Moderada              | 0.1 a 0.2   | 150 a 1500                                  | II, IP (MS)<br>IS(MS)<br>P(MS),<br>I(PM)(MS),<br>I(SM)(MS) | 0.50  | 28  |
| Severa                | 0.2 a 2.0   | 1500 a 10000                                | V  | 0.45  | 31  |
| Muy severa            | > 2.0   | > 10000                                     | Tipo V más puzolana  | 0.45  | 31  |

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma de Concreto Armado E.060

### 2.2.3. IONES CLORURO EN EL CONCRETO

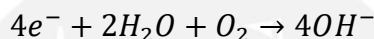
La presencia de cloruros en el concreto representa el problema más importante para el mantenimiento de estructuras civiles, debido a que ataca directamente al refuerzo del elemento en un deterioro electroquímico irreparable y sin posibilidad de solución total. El concreto genera una capa de pasivación en el acero cuando este se encuentra con un PH 12 y 14, es decir, altamente alcalino. Mientras esta solución se encuentre en ese rango, el acero pasivado no podrá ser corroído debido a la película que presenta. Cuando los iones de cloruros ingresan a la solución dentro de los poros (electrolito), se genera una celda electroquímica: el hierro del acero se vuelve el ánodo mientras que el agua y el oxígeno resultan como el cátodo. El electrolito facilitará el movimiento de iones hidroxilo entre el ánodo y el cátodo, lo cual generará, finalmente, el óxido de hierro, lo cual se interpreta como la oxidación del hierro. A continuación, se presenta una ilustración de cómo se genera la corrosión de la armadura:



**Figura 2-1: Corrosión en el acero de refuerzo**

Fuente: Protección superficial del Hormigón Armado: Cloruros y Carbonatación

Como se aprecia en la figura, la capa de pasivación se forma en la superficie de la varilla de acero, pero debido a la intrusión de los cloruros, oxígenos y el agua, se genera la celda electroquímica y se da la siguiente reacción:



Los electrones libres corresponden a los que fluyen a través del electrolito hacia el cátodo y reaccionan con el agua y el oxígeno, formando iones hidroxilo. Estos  $OH^-$  se relacionan con los átomos de hierro y producen los óxidos de hierro  $Fe(OH)_2$ , los cuales producen la corrosión, disminuyendo la pasivación del concreto y lo corroe. El óxido de hierro ocupa un mayor volumen que sus compuestos originales, lo cual, al igual que con los sulfatos, genera tensiones en el concreto, fisurando y, además, corroyendo el acero. Este ataque electroquímico es muy peligroso puesto que disminuye la sección de la armadura de refuerzo, lo cual disminuye también la resistencia estructural de los elementos y su vida útil. Para efectos prácticos la corrosividad atmosférica se puede dividir según:

**Tabla 2-5: Categorías de corrosividad atmosférica**

| Categoría | Corrosividad |
|-----------|--------------|
| C1        | Muy baja     |
| C2        | Baja         |
| C3        | Media        |
| C4        | Alta         |
| C5        | Muy alta     |
| CX        | Extrema      |

Fuente: Stratful, 1993

A continuación, se presenta la tabla de contenido máximo de iones cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo, provista por la norma E.060 Concreto Armado:



Tabla 2-6: Contenido máximo de iones cloruro para la protección contra la corrosión del refuerzo

| Tipo de elemento  | Contenido máximo de iones de cloruro solubles en agua en el concreto (porcentaje en peso del cemento) |
|---|---|
| Concreto preesforzado   | 0.06  |
| Concreto armado que en servicio estará expuesto a cloruros                | 0.15  |
| Concreto armado que en servicio estará seco y protegido contra la humedad | 1   |
| Otras construcciones de concreto armado                                   | 0.3   |

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones - Norma de Concreto Armado E.060

## 2.4. DAÑOS EN CONSTRUCCIONES CERCANAS AL MAR

### 2.4.1. MAR PERUANO

Las dos principales características del mar que afectan al comportamiento del concreto, aparte del contenido de sulfatos y cloruros, es la temperatura y el contenido de salinidad del mar superficial en la costa peruana.

En la siguiente imagen se aprecia que la variación de la temperatura y el contenido de salinidad del mar peruano, actualizado al 04/06/20, realizados por el Instituto del Mar del Perú:

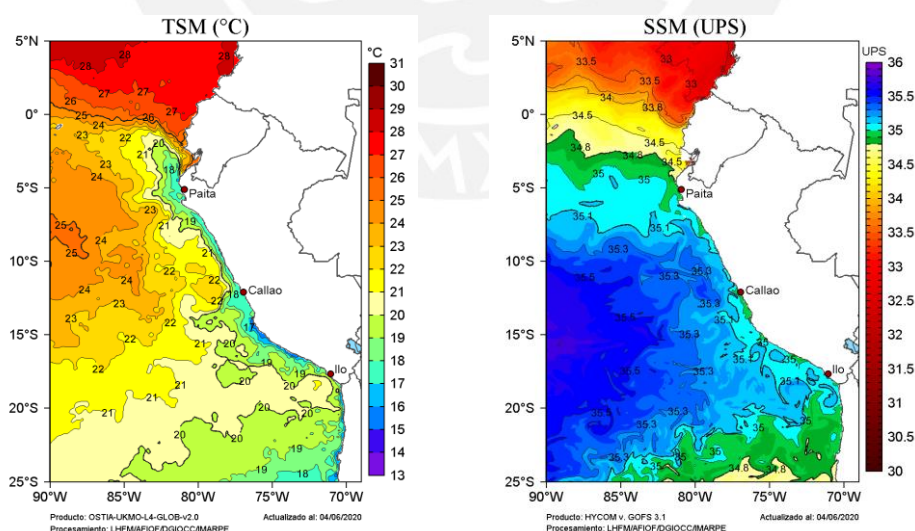


Figura 2-2: (a) Variación de la temperatura y (b) el contenido de salinidad del mar peruano al 04/06/20

Fuente: IMARPE (2020)

Como se aprecia, las temperaturas más bajas se presentan en la zona de Ica y Pisco, con valores que oscilan entre 13°C y 17°C, mientras que el contenido de salinidad del mar peruano converge entre los 33 y 35 UPS. Mientras más frío sea el mar, mayor serán las concentraciones de sulfatos y cloruros en el agua marina.

## **2.4.2. ZONAS DE EXPOSICIÓN**

### **A. Zona de atmósfera marina**

Es la zona que no tiene contacto alguno con el agua de mar y se posiciona sobre las demás zonas de exposición. Recibe el aerosol marino, es decir, la combinación del contenido de cloruros y la brisa marina proveniente de las masas de agua próximas al sitio de estudio. A medida que la distancia entre el mismo y la costa aumenta, el contenido de cloruros disminuye y, por lo tanto, el potencial de corrosión. Este factor también es muy dependiente de la potencia de los vientos en la zona. Si, por otro lado, el ambiente es muy frío, las estructuras sufrirán por las heladas o bajas temperaturas, en adición al ataque por cloruros.

### **B. Zona de salpicaduras**

Esta es la región, desde una vista en elevación, que se ubica sobre la zona de marea alta y usualmente está sujeta a la erosión marina mediante la salpicadura, por lo cual existe un importante cambio constante en el contenido de humedad. Además del ataque por cloruros, esta zona sufre la erosión por salpicadura, deteriorando físicamente el concreto. Esta área es la más afectada por los cloruros debido a que sus poros están expuestos e insaturados, por lo que la superficie es permeable. También influye el hecho del empuje del viento, el cual facilita la penetración de los cloruros en el concreto hasta la profundidad donde se ubican las armaduras (5cm o más). Una vez ubicados en esta interfaz, empiezan a producirse las reacciones químicas mencionadas en los incisos anteriores y se produce la des pasivación y oxidación del acero de refuerzo, lo que se conoce popularmente como la corrosión.

### **C. Zona de mareas**

Es en la cual se produce el mayor ataque del ambiente marino hacia las estructuras de concreto armado pues su contenido de humedad cambia drásticamente en magnitud y en intervalos de tiempo muy reducidos. Cuando empieza la etapa de mareas altas, esta zona queda totalmente sumergida y recibe el constante impacto de las olas. En esta etapa, los poros empiezan a saturar y los cloruros que se encuentran en la superficie son transportados por la acción de las olas cada vez más al interior de la estructura. Al bajar la marea, el cambio de temperatura y humedad es brusco y contribuye al desarrollo de componentes que atacan el concreto. Esta es la zona donde se presenta el deterioro por sulfatación debido al continuo contacto con el agua marina.

## D. Zona sumergida

Se refiere a la zona debajo del nivel de marea baja, es decir, que siempre se mantiene en contacto con el mar. Esta región posee poros totalmente saturados de agua y bajo contenido de oxígeno, por lo mismo que, en cierta manera, está protegida frente al paso de componentes corrosivos para el concreto, pues es una capa cuasi impermeable. En contraparte, la posibilidad de ataques por sulfatos que expanden el concreto es mayor, más controlable mediante el empleo de cementos con bajo contenido de aluminato tricálcico.

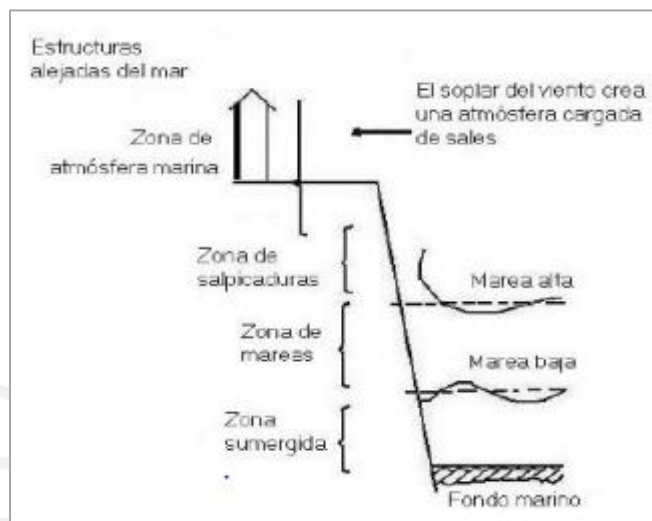


Figura 2-3: Zonas de exposición

Fuente: Guía técnica: Hormigón en ambiente marino, IECA (2013)

## 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. PROCEDIMIENTOS

Una manera efectiva para diagnosticar el deterioro del concreto de una estructura expuesta a un medio marino, consiste en la ejecución de dos procesos: el primero, de tipo visual, basado en la recolección de datos específicos sobre las anomalías identificadas en la edificación escogida para la investigación y la segunda, de tipo práctico, basado en la aplicación de ensayos (destructivos y no destructivos) con la finalidad de medir el tamaño de los deterioros identificados en el primer proceso.

#### 3.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS EDIFICACIONES

Se recolectará las características de la edificación (ubicación, sistema estructural, calidad del concreto, etc.) y las condiciones ambientales en las que se encuentra (humedad, temperatura,

precipitación, etc.). En el entorno peruano es común tener especificaciones técnicas según se muestra en la Figura 3-3, esto nos servirá de base para analizar el colegio escogido.

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>   |  |
|--|--|
| <b>TERRENO:</b>  |  |
| CAPACIDAD PORTANTE $R_t = 1.50 \text{ kg/cm}^2$  |  |
| <b>ACERO:</b>  |  |
| EN GENERAL $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  |  |
| <b>CONCRETO :</b>  |  |
| SOBRECIMIENTO ARMADO: $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$  |  |
| VIGAS DE CIMENTACIÓN : $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$   |  |
| COLUMNAS Y VIGAS : $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$   |  |
| ZAPATAS Y PLACAS : $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$   |  |
| <b>ALBAÑILERIA</b>   |  |
| $f'_b = \dots\dots\dots 130 \text{ Kg/cm}^2$   |  |
| $f'_m = \dots\dots\dots 45 \text{ Kg/cm}^2$  |  |
| <b>SOBRE CARGAS :</b>  |  |
| ter. al 5 Piso.....  | 400 Kg/m <sup>2</sup> Pasadizo: 400 Kg/cm <sup>2</sup> |
| Azotea Piso (Ultimo): 100Kg/m <sup>2</sup>   |  |
| <b>RECUBRIMIENTO:</b>  |  |
| COLUMNAS   | : 4.00 cm.-40MM  |
| COLUMNAS CONF.   | : 2.50 cm.-25MM  |
| VIGAS PERALTADAS:  | 4.00 cm.-40MM  |
| VIGAS CONF.  | : 2.50 cm.-25MM  |
| LOSAS  | : 2.50 cm.-25MM  |
| ZAPATAS  | : 7.00 cm.-70MM  |
| <b>NOTA:</b>   |  |
| -LOS MUROS INDICADOS EN LOS PLANOS SERAN DE LADRILLO K.K-18H.  |  |
| -SE RECOMIENDA TENER CUIDADO DE CONTROLAR EN LO POSIBLE CUALQUIER INFILTRACION DE AGUA QUE ALTERE EL EQUILIBRIO POTENCIAL DEL SUELO. |  |
| -LAS COLUMNAS DE AMARRE SE LLENARAN DESPUES DE HABER LEVANTADO LOS MUROS DE LADRILLO A SU ALTURA FINAL.                              |  |
| -LO NO ESPECIFICADO SE EJECUTARA DE ACUERDO AL RGTO. NACIONAL DE EDIFICACIONES NORMA E-060-CONCRETO ARMADO                           |  |

Figura 3-1: Ejemplo de especificaciones técnicas estructurales para una institución educativa en el Perú

Fuente: Propia

Además de estas especificaciones técnicas, los proyectistas elaboran un documento en el que se incluye los materiales, transportes, procesos constructivos, normas, ensayos y exigencias (curado, encofrado, juntas, resistencia, aditivos, entre otras).

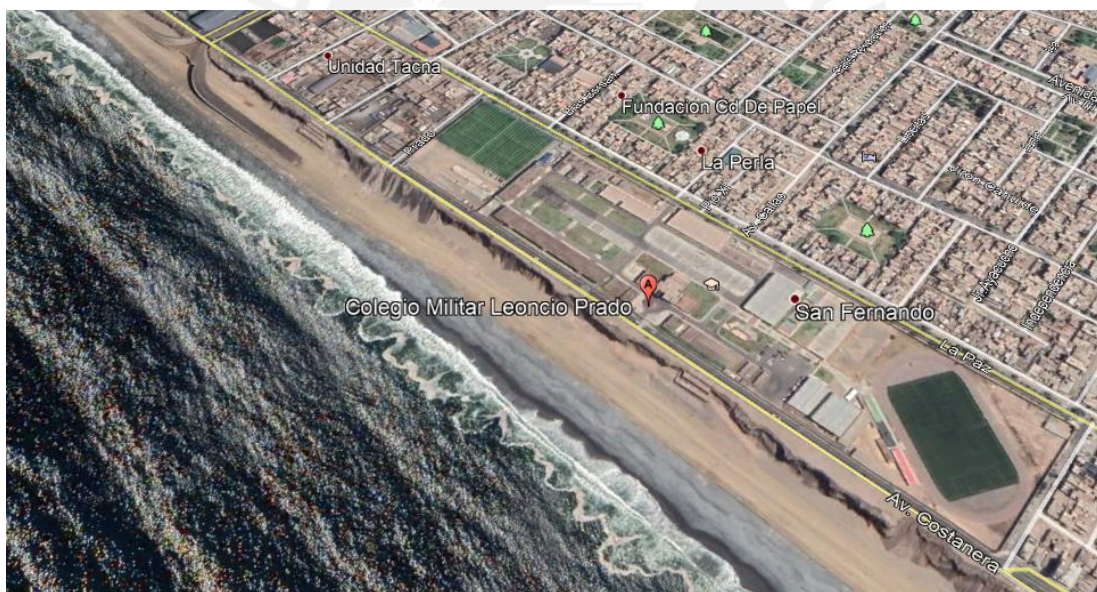
### **COLEGIO MILITAR LEONCIO PRADO**

Para el presente estudio se eligió el caso del Colegio Leoncio Prado, debido a su antigüedad y a su ubicación en un entorno marino, para generar las especificaciones técnicas requeridas. Las características principales se presentan en la Tabla 3-1.

**Tabla 3-1: Características del Colegio Leoncio Prado**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Ubicación                   | Avenida Costanera 1541 - Distrito de La Perla - Callao - Perú   |
| Año de construcción         | 1943  |
| Área aproximada             | 0.12 Km <sup>2</sup>  |
| Estilo Arquitectónico       | Art-Deco  |
| Suelo                       | Composición de rocas intrusivas y volcánicas en un 97%<br>Composición de arenisca, cuarcita y caliza en un 3%   |
| Sistema Estructural         | Muros portantes de albañilería con o sin columnas y coberturas de concreto armado, de madera ocalamina, que transmiten sus cargas al terreno de fundación, mediante una cimentación combinada |
| Cimentación                 | Zapatatas y cimientos corridos  |
| Acabados                    | Madera y cerámica   |
| Distancia aproximada al mar | 200 m   |

Fuente: Propia

**Figura 3-2: Ubicación del Colegio Leoncio Prado**

Fuente: Google Earth





**Figura 3-3: Fachada del Colegio Leoncio Prado**

Fuente: <http://www.limalaunica.pe/2011/02/el-colegio-militar-leoncio-prado.html>

**Tabla 3-1: Ejemplo del resumen de las condiciones ambientales de un medio marino**

Los datos meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación y velocidad el viento) de la zona de estudio se muestran en las Tabla 3-2 y 3-3. La estación más cercana a la ubicación del proyecto se encuentra en Jesús María (Longitud: 77°2'35.51" y Latitud: 12°4'14.04").

**Tabla 3-2: Registro meteorológico para el mes de junio 2020 en la estación Jesús María, Lima**

| Día/mes/año | Temperatura (°C) |       |       | Humedad (%) | Lluvia (mm) | Presión (mb) | Velocidad del viento (m/s) | Dirección del viento |
|-------------|------------------|-------|-------|-------------|-------------|--------------|----------------------------|----------------------|
|             | Prom             | Max   | Min   |             |             |              |                            |                      |
| 1/6/2020    | 18.04            | 20.70 | 17.20 | 86.92       | 0           | -999         | 1.76                       | 209                  |
| 2/6/2020    | 17.57            | 19.80 | 16.50 | 88.67       | 0           | -999         | 1.36                       | 189                  |
| 3/6/2020    | 17.18            | 18.00 | 16.70 | 90.88       | 0           | -999         | 1.65                       | 208                  |
| 4/6/2020    | 17.35            | 19.40 | 16.30 | 86.83       | 0           | -999         | 1.81                       | 207                  |
| 5/6/2020    | 17.41            | 20.00 | 16.50 | 84.17       | 0           | -999         | 1.74                       | 203                  |
| 6/6/2020    | 17.25            | 19.10 | 16.10 | 85.13       | 0           | -999         | 1.77                       | 196                  |
| 7/6/2020    | 17.30            | 18.70 | 16.70 | 85.92       | 0           | -999         | 2.18                       | 224                  |
| 8/6/2020    | 17.34            | 19.40 | 16.30 | 84.13       | 0           | -999         | 2.18                       | 200                  |
| 9/6/2020    | 17.44            | 19.10 | 16.40 | 83.38       | 0           | -999         | 1.41                       | 279                  |
| 10/6/2020   | 18.17            | 19.80 | 16.80 | 78.17       | 0           | -999         | 1.72                       | 199                  |
| 11/6/2020   | 18.16            | 20.40 | 17.10 | 78.29       | 0           | -999         | 2.46                       | 224                  |
| 12/6/2020   | 17.25            | 18.50 | 16.50 | 84.08       | 0           | -999         | 2.78                       | 209                  |
| 13/06/2020  | 17.03            | 18.20 | 16.30 | 85.38       | 0           | -999         | 1.94                       | 192                  |
| 14/06/2020  | 17.08            | 18.90 | 15.80 | 84.58       | 0           | -999         | 1.98                       | 212                  |
| 15/06/2020  | 17.29            | 18.60 | 16.50 | 81.54       | 0           | -999         | 2.10                       | 216                  |
| 16/06/2020  | 17.74            | 20.80 | 16.50 | 78.67       | 0           | -999         | 2.53                       | 222                  |
| 17/06/2020  | 17.02            | 18.10 | 16.10 | 83.63       | 0           | -999         | 2.33                       | 205                  |

|            |       |       |       |       |   |      |      |     |
|------------|-------|-------|-------|-------|---|------|------|-----|
| 18/06/2020 | 17.21 | 18.70 | 16.00 | 81.88 | 0 | -999 | 1.54 | 190 |
| 19/06/2020 | 17.29 | 19.20 | 16.50 | 84.00 | 0 | -999 | 2.19 | 210 |
| 20/06/2020 | 16.51 | 19.20 | 15.20 | 87.96 | 0 | -999 | 1.83 | 208 |
| 21/06/2020 | 16.37 | 19.00 | 15.00 | 86.58 | 0 | -999 | 1.93 | 211 |
| 22/06/2020 | 16.41 | 18.90 | 15.20 | 85.50 | 0 | -999 | 1.59 | 219 |
| 23/06/2020 | 16.32 | 18.80 | 15.20 | 86.88 | 0 | -999 | 1.76 | 198 |
| 24/06/2020 | 16.10 | 17.70 | 15.10 | 88.50 | 0 | -999 | 1.43 | 214 |
| 25/06/2020 | 15.91 | 16.70 | 15.00 | 88.96 | 0 | -999 | 1.56 | 202 |
| 26/06/2020 | 16.22 | 18.40 | 14.80 | 86.21 | 0 | -999 | 1.85 | 200 |
| 27/06/2020 | 16.21 | 18.50 | 14.60 | 85.04 | 0 | -999 | 2.53 | 208 |
| 28/06/2020 | 16.05 | 19.80 | 14.60 | 85.88 | 0 | -999 | 2.08 | 191 |
| 29/06/2020 | 15.94 | 17.60 | 15.00 | 84.67 | 0 | -999 | 2.46 | 210 |
| 30/06/2020 | 15.84 | 17.40 | 15.20 | 83.79 | 0 | -999 | 1.67 | 198 |

Fuente: SENAMHI - Dirección de Redes de Observación y Datos (2020)

**Tabla 3-3: Promedio de datos meteorológicos**

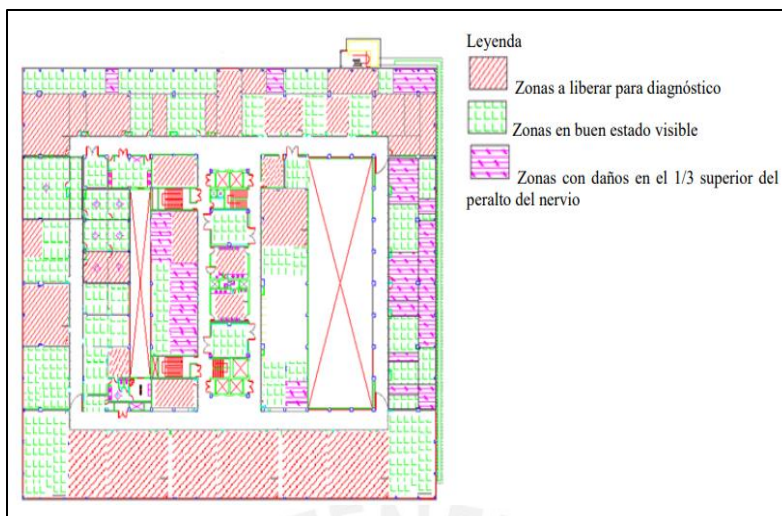
| Parámetros                 | Promedio mensual |
|----------------------------|------------------|
| Temperatura (°C)           | 16.97            |
| Humedad (%)                | 84.87            |
| Lluvia (mm)                | 0.00             |
| Velocidad del viento (m/s) | 1.94             |

Fuente: SENAMHI

De los datos meteorológicos obtenidos, se interpreta que, debido a la alta humedad y velocidad del viento de la zona, los daños ocasionados por sustancias marinas, pueden ser significativos, esta primera conclusión deberá ser contrastada con la ejecución de los ensayos descritos en líneas posteriores.

### 3.1.2. ANÁLISIS VISUAL

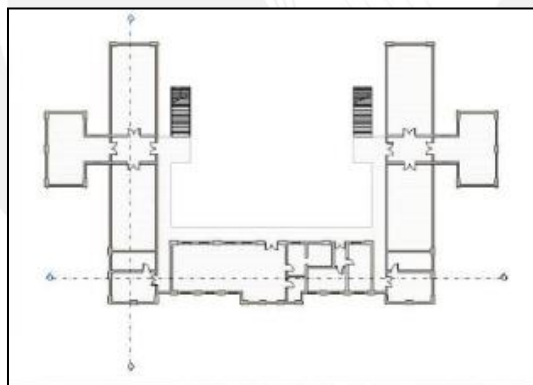
Se continuará con el recorrido por las zonas exteriores e interiores del colegio a fin de observar los posibles deterioros y daños en la estructura de concreto. En el caso de ataque de sulfatos, se identificarán posibles fisuras o expansiones volumétricas en el hormigón. Por su parte, la corrosión del refuerzo se determinará por la presencia de grietas y manchas de óxido marrón reflejado en el exterior del concreto. Estos serán registrados mediante fotografías y notas en que se incluya la localización del problema. Se deberá diferenciar el estado de la edificación por zonas, según se muestra en la Figura 3-6.



**Figura 3-4: Clasificación de las áreas según la inspección visual de la estructura**

Fuente: Influencia del micro-ambiente en el interior de una edificación sobre la corrosión del acero de refuerzo (A. Hernández-Oroza & D. Guerra-Bouza, 2015)

Para el caso del Colegio Leoncio Prado se recolectará los planos de planta y elevación (Figura 3-5, 3-6 y 3-7) de las principales estructuras y se deberá realizar una clasificación de su estado, en base a un análisis efectuado en campo.



**Figura 3-5: Plano de planta del Colegio Leoncio Prado**

Fuente: [https://issuu.com/arquitecturaperuana/docs/colegio\\_militar\\_leoncio\\_prado](https://issuu.com/arquitecturaperuana/docs/colegio_militar_leoncio_prado)



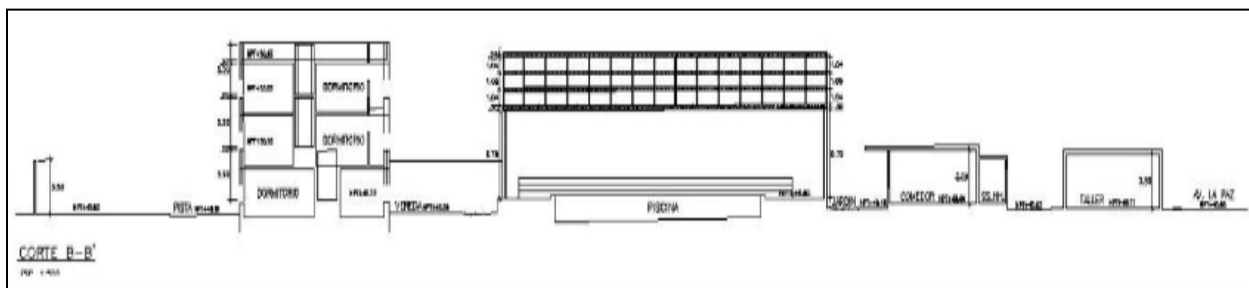


Figura 3-6: Cortes y elevación del Colegio Leoncio Prado

Fuente: [https://issuu.com/arquitecturaperuana/docs/colegio\\_militar\\_leoncio\\_prado](https://issuu.com/arquitecturaperuana/docs/colegio_militar_leoncio_prado)



Figura 3-7: Distribución de áreas del Colegio Leoncio Prado

Fuente: [https://issuu.com/arquitecturaperuana/docs/colegio\\_militar\\_leoncio\\_prado](https://issuu.com/arquitecturaperuana/docs/colegio_militar_leoncio_prado)

Es evidente el deterioro de algunos pabellones del colegio escogido, tal como se muestra en la Figura 3-11, lo cual nos da un primer diagnóstico de los perjuicios que generan los entornos marinos a estructuras que no han recibido un adecuado mantenimiento.



**Figura 3-8: Estado de deterioro de un pabellón del Colegio Leoncio Prado**

Fuente: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com/2011/01/renovacion-del-colegio-militar-leoncio.html>

### **3.1.3. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS**

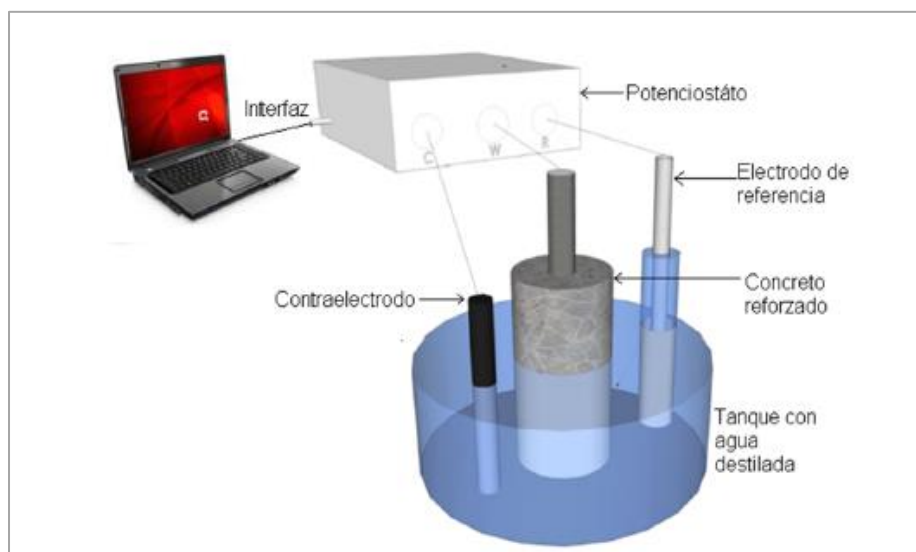
Debido a que el concreto armado es una composición visualmente homogénea, se puede generar la errónea sensación de ser un material inalterable por gases, líquidos o químicos. Sin embargo, la experiencia nos ha demostrado lo contrario, pues ante ambientes agresivos se pueden generar grietas o daños de diversa magnitud que ponen en riesgo la vida de las estructuras y de las personas que las ocupan. Es por ello que, en busca de medir la magnitud del deterioro, se han propuesto diversos tipos de ensayos que, en su mayoría, tienen como finalidad estimar la corrosión en el acero de refuerzo, algunos de los cuales se basan en analizar muestras expuestas a diversos estados de temperatura, humedad y contenido de sales. No obstante, estos experimentos requieren periodos largos de estudio, y en muchos casos es necesario la intervención destructiva de las estructuras, lo cual puede no ser el mejor método de evaluación. En tal sentido, a lo largo de los años, se han presentado alternativas no destructivas por medio de inspecciones electroquímicas o microscópicas para evaluar el estado de deterioro de las estructuras sometidas a atmósferas atípicas. Sin embargo, debido a que estas técnicas utilizan equipos no convencionales (voltímetros, pistolas, etc.), los costos de alquiler y mano de obra calificada, pueden ser elevados y, a su vez, la difusión aún es reducida en el medio local. Las técnicas más importantes se describen a continuación:

#### **3.1.3.1. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS**

Las técnicas electroquímicas han aparecido como una alternativa, no destructiva y sencilla de aplicar, para medir el estado de corrosión en el acero de refuerzo de las estructuras de concreto armado. Las técnicas mayormente utilizadas son: resistencia a la polarización (LPR), potencial de

corrosión o reposo (Ecorr), pulso galvanostático (GPT), voltametría cíclica y espectroscopia de impedancia química (EIS). Todos estos procedimientos proveen data importante respecto a la situación del mecanismo acero de refuerzo – concreto, y con ello se puede estimar el nivel de corrosión que se presenta en el sistema. Sin embargo, es preciso señalar, que todas las técnicas mencionadas deben ser complementadas con observaciones y análisis visuales del daño químico (manchas) y físico (grietas o rajaduras).

Los ensayos anteriormente señalados pueden ejecutarse de dos maneras, y teniendo en cuenta que, para ambas, la interfase estará polarizada. La diferencia principal, consiste en la lectura de respuesta, y está será de potencial, si se aplica señales de corriente, o de corriente, si se aplica señales de potencial.



**Figura 3-9: Mecanismo para la ejecución de ensayos electroquímicos**

Fuente: Evaluación de la corrosión del acero embebido en concreto, expuesto a carbonatación (W. Aperador, M. Gordillo, J. Bautista, 2013)

### **A) RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN (LPR)**

Por su facilidad de aplicación y manejo, la técnica electroquímica que corresponde a la resistencia a la polarización cíclica, es la más sencilla de ejecutar y está consiste en conectar dos terminales, de un voltámetro de elevada impedancia interna. La primera se coloca en el acero de refuerzo y la segunda en un electrodo de referencia y se indican sobrepotenciales en el rango de 10 a 20 mV, de tal manera que, la lectura del sistema sea el potencial medio de corrosión. Si bien esta técnica no provee información numérica de la velocidad de corrosión, nos muestra indicativos de ella, los cuales deben complementarse con otros ensayos.

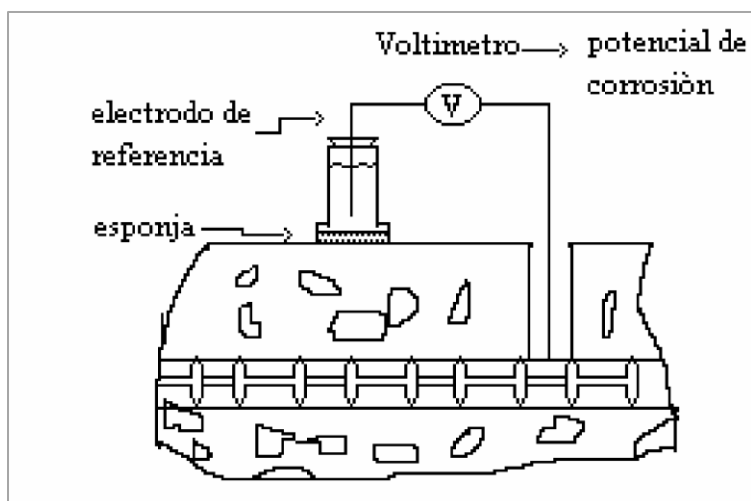


Figura 3-10: Medición de la resistencia a la polarización

Fuente: El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado – (Angélica V., Tezozómoc P., Miguel M., 2001)

## B) POTENCIAL DE CORROSIÓN O REPOSO ( $E_{corr}$ )

La condición en la cual se emparejan las velocidades de oxidación (anódica) y reacción (catódica), se denomina potencial de corrosión y está puede presentarse según se muestra en el diagrama de Evans (Figura 3-11). De la intersección mostrada en la gráfica (Potencial vs. Log de corriente), se extrae el potencial de reposo ( $E_{corr}$ ) y la corriente de intercambio ( $i_{corr}$ ), indicadores que sirven para interpretar la estabilidad de los objetos estudiados. Sin embargo, debido a su limitación para poder medir el cambio del nivel de corrosión en las inmediaciones del punto analizado, es necesario interpretar los valores mencionados con reserva. Por lo expuesto, es importante complementar este ensayo con estudios de la profundidad de carbonatación y concentración de cloruros.

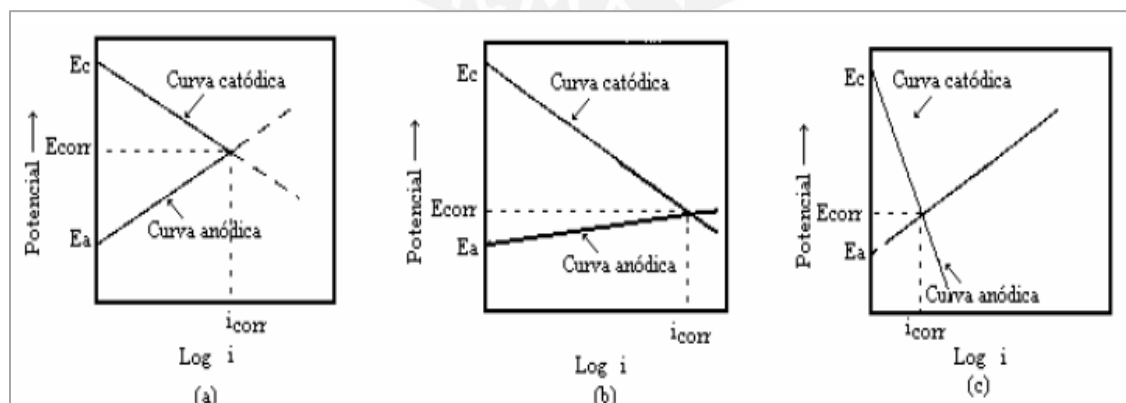


Figura 3-11: Diagrama de Evans

Un estudio realizado en puentes (R. Stratful, 1993, Estados Unidos), permitió determinar las relaciones que existe entre el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y la condición de corrosión (ESC), y asignarle una probabilidad de corrosión (Tabla 3-4) y en consecuencia determinar la condición en la que se encuentra las varillas de acero (Tabla 3-5).

**Tabla 3-4: Probabilidades de corrosión de acuerdo a la relación  $E_{corr}$  vs ESC según el criterio de R. Stratful**

| <b>Ecor (mV) vs ESC</b> | <b>Probabilidad de corrosión</b> |
|-------------------------|----------------------------------|
| -240                    | 0%                               |
| -275                    | 5%                               |
| -350                    | 50%                              |
| -450                    | 95%                              |
| -500                    | 100%                             |

**Tabla 3-5: Condición del acero de refuerzo de acuerdo a la relación  $E_{corr}$  vs ESC según el criterio de R. Stratful**

| <b>Ecor (mV) vs ESC</b> | <b>Condición</b> |
|-------------------------|------------------|
| <-270                   | activa           |
| >-220                   | pasiva           |
| -220 a -270             | activa o pasiva  |

### **C) PULSO GALVANOSTÁTICO (GPT)**

Una técnica efectiva y de creciente alcance, para experimentos en laboratorio y campo, es la denominada pulso galvanostático, la cual consiste en inducir un potencial y diagnosticar su respuesta en un sistema equivalente de circuito tipo Randles (Figura 2-7). Esta respuesta se mide en tres partes: la resistencia óhmica ( $R\Omega$ ), calculado en un intervalo de tiempo minúsculo, que se relaciona con los efectos de corrosión; el capacitador del proceso de carga (CPE1), que nos puede mostrar el tipo de reacciones que generan la corrosión y la resistencia a la polarización ( $R1$ ), que nos muestra cuánta oposición despide, el mecanismo acero-concreto, al ingreso de los iones.

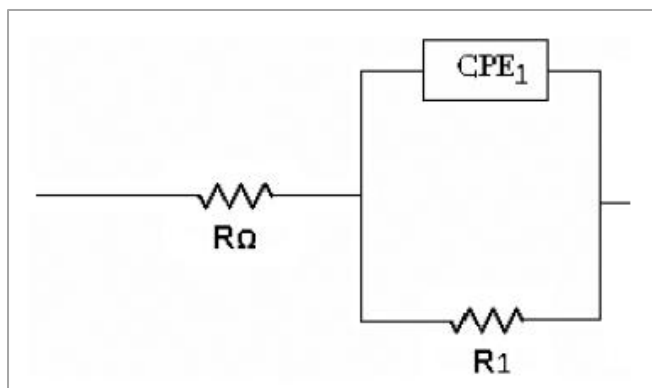


Figura 3-12: Circuito equivalente tipo Randles

Fuente: Evaluación de la corrosión del acero embebido en concreto, expuesto a carbonatación  
(W. Aperador, M. Gordillo, J. Bautista, 2013)

#### D) EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

La extrapolación de Tafel es una técnica de resistencia a la polarización de alto grado, con valores de sobrepotencial que están en el intervalo de 250 a 300 mV en los sentidos catódicos y anódicos. Esta técnica no es recomendable para sistemas que se encuentran en estado pasivo debido a que se mantiene o disminuye el valor de la corriente de salida conforme se incrementa el potencial, dificultando la extrapolación que el ensayo plantea.

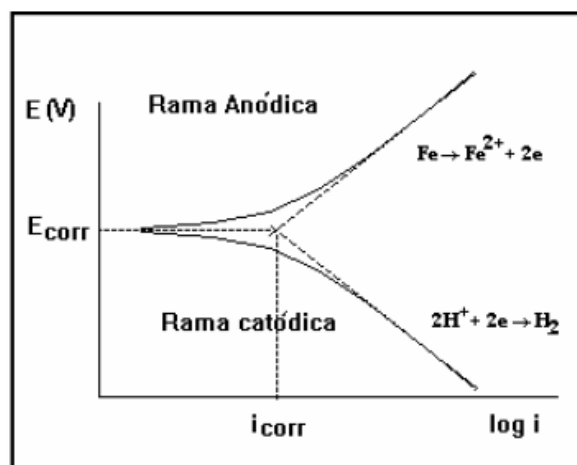


Figura 3-13: Curva de extrapolación de Tafel

#### 3.1.3.2. TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS

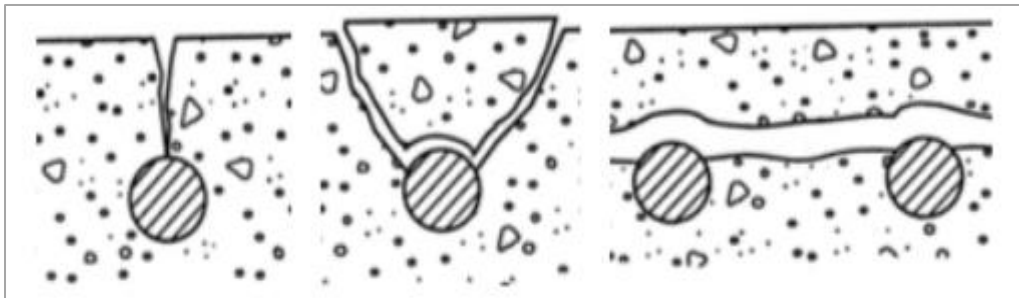
Las técnicas electromagnéticas son eficaces para detectar la corrosión del concreto, ya que muestran una alta sensibilidad frente a la presencia de agua y cloruros en el concreto. Estas técnicas son usadas para monitorear continuamente el estado de los elementos estructurales, con el fin de



identificar problemas de corrosión y realizar acciones correctivas, así como para el control de calidad en la etapa de construcción. Dos propiedades electromagnéticas importantes son la resistividad eléctrica y la permitividad dieléctrica relativa. Por un lado, el valor de la resistividad eléctrica depende de factores como la porosidad del elemento, contenido de humedad, la saturación y contenido de cloruros, variables asociadas al riesgo de corrosión. En donde a mayores valores de resistividad implican valores menores de saturación de cloruros. Por ejemplo, la resistividad eléctrica del agua potable y el agua de mar son aproximadamente 20 ohm.m y 0.2 ohm.m. Por otro lado, la permitividad dieléctrica relativa es otro indicador de la presencia de corrosión. La constante dieléctrica de los componentes sólidos del concreto varía aproximadamente de 3 a 8, mientras que para el agua tiene un valor de 81, lo que indica la presencia de agentes corrosivos para valores altos de esta constante (Du Plooy et al., 2013).

Existen 3 técnicas electromagnéticas que se realizan in situ, las cuales son: Tomografía de resistividad eléctrica (ERT), capacitimetría y el radar de penetración de tierra (GPR). En donde los valores a observar son la resistividad de corriente continua, la constante dieléctrica a bajas y altas frecuencias.

- El ensayo ERT muestra la imagen 2D del elemento (perfiles de resistividad), a partir de resistividades de cada partícula conformante por medio de la utilización de electrodos puntuales a ciertas distancias. Esto detecta la presencia de humedad y cloruros en el interior del elemento. Para este ensayo se utiliza sondas de resistividad multielectrodo conectado a un ordenador o multicanal medidor de resistividad.
- El ensayo de capacitimetría mide indirectamente la constante dieléctrica mediante la medición del desplazamiento de frecuencias de resonancia de corriente oscilante entre el elemento y el aire. Este parámetro es muy sensible frente a la presencia de agua y cloruros en el concreto y la presencia anómalos de esta, se obtiene a partir de parámetros calibrados. Este ensayo utiliza capacitómetros con electrodos de placas de diversos tamaños.
- El ensayo radar de penetración de tierra (GPR) utiliza ondas electromagnéticas para determinar las características de una superficie mediante la transmisión y la recepción de los pulsos electromagnéticos. Este ensayo también mide la constante dieléctrica, la cual también muestra alta sensibilidad a la presencia de cloruros y humedad. Este ensayo utiliza radares que emiten y reciben ondas electromagnéticas. La lectura de los pulsos permite caracterizar tres tipos de deterioro (Figura 2-9) según la velocidad de transmisión de la señal del radar.



**Figura 3-14: Tipos de deterioro por corrosión en el concreto (a) Grietas, (b) Despostillado y (c) Fractura en capas**

Fuente: Laboratory validation of corrosion-induced delamination in concrete by ground penetrating radar (T. W. P. Wong, C. S. Poon and W. L. W. Lai, 2018)

Es importante mencionar que la relación de estos ensayos se realiza en ambientes controlados. Por ello, para la realización de estos ensayos se deben tener en cuenta parámetros como la temperatura y humedad, que podrían alterar estos valores y mostrar resultados erróneos.

### **3.1.3.3. TERMOGRAFÍA INFRARROJA (TIR)**

Todos los cuerpos son capaces de transferir calor a partir de un proceso de radiación. Este proceso involucra la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas sin la necesidad de estar en contacto. Es por ello que, estructuras sometidas a radiación térmica en forma de ondas electromagnéticas generan movimiento térmico de átomos pertenecientes al elemento, que se interpreta como pérdida de energía interna de la materia. Esta pérdida de energía se compensa por el mismo elemento en forma de radiación por parte del elemento, la cual se puede detectar sin contacto a través de una cámara termográfica o de detección infrarroja. La razón por la cual se usa este ensayo en estructuras de concreto armado se basa en el hecho de que, los vacíos, defectos o anomalías interrumpen la transferencia de calor en el interior de los concreto, generando así áreas que se calientan rápidamente y que pueden ser detectadas por las cámaras anteriormente mencionadas. Por lo tanto, la termografía infrarroja (TIR) indica la presencia anomalías en el concreto; sin embargo, no indica con claridad de qué anomalía se trata, esto a partir de la medición de las diferencias de temperatura en el espectro infrarrojo, por lo que debe utilizarse como un método complementario una vez determinada la causa patológica. (Guerrero, 2013).

La United Kingdom Thermography Association, en su código Thermography Code of Practice, hace mención que, el procedimiento para la aplicación de este ensayo es el siguiente:

- Identificación y clasificación del problema.
- Elección de ensayo TIR adecuado.
- Planificación de fecha según condición climática adecuada.
- Verificar equipo y plan de seguridad y salud adecuado.



- Realización de estos ensayos y análisis de resultados.

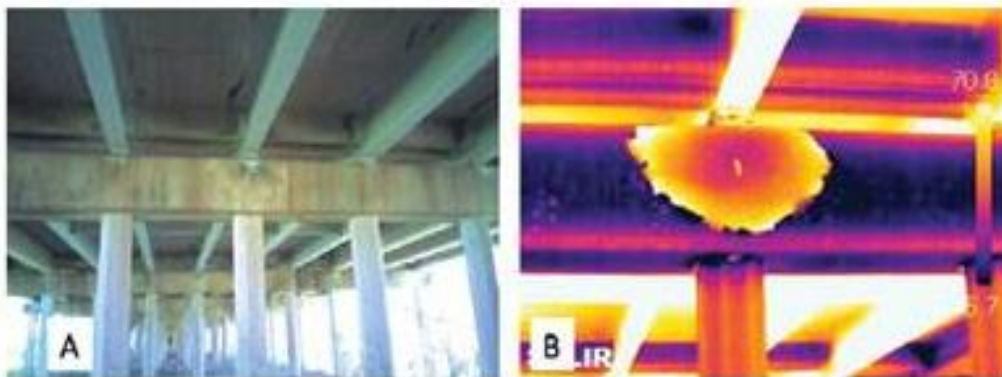
Se debe mencionar que, para este ensayo se requiere variaciones de temperatura, por lo que es importante tener flujo de calor en el elemento a analizar: En ese sentido, solo es recomendable utilizar este método para elementos externos o expuestos al sol. Para el caso de elementos internos se generará un flujo de calor artificial.

Los ensayos TIR se dividen en dos tipos: Pasiva y activa. Por un lado, los ensayos TIR pasiva no necesitan de calentamiento externo para provocar en algún elemento flujo de calor. Es este método se toma de referencia un punto, en donde los puntos con perfiles anormales de temperatura indicarán las anomalías. Por otro lado, los ensayos TIR activa requieren una fuente externa para provocar flujo de calor y, en consecuencia, diferencias de temperatura. En este método se captan anomalías superficiales y subsuperficiales. Existen 4 tipos de TIR activa, los cuales son los siguientes:

- **Termografía pulsada:** Método fácil y rápido que consiste en generar pulsos de calor intensos en intervalos cortos de tiempo, sobre el elemento a estudiar para evaluar la variación de temperatura. No es recomendable exponer a altas temperaturas ya que podría dañar el elemento.
- **Termografía modulada:** Consiste en someter al elemento a calentamiento sinusoidal que genera ondas térmicas, que implican variaciones de temperatura. Para este ensayo es importante el uso de una computadora para generar dichas vibraciones programadas.
- **Termografía de largo pulso:** Consiste en someter al elemento a calentamiento lento y continuo de baja intensidad. En este método la diferencia de temperatura se da en la etapa de calentamiento y no en el enfriamiento como los anteriores.
- **Vibrotermografía:** Consiste en someter al elemento a pequeñas vibraciones mecánicas por agentes externos, es decir, conversión de energía mecánica a térmica por medio de la fricción.

Es importante mencionar que este tipo de ensayos puede arrojar registros erróneos debido a diversos factores, tales como variaciones de emisividad, reflexión por la curvatura de superficie, ángulo o campo de visión, fallas del equipo, interferencias ambientales como viento, humedad y ruido, siendo este uno de los más importantes ya que afecta la resolución de la medición (Guerrero, 2013).

Las normativas internacionales que hablan respecto a esta metodología son: ISO 6781:1983, ASTM C1060 - 11a, ASTM D4788-03, ASTM C1153-10 y ASTM C1046-95.

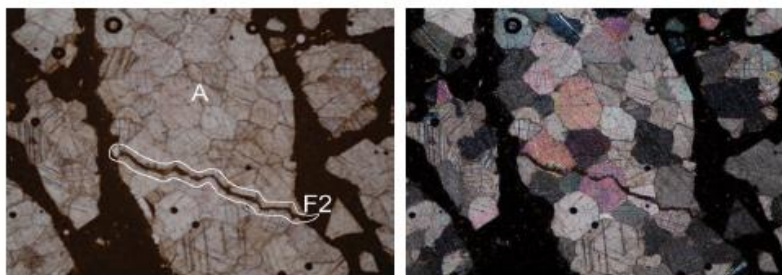


**Figura 3-15: Aplicación de termografía infraroja en puentes**

Fuente: Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges (Rocha & Póvoas 2017)

### 3.1.3.4. MICROSCOPIA ÓPTICA

La petrografía o microscopía óptica en concreto es una técnica que consiste en la extracción de núcleos de una estructura para ser examinado en un laboratorio. En St John et al., 2012 se expone que utilizar la petrografía permite obtener distintas características del concreto. Estas serán generales, tales como la proporción volumétrica del agregado grueso, fino, pasta de cemento y vacíos de aire; graduaciones del agregado; naturaleza, tipo y proporción de vacíos de aire; etc., o específicas como evidencias del ataque de sulfatos; tipos de ataques químicos; corrosión del acero de refuerzo y sus severidades; etc. Para la medición de dichas características se emplean diversas técnicas. En el caso de sulfatos en el concreto, identificado como un daño por agresión ambiental, se deberá utilizar principalmente la microscopía en láminas delgadas; en ocasiones, deberá ser complementada con técnicas como la difracción de rayos X, espectroscopia infrarroja y microanálisis con sonda electrónica. Por otro lado, la corrosión del acero de refuerzo se puede identificar empleando la microscopía en láminas delgadas.



**Figura 3-16: Evaluación del concreto mediante microscopía óptica**

Fuente: Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica (B. Henao, Tobón, M Valencia, Palacio, & Betancur M., 2016)

### **3.1.4. ENSAYOS DESTRUCTIVOS**

Son ensayos a seguir para evaluar la calidad y las propiedades mecánicas del concreto y el acero de refuerzo de una estructura (American Concrete Institute [ACI], 2019), normalmente son empleados después de la realización de los ensayos no destructivos, con el fin de corroborar los resultados obtenidos de estos. Según el ACI, estos ensayos pueden ser aplicados a estructuras que evidencian deterioros tales como corrosión del acero y descascarado del concreto.

#### **A) EXTRACCIÓN Y ROTURA DE PROBETAS**

Consiste en la extracción de probetas de un núcleo estructural utilizando un taladro con brocas diamantadas y tachuelas refrigeradas con agua, para ser ensayadas por comprensión (ACI, 2019). Según Porto (2005), este sistema es el más seguro para determinar con fiabilidad la resistencia a compresión; sin embargo, es el más costoso y destructivo. Por tanto, para disminuir la cantidad de muestras, se recomienda su uso en conjunto con ensayos no destructivos como la petrografía (ACI, 2019).

#### **B) MICROPROBETAS**

Este método destructivo, similar al ensayo de probetas testigo, consta de la extracción con diamantina de cilindros de 20 a 30 milímetros de diámetro del elemento de las cuales se determinará la resistencia al someterlas a un ensayo a compresión. Este método de testeo es utilizado cuando, debido a las dimensiones geométricas del elemento, no se puede extraer probetas testigo regulares cuyos diámetros van de 50 a 150 milímetros (Porto, 2005).

#### **C) PISTOLA WINDSOR**

Método de investigación utilizado para determinar la resistencia a compresión del concreto in-situ de una manera relativamente rápida y no tan destructiva en comparación al anterior ensayo (Klotz, 1972). Consiste en una pistola de pólvora la cual dispara una sonda metálica a determinada energía para provocar penetración en el elemento de concreto armado. La sonda luego queda introducida en el elemento y se procede a medir la profundidad de la perforación, con la cual se determina la resistencia en base a tablas del proveedor. Este ensayo es utilizado para comprobar la homogeneidad de resistencia del elemento y también para verificar si existe un deterioro en la resistencia de la estructura en comparación a la de una probeta testigo (Porto, 2005).

#### **D) PROFUNDIDAD DE CARBONATACIÓN**

Es empleado para determinar la magnitud de la penetración del proceso de carbonatación en el concreto, el cual consiste en la mezcla de el CO<sub>2</sub> del ambiente con la portlandita, lo cual genera la pérdida de la capa de pasivación de acero y lo deja desprotegido frente a las acciones de la corrosión.

El ensayo consiste en perforar el recubrimiento del concreto hasta apreciar la armadura y se colocará una solución alcohólica de fenolftaleína al 1%. La solución mostrará, inmediatamente, si el concreto próximo al acero no ha sido carbonatado al presentar un color rosa/magenta. Por el contrario, si el concreto no presenta cambio en su tonalidad, el pH del mismo ha descendido debajo de 9 y ha surgido la carbonatación. Las porciones no serán uniformemente geométricas y se debe evitar la humedad en la muestra, entonces también es viable perforar el concreto con un taladro y evaluar esta muestra.

### **E) TOMA DE MUESTRAS DE ARMADURA**

Este ensayo se basa en la norma UNE 36300:80, el cual consta de la toma de muestras y preparación de probetas para el análisis químico del acero. La identificación de las barras en el elemento de concreto armado se realizará con el pachómetro, para luego descubrirlas y tomar un tramo de una barra de longitud mínima de 60 cm para el ensayo mecánico y una muestra mínima de 200 gr para el ensayo químico. La muestra bruta será sometida a chorreado de arena o algún otro método para limpiar la superficie de material ajeno. Las herramientas de toma de muestras deben estar limpias sin presencia de grasa o lubricante. Luego de esto, se debe reemplazar dicho tramo extraído por uno nuevo, ya sea por traslape o por soldadura. Es importante mencionar que en el reemplazo por traslape se debe considerar no solo la longitud faltante, sino una longitud de traslape de 50 cm en cada lado (Porto, 2005).

#### **3.1.5. PROTECCIÓN DEL CONCRETO SOMETIDO A MEDIOS MARINOS**

La corrosión en el acero de refuerzo puede representar pérdidas económicas y estructurales muy grandes, así como lo describe la Administración Federal de Carreteras en los Estados Unidos (FHWA), que descubrió que el promedio de gasto anual para reparación de estructuras, afectadas por dicho fenómeno, alcanzan los 8.29 billones de dólares. Es en ese sentido, que se presenta la necesidad de considerar, en la etapa de diseño, técnicas que ayuden a evitar o aminorar el deterioro que se genera producto del ataque de ambientes agresivos, y en consecuencia alargar el tiempo de vida de las estructuras. Las técnicas mayormente utilizadas son: acero inoxidable, protección catódica, recubrimiento externo e inhibidores de corrosión, sin embargo, es esta última, debido a su bajo costo y facilidad de aplicación, la que mayor rentabilidad, en términos de costo – efectividad, representa. Diversas clases de componentes de origen orgánico e inorgánico, son usadas como inhibidores o sanadores de corrosión, ya que estas previenen el inicio del fenómeno, evitan su propagación producto de elementos que ya han sido corroídos o curan las grietas, sin afectar las propiedades originales de las estructuras.

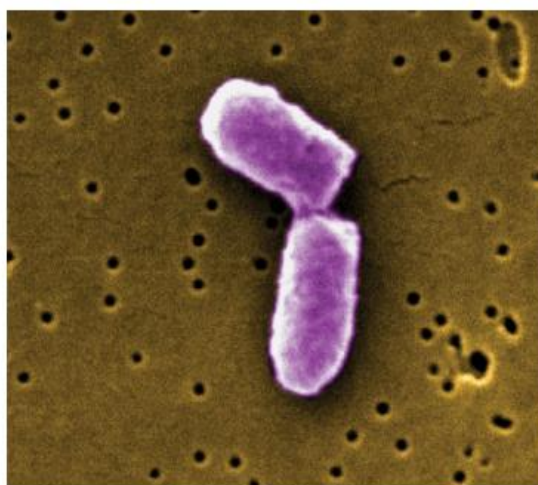
#### **A) AGENTES ORGÁNICOS**

Múltiples experimentos han demostrado que las grietas o daños que se producen en el concreto armado, pueden repararse mediante la aplicación de una solución compuesta de bacterias (Tabla 3-6), el concepto de la técnica radica en que estos organismos ayudan a unir las grietas mediante

la producción de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), la formación de este mecanismo se basa en la hidrólisis enzimática de la urea al amoníaco y luego al dióxido de carbono (Knoben W, 2011).

**Tabla 3-6: Lista de bacterias utilizadas para curar grietas en el concreto**

1. *Bacillus cohnii*.
2. *Bacillus pseudofirmus*.
3. *Bacillus halodurans*.
4. *Sporosarcinapasteurii* or *bacillus pasteurii*.
5. *Bacillus subtilis*.
6. *Bacillus sphaericus*.
7. *Bacillus megaterium*.



**Figura 3-17: Bacterias utilizadas para sanar el agrietamiento en el concreto**

Fuente: Potential application of bacteria to improve the self-healing and strength of concrete (R Vashish & A. Shukla, 2020)

Los inhibidores orgánicos se caracterizan por ser estructuras de alto peso molecular, incorporando  $-\text{NH}_2$ ,  $-\text{SH}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{OH}$  o  $-\text{SO}_3\text{H}$  grupos funcionales. En formas concentradas, estos son líquidos o cera como sólidos. Sus porciones activas son generalmente grandes compuestos alifáticos o aromáticos con grupos de amina cargados positivamente. Se dice que estos inhibidores son agentes quelantes, que pueden formar quelato de seis miembros (anillos). Estos anillos se forman como resultado de la unión entre dos o más grupos funcionales del inhibidor y el metal, por lo tanto, cubren completamente la superficie metálica. Sin embargo, de vez en cuando, actúan como inhibidores catódicos, anódicos o mixtos. Algunos ejemplos son aminas, mercaptobenzotiazol, aldehídos, compuestos que contienen azufre, compuestos de nitrógeno heterocíclico y compuestos acetilánicos (Md Daniyal & S. Akhtar, 2019)

#### **A) AGENTES INORGÁNICOS**

La Organización Internacional para la estandarización (ISO 8044, 1999) define a un inhibidor químico como una sustancia que disminuye la tasa de corrosión cuando se encuentra en un sistema a una concentración adecuada. Estos inhibidores son generalmente sales cristalinas como sales de nitrito, sales de cromato, compuestos de molibdato, sales de zinc, fosfatos, silicato compuestos, etc. Por lo general, los aniones de estas sales generan la disminución de la corrosión del metal y pueden clasificarse de diferentes maneras: de acuerdo a la metodología de aplicación, al mecanismo de protección o a su naturaleza química. Las metodologías de aplicación más significativas son:

- Añadido al hormigón fresco como aditivo
- Añadido para reparar morteros
- Utilizado como tratamiento superficial en las barras de refuerzo
- Aplicado sobre la superficie de hormigón endurecido, como un inhibidor de corrosión penetrante

De acuerdo al mecanismo de protección, los inhibidores de corrosión pueden ser:

- Inhibidores anódicos: Estos inhibidores pasivan el metal formando una capa insoluble sobre la superficie del metal. Actúan principalmente al afectar la reacción anódica y, en consecuencia, se reduce la tasa de corrosión y la densidad de corriente de corrosión del metal.
- Inhibidores catódicos: Estos inhibidores actúan formando una barrera de precipitaciones insolubles sobre la superficie metálica. Actúan principalmente al afectar la reacción catódica y, en consecuencia, se reduce la tasa de corrosión al disminuir el potencial de corrosión. Estos inhibidores suelen ser menos efectivos, pero más seguros que los anódicos. Ejemplos de estos son silicatos, polifosfatos de fosfato, taninos e iones del zinc, níquel y magnesio que reaccionan con el hidroxilo de agua (OH) formando los hidróxidos insolubles como  $Zn(OH)_2$ ,  $Ni(OH)_2$ ,  $Mg(OH)_2$ , que se depositan en el sitio catódico de la superficie metálica, protegiéndola.

### **3.1.6. SOFTWARE DE MONITOREO**

Debido a la atención que requieren los efectos de carbonatación, se ha desarrollado modelos matemáticos, incluidos en un software, que permiten estimar la profundidad de carbonatación y en consecuencia estimar el deterioro de las estructuras. Estos modelos efectúan un análisis en base a la composición de la mezcla de concreto y a las características del ambiente al que está expuesto, según se puede apreciar en la Figura 3-18 (G. Roa-Rodríguez1, et. al, 2013).

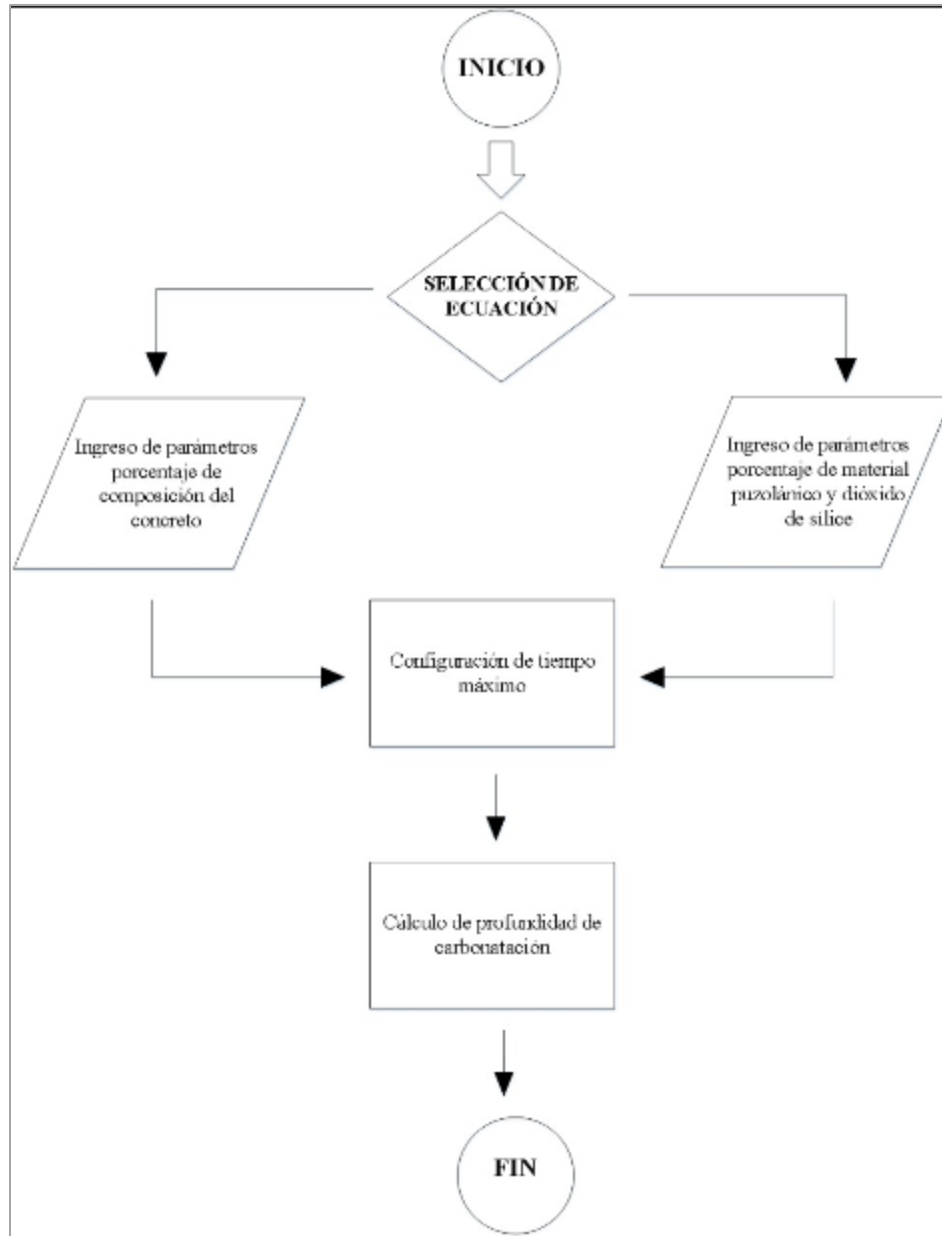


Figura 3-18: Diagrama de flujo de análisis del software

Fuente: Software para el cálculo de la velocidad de deterioro de los hormigones sometidos a carbonatación (G. Roa-Rodriguez1, et. al, 2013)





**Figura 3-19: Interfaz del software de carbonatación**

Fuente: Software para el cálculo de la velocidad de deterioro de los hormigones sometidos a carbonatación (G. Roa-Rodriguez1, et. al, 2013)

Para los elementos que se han identificado con posibles lesiones o anomalías se recomienda el análisis de la intensidad de corrosión ( $I_{corr}$ ) y el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) en puntos específicos, así como también es importante medir la profundidad de carbonatación en los elementos más críticos.

### 3.2. RESULTADOS

Debido a la coyuntura originada por el COVID-19 y a la poca disponibilidad al acceso de los equipos y mano de obra calificada, los ensayos propuestos no podrán ser ejecutados y por lo tanto solo se mostrará resultados de estudios anteriores como indicativos de los diferentes tipos de deterioro que se pretende analizar.

Por tanto, los resultados a presentar corresponden a la investigación: “Evaluación de daños por agresión ambiental en viviendas de concreto reforzado” (Romel et. al., 2008), ubicado en la zona costera de Chetumal en el Estado de Quintana Roo, México. Para el estudio se analizaron 5 viviendas de cierta unidad habitacional con 15 años de antigüedad, en la cual se encontró viviendas con un área aproximada de  $89 \text{ m}^2$ . El sistema estructural utilizado en dichas viviendas es de muros de concreto armado ( $f'c = 204 \text{ Kg/cm}^2$ ), con un espesor de 12 cm y mallas electrosoldadas ( $f_y = 5100 \text{ Kg/cm}^2$ ) espaciadas 15 cm en ambos lados. Los ensayos realizados en el concreto y en el acero de los muros (profundidad de carbonatación, recubrimiento del refuerzo, resistencia a la compresión, potencia electroquímica, resistencia eléctrica y velocidad de corrosión), se ejecutaron a una altura aproximada de 1.5 m con respecto al nivel superior de las cimentaciones (Tabla 3-7). Para caracterizar las condiciones del concreto en los muros elegidos (densidad, porosidad y absorción), se extrajeron especímenes inalterados (Tabla 3-8).



**Tabla 3-7: Resultados de las pruebas de campo en la investigación base**

| Parámetro  | Viviendas |        |        |        |        |
|--|-----------|--------|--------|--------|--------|
|  | 1         | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Carbonatación (mm)                                 | 36        | ---    | 5      | 45     | 60     |
| Recubrimiento (mm)                                 | 60        | 76     | 74     | 56     | 54     |
| Resistencia a la compresión (MPa)                  | 15        | 13     | 12     | 10     | 13     |
| Potencial electroquímico (V)                       | -0.25     | -0.216 | -0.386 | -0.333 | -0.515 |
| Resistencia eléctrica (k $\Omega$ )                | 16        | 18     | 27     | 1      | ---    |
| Velocidad de corrosión ( $\mu$ A/cm <sup>2</sup> ) | 0.031     | 0.043  | 0.02   | 1.154  | ---    |

Fuente: Romel, et. al., 2008

**Tabla 3-8: Resultados de las pruebas de laboratorio en la investigación base**

| Parámetro                     | Viviendas |       |       |       |       |
|-------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1         | 2     | 3     | 4     | 5     |
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.929     | 1.956 | 2.037 | 2.131 | 2.221 |
| Porosidad (%)                 | 26        | 36    | 29    | 29    | 28    |
| Absorción (%)                 | 17.5      | 24.4  | 17.6  | 16.7  | 15.4  |

Fuente: Romel, et. al., 2008

En base a los resultados de profundidad de carbonatación, se concluye que, para estructuras con una vida útil mayor a 25 años, el recubrimiento del acero de refuerzo, deberá incrementarse en un 50 %, de acuerdo a lo establecido en el artículo 7.7.5 de la Norma E.060, de lo contrario, el frente de carbonatación alcanzará el refuerzo de las estructuras.

A partir de los ensayos realizados para determinar la resistencia a la compresión del concreto, se evidenció una importante pérdida de sus condiciones originales, pues está disminuyendo en un rango de 50 a 75% en todas las viviendas. En consecuencia, las estructuras serán más vulnerables a los eventos sísmicos.

De acuerdo a los criterios establecidos por R. Stratful, descritos en líneas anteriores (Tabla 3-4), los potenciales de corrosión en las viviendas 3, 4 y 5, evidencian una probabilidad de media a alta con respecto al nivel de corrosión de las estructuras.

Con respecto a los porcentajes de porosidad obtenidos, se concluye que, al ser valores elevados (superiores al 15%), por lo tanto, es muy probable que, el concreto y el acero de refuerzo, podrían verse altamente afectados por el paso de sulfatos y cloruros.

Finalmente, se evaluaron las condiciones de concentración de cloruros y sulfatos para diversas profundidades (Figura 3-20 y 3-21).

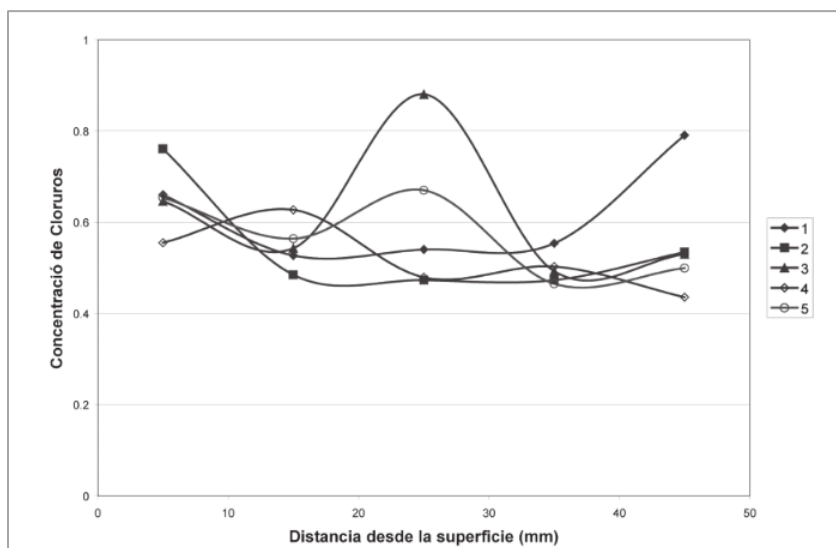


Figura 3-20: Concentración de cloruros en la investigación base

Fuente: Romel, et. al., 2008

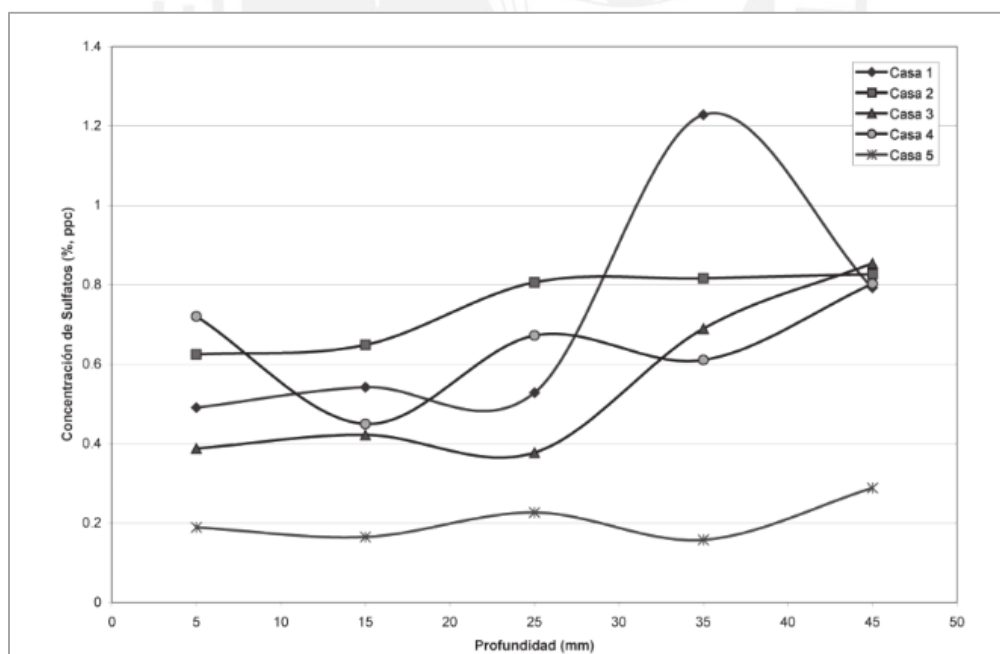


Figura 3-21: Concentración de sulfatos en la investigación base

Fuente: Romel, et. al., 2008



Tabla 4-2: Análisis comparativo de ensayos destructivos

|   | Ensayos destructivos  |  |   |                          |                                |
|---|---|--|---|--------------------------|--------------------------------|
|   | Extracción y rotura de probetas                                   | Toma de muestras de armaduras  | Profundidad de carbonatación                            | Pistola Windsor          | Microprobetas                  |
| <b>Facilidad de ejecución</b>               | Moderada (compromete la integridad del elemento)                  | Moderada (compromete la integridad del elemento)                     | Sencilla (no compromete la integridad de la estructura) | Sencillo                 | Sencillo                       |
| <b>Equipos</b>                              | Taladro con brocas diamantadas<br>Tachuelas refrigeradas con agua | Taladro perforador<br>Solución de fenoltaleina                       | Taladro perforador<br>Solución de fenoltaleina          | Pistola Windsor          | Taladro con brocas diamantadas |
| <b>Medición</b>                             | Resistencia del concreto  | Corrosión del acero de refuerzo<br>Resistencia del acero de refuerzo | Existencia de carbonatación                             | Resistencia del concreto | Resistencia del concreto       |
| <b>Desventajas</b>                          | Ensayo destructivo costoso  | Ensayo destructivo costoso   | Se requiere mantener la muestra sin humedad             | -                        | -                              |
| <b>Necesidad de ensayos complementarios</b> | Si requiere   | Si requiere  | No requiere   | No requiere              | Si requiere                    |

El análisis comparativo nos indica que, los ensayos de termografía infrarroja y microscopía óptica son de vital importancia en el inicio de la inspección, ya que permite identificar fácilmente las zonas en las que se puede encontrar anomalías (corrosión o presencia de sulfatos). Debido a su practicidad, es necesario ejecutar ensayos que sean indicativos del nivel de corrosión de la estructura, es así que se realizarán todos los ensayos electroquímicos y electromagnéticos propuestos, pues se complementan entre sí. Para identificar la calidad (resistencia) del concreto y del acero de refuerzo se deberán ejecutar todos los ensayos destructivos propuestos, en zonas en las que se evidencia un deterioro prominente, pues será necesario ejecutar un conjunto de reparaciones y esto solo será posible cuantificando la calidad de los elementos. Luego de identificar y cuantificar el estado de los elementos de la estructura, se recomienda evaluar la conveniencia de la aplicación de los aditivos orgánicos (bacterias) e inorgánicos mencionados en párrafos anteriores.

### Edificaciones futuras

La forma más sencilla de controlar los perjuicios del concreto frente a los agentes exteriores existentes en el mar (sulfatos, cloruros y carbonatación) es comprender y ejercer las recomendaciones que tiene la norma E.060 Concreto Armado para la durabilidad del concreto frente a estos componentes. Para el control de sulfatos, la norma indica que se determine el contenido de sulfato presente en el medio en porcentaje en peso y, según los rangos especificados, se concluya en el tipo de cemento, la relación de agua/cemento y la resistencia a compresión mínima para el concreto. Para los cloruros, la norma también sugiere emplear un estudio de

contenido de cloruros en el concreto, de modo que se establece un límite máximo de concentración para cada tipo de concreto (preesforzado, expuesto a cloruros, protegido contra la humedad, etc.) En el caso que la edificación se ubique en una zona de medio marino y tenga contacto directo con el agua marina, se recomienda que el concreto tenga un contenido máximo de 0.15% en peso de cemento, este es el límite más exigente. Finalmente, la carbonatación no es contemplada dentro de la norma, sin embargo, se sugiere trabajar con los lineamientos requeridos para resistir el ataque por cloruros y sulfatos, debido a que la acción conjunta de estos con la carbonatación es el daño más relevante a encontrar en las estructuras en medio marino.

Para obtener una estructura durable, es imperativo realizar un estudio sobre la vida útil esperada y la vida útil residual de la edificación y cuánta importancia se le dará a la misma. Si se trata de una edificación esencial, como lo es un colegio, se aconseja utilizar aditivos anti corrosivos como los expuestos en el acápite que trata sobre ellos. El correcto empleo en la mezcla prevendrá el desarrollo constante de la oxidación de la armadura y proveerá durabilidad a la estructura.

## **5. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**

- Debido a los diferentes perjuicios que puede generar la corrosión en elementos de concreto reforzado, es fundamental evaluar los motivos por los que se origina con el objetivo de identificar los posibles tratamientos que permitan ampliar la vida útil de las edificaciones.
- Los ensayos electroquímicos proporcionan información vital para identificar el nivel de desarrollo de los problemas de corrosión en el concreto y en las varillas de refuerzo, mediante la identificación de valores elevados y atípicos en los parámetros establecidos para este tipo de ensayos.
- Los ensayos electroquímicos y termográficos deberán considerarse como complementarios de otros, pues si bien son indicativos principales de la gravedad de corrosión, no confirman su existencia.
- Las características de los entornos marinos son altamente influenciadas en el desempeño de las estructuras de concreto reforzado. Es por ello que, es indispensable el requerimiento de especificaciones técnicas especiales para poder cumplir con los años de vida útil proyectados en el diseño.
- Es necesario introducir mecanismos de inspección y monitoreo a lo largo del desarrollo de la corrosión en el acero de refuerzo, y promover su normatividad.
- Si bien los ensayos no destructivos surgen como alternativa frente a los ensayos destructivos debido a que no comprometen directamente la estructura, en el contexto nacional estos aún resultan un tanto desconocidos, resultando finalmente en mayores costos de implementación.

## 6. REFERENCIAS

- AFSHAR, A., NOBAKHTI, A., SHOKRGOZAR, A., & AFSHAR, A. (2019). Simulation of the Effects of Pozzolanic Additives and Corrosion Inhibitor on the Corrosion of Reinforced Concrete by Artificial Neural Networks. *Romanian Journal of Materials / Revista Romana de Materiale*, 49(4), 535
- Alberto Hernández-Oroza & Dainelys Guerra-Bouza. (2015) Influencia del microambiente en el interior de una edificación sobre la corrosión del acero de refuerzo.
- Arancibia, V. S., Gracia, V. P., Assuncao, S. S., Caselles, O., Clapes, J., & Drigo, R. G. (2018). Analysis of corrosion in historical heritage structures. The case study of the Park Güell in Barcelona. 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Ground Penetrating Radar (GPR), 2018 17th International Conference On, 1–4. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1109/ICGPR.2018.8441566>
- American Concrete Institute (ACI). ACI 437R-19 Strength Evaluation of Existing Concrete Buildings. 38800 Country Club Dr., Farmington Hills, MI 48331-3439 USA; American Concrete Institute (ACI), 2019. doi: <https://www-astm-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/cgi-bin/resolver.cgi?3PC+ACI+ACI 437R-19+en-US>
- ASTM International. (2004). Handbook on nondestructive testing of concrete (Segunda ed.). Philadelphia: CRC Press LLC.
- ASTM International. (2013). ASTM International, standards worldwide. Recuperado el 29 de Julio de 2013, de <http://www.astm.org>
- Barrelas, J., de Brito, J., & Correia, J. R. (2016). Analysis of the degradation condition of secondary schools. case study: pavilions and prefabricated buildings. *Journal of Civil Engineering & Management*, 22(6), 768–779. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.3846/13923730.2014.914090>
- Bedoya Henao, C. A., Tobón, J. I., Monsalve Valencia, J. J., Palacio, C. V., & Betancur, M. V. (2016). Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica. (Spanish). *Informador Técnico*, 80(2), 142
- Bernat, E., & Gil, L. (2013). Aided Diagnosis of Structural Pathologies with an Expert System. *Advances in Structural Engineering*, 16(2), 379–394. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1260/1369-4332.16.2.379>
- Bedoya Henao, C. A., Tobón, J. I., Monsalve Valencia, J. J., Palacio, C. V., & Betancur, M. V. (2016). Evaluación de patologías en el concreto usando microscopía óptica. (Spanish). *Informador Técnico*, 80(2), 142.

- Bouzelha, K., Amazouz, L., Miloudi, N., & Hammoum, H. (2019). Temporal analysis of the performance of a RC storage tank considering the corrosion. *Procedia Structural Integrity*, 22, 259–266. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1016/j.prostr.2020.01.033>
- Castañeda, A., Corvo, F., & González, J. (2010). Estudio comparativo de la corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado a partir de técnicas electroquímicas y convencionales. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 41, 1–9
- Chaparro WA, Gordillo M, Bautista J. Evaluación de la corrosión del acero embebido en concreto AAS, expuesto a carbonatación mediante un experimento factorial con medidas repetidas. *Ingeniería y Ciencia*. 2013;9(17):237-260. <http://search.ebscohost.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=87566133&lang=es&site=eds-live&scope=site>. Accessed May 24, 2020
- Daniyal, M., & Akhtar, S. (2019). Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. *Journal of Building Pathology & Rehabilitation*, 5(1), N.PAG.
- Du Plooy, R., Villain, G., Lopes, S. P., Ihamouten, A., Dérobert, X., & Thauvin, B. (2015). Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study. *Materials and structures*, 48(1-2), 369-386.
- Guerrero Mena, C. N. (2013). Evaluación de la aplicabilidad de la técnica de la termografía infrarroja al reconocimiento del estado de elementos de hormigón (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Hernández, O. & Mendoza, C. J. (2006). Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, *Ingeniería Investigación y Tecnología, UNAM*, 7(1), 57-70.
- Hernández-Oroza, A., & Guerra-Bouza, D. (2015). Influencia del micro-ambiente en el interior de una edificación sobre la corrosión del acero de refuerzo. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 45–55
- The International Organization for Standardization, ISO 8044 (1999). Corrosion of metals and alloys – Basic terms and definitions”, Switzerland.
- Knoben W. (2011). Bacteria care for concrete. *Mater Today* 14:444. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70193-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70193-6)

- Klotz, R. (1972) Field Investigation of Concrete Quality Using the Windsor Probe Test System. Pennsylvania Department of Transportation. Recuperado de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1972/378/378-006.pdf>
- Lamond, J. F. (1997, Nov). Designing for durability, *Concrete International*. 34–36
- Miguel Ramón Sosa-Baz, Tezozomoc Pérez-López, Francisco Eduardo Corvo-Pérez, Andrés Torres-Acosta, Oladis Troconis de Rincón. (2015) Estudio de deterioro de especímenes de concreto armado expuestas a 300 m de la costa de campeche, México.
- Nassima, K., & Rachid, M. (2015). Using non-destructive methods for the characterization of concrete in aggressive environments. *International Journal of Engineering Research in Africa*, 15, 62–70. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.4028/www.scientific.net/JERA.15.62>
- Oualit, M., Jauberthie, R., & Abadlia, M. T. (2019). Concrete pathologies in sewer structures: microstructural analysis. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 4(1). <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1007/s41024-019-0051-y>
- Patología y durabilidad en el concreto. (2017). *Construcción Y Tecnología En El Concreto*, (2017). Recuperado de: <http://www.imcyc.com/revistacyt/MARZO%202017/MARZO17.pdf>
- Pazoki, M., Abdoli, M. A., Ghasemzade, R., Dalaei, P., & Ahmadi Pari, M. (2016). Comparative Evaluation of Poly Urethane and Poly Vinyl Chloride in Lining Concrete Sewer Pipes for Preventing Biological Corrosion. *International Journal of Environmental Research*, 10(2), 305–312.
- Porto, J. (2005) *Manual de Patologías en las estructuras de concreto armado*. Universidade da Coruña. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2183/13853>
- R Vashish & A. Shukla. (2020). Potential application of bacteria to improve the self healing and strength of concrete.
- R Rómel Solís Carcaño, Eric Moreno, Felipe Jiménez Torres & Victorino Rosas Pérez (2008). Evaluación de daños por agresión ambiente en viviendas de concreto reforzado.
- Roa-Rodriguez, G., Aperador, W., & Vera, R. (2014). Software Para El Cálculo De La Velocidad De Deterioro De Los Hormigones Sometidos a Carbonatación. *La Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, RLMM*, 34(1), 45–54.



- Rocha, J. H. A., & Póvoas, Y. V.. (2017). Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 200-214. <https://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.223>
- Saraswathy and S. Ha-Won. (2007). Evaluation of corrosion resistance of portland pozzolana cement and fly ash blended cements in pre-cracked reinforced concrete slabs under accelerated testing conditions, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 104, no. 2-3, pp. 356–361.
- Solla, M., Lagüela, S., Fernández, N., & Garrido, I. (2019). Assessing Rebar Corrosion through the Combination of Nondestructive GPR and IRT Methodologies. *Remote Sensing*, 11(14), 1705. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.3390/rs11141705>
- Sosa-Baz, M. R., Pérez-López, T., Corvo-Pérez, F. E., Torres-Acosta, A., & de Rincón, O. T. (2015). Estudio del deterioro de especímenes de concreto armado expuestas a 300 m de la costa de campeche, méxico. *Revista CENIC Ciencias Químicas*, 46, 81–89.
- St John, D. A., Poole, A. W., & Sims, I. (2012). *Concrete petrography - A handbook of investigate techniques* (p. 480).
- Torres-Acosta, A. A., Presuel-Moreno, F., & Andrade, C. (2019). Electrical Resistivity as Durability Index for Concrete Structures. *ACI Materials Journal*, 116(6), 245–253. <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.14359/51718057>
- T. W. P. Wong, C. S. Poon and W. L. W. Lai (2018). Laboratory validation of corrosion-induced delamination in concrete by ground penetrating radar, 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441597.
- UKTA. (2009). *Thermography Code of Practice: Building Thermography*. Northhampton: United Kingdom Thermography Association UKTA.
- Vashisht, R., & Shukla, A. (2020). Potential application of bacteria to improve the self-healing and strength of concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(1). <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1007/s41024-020-0073-5>.
- Guerrero Mena, C. N. (2013). *Evaluación de la aplicabilidad de la técnica de la termografía infrarroja al reconocimiento del estado de elementos de hormigón* (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).