



Facultad De Ingeniería
Escuela De Construcción Civil

Evaluación de estaciones de monitoreo de muros de hormigón armado expuestos a ambiente marino

Por

Patricio Antonio Toro Romero

Memoria para optar al grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título
de Ingeniero Constructor

Prof. Guía: Dra. Patricia Martínez Ramírez

Valparaíso

Marzo 2019

*Dedicado a mi madre, padre y
hermanos, ya que sin su apoyo y
cariño incondicional de ellos nada
de esto hubiese sido posible.*

Agradecimientos

De manera muy especial quiero agradecer a mi profesora guía Dra. Patricia Martínez, quien gracias a su orientación, consejos, paciencia y apoyo en todo momento hizo posible el desarrollo de esta investigación.

Doy gracias a mis padres Félix Arnoldo Toro Gatica y Patricia Rosa Romero Jiménez, mis hermanos por su apoyo incondicional, por ser mi respaldo en todo momento, por creer en mí, siempre fomentando a exigirme más y disfrutar cada uno de mis logros.

También quiero agradecer al laboratorio de materiales por acogerme y brindarme todo el apoyo para desarrollar esta investigación y desarrollarme como un mejor profesional.

A mis amigos Julio, Guillermo, Alberto, Felipe, Katia, Rosa por su cariño y apoyo, y hacer mi paso por la universidad de una forma más grata y enriquecedora.

Y un especial agradecimiento a mi hermano Félix Eduardo Toro Romero, ya que me apoyo en todo momento, tanto en mis derrotas como en mis triunfos, tanto en lo emocional, como lo académico y por sobre todo demostrándome con el ejemplo lo que quiero llegar a ser tanto como profesional y como persona.

Índice general

Índice general	4
Índice de tablas	6
Índice de figuras	7
Resumen	9
Abstract	10
Glosario	11
Capítulo 1 Antecedentes generales.....	12
1.1 Introducción.....	13
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo General	15
1.2.2 Objetivo Específicos.....	15
1.3 Alcance de la investigación	15
1.4 Estructura de la tesis	16
Capítulo 2 Factores que influyen y desencadenan la corrosión de las armaduras	17
2.1 Introducción.....	18
2.2 Dosificación del hormigón	18
2.3 Compacidad y homogeneidad	19
2.4 Espesor de recubrimiento	19
2.5 Estado superficial del acero	21
2.6 Iones despasivantes	21
2.6.1 Cloruros	21
2.6.2 Ataques por ácido	25
Capítulo 3 Ensayos y equipamientos.....	26
3.1 Generalidades	27
3.2 Medidor espesor de recubrimiento Elcometer 331 Model BH.....	27
3.3 Medidor de media celda Elcometer 331 Model BH.....	28
3.4 Ensayos para determinar homogeneidad	29
3.5 Ensayo de permeabilidad al aire	30
3.6 Ensayo de permeabilidad al agua	32
Capítulo 4 Metodología de la investigación.....	35
4.1 Generalidades	36
4.2 Secuencia metodológica	36
4.2.1 Etapa 1: Formulación de la Investigación	36
4.2.2 Etapa 2: Diseño de la Investigación	36
4.2.3 Etapa 3: Análisis y Evaluación.....	36
4.3 Definición de estructuras de hormigón a utilizar	38
4.3.1 Hormigón.....	38
4.4 Lugar de muestreo	39
4.5 Determinación de espesor de recubrimiento	40

4.6 Medición de media celda.....	42
4.7 Ensayo permeabilidad al aire.....	43
4.8 Ensayo de permeabilidad al agua	45
4.9 Ensayo de esclerometría	46
4.10 Extracción de testigos.....	48
4.10.1 Resistencia a compresión	50
4.10.2 Carbonatación in-situ	52
4.10.3 Ion cloruro.....	55
Capítulo 5 Presentación y análisis de resultados.....	58
5.1 Generalidades	59
5.2 Determinación espesor de recubrimiento	59
5.3 Ensayo potencial de corrosión.....	60
5.4 Ensayo de esclerometría	61
5.5 Ensayo de permeabilidad al aire.....	63
5.6 Ensayo de permeabilidad al agua	64
5.7 Ensayo de carbonatación (tinción con fenolftaleína)	65
5.8 Ensayo de penetración del ion cloruro	66
5.9 Ensayo de resistencia a compresión	68
Capítulo 6 Conclusiones y futuras investigaciones.....	70
6.1 Conclusiones.....	71
6.2 Propuesta de futuras investigaciones.....	72
Bibliografía.....	73
Anexos.....	75

Índice de tablas

Tabla 2.1 Valor crítico de cloruros en hormigones reforzados	22
Tabla 3.1 Norma ASTM C876	29
Tabla 3.2 Relación altura de columna de agua a velocidad del viento	33
Tabla 4.1 Dosificación estación monitoreo Proyecto Fondef	38
Tabla 4.2 Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de KT.....	44
Tabla 4.3 Grado de permeabilidad en función de penetración de agua	45
Tabla 4.4 Resistencia a la carbonatación.....	54
Tabla 4.5 Resistencia a la penetración de Cl-	57
Tabla 5.1 Resultados de medición potencial de corrosión	61
Tabla 5.2 Resultados de medición de coeficiente de permeabilidad al aire método Torrent	64
Tabla 5.3 Promedio ensayo permeabilidad al agua "tubo Karsten"	65
Tabla 5.4 Penetración de carbonatación.....	65
Tabla 5.5 Velocidad de carbonatación	66
Tabla 5.6 Predicción de tiempo para que la carbonatación alcance la armadura.....	66
Tabla 5.7 Penetración de Ion Cloruro	67

Índice de figuras

Figura 2.1 Valores de espesor de recubrimientos de armaduras contemplado en diferentes normas	20
Figura 2.2 Tipos de corrosión de armaduras	21
Figura 2.3 Perfil de concentración de cloruros en el hormigón	25
Figura 3.1 Medidor de hormigón Elcometer 331 Model BH	27
Figura 3.2 Medidor de media celda Elcometer 331 Model BH	28
Figura 3.3 elementos que conforman el martillo Schmidt	30
Figura 3.4 Esquema y detalle del método Torrent.	31
Figura 3.5 Instalación de tubo Karsten.....	33
Figura 4.1 Metodología de trabajo	37
Figura 4.2 Ubicación de las estaciones de monitoreo Facultad de Arquitectura Universidad de Valparaíso Chile.....	38
Figura 4.3 Estación de monitoreo A Facultad de Arquitectura, Playa Ancha Valparaíso.....	39
Figura 4.4 Demarcación de zonas de trabajo	40
Figura 4.5 Detección de armaduras y espesores de recubrimientos.....	41
Figura 4.6 Medición de potencial de corrosión.....	42
Figura 4.7 Determinación zonas de muestreo A y B para determinar espesor de recubrimiento y potencial de media celda.....	43
Figura 4.8 Esquema de lugar de muestreo en muros de hormigón armado para permeabilidad al aire, Facultad de Arquitectura, Universidad de Valparaíso Chile. ..	43
Figura 4.9 Instalación equipo Torrent	44
Figura 4.10 Uso del martillo Schmidt	46
Figura 4.11 Posicionamiento puntos de medición.....	47
Figura 4.12 Zonas ensayos y extracción de testigos	48
Figura 4.13 Extracción de testigos	49
Figura 4.14 Corte de testigos.....	50
Figura 4.15 Refrentado de testigos.....	51
Figura 4.16 Diagrama de flujo carbonatación	52
Figura 4.17 Aplicación de fenolftaleína sobre testigo.....	53
Figura 4.18 Tinción por Fenolftaleína.....	54
Figura 4.19 Diagrama de flujo ión cloruro.....	55
Figura 4.20 Aplicación de nitrato de plata sobre testigo	56
Figura 5.1 Mapeo de espesores de recubrimiento	59
Figura 5.2 Mapeo de potencial de corrosión estaciones de monitoreo	60
Figura 5.3 Capa de oxido	61
Figura 5.4 Ensayo esclerométrico estaciones de monitoreo A y B	62
Figura 5.5 Permeabilidad al aire estaciones de monitoreo A y B	63

Figura 5.6 Permeabilidad al agua con tubo Karsten en estaciones de monitoreo A y B	64
Figura 5.7 Medición de penetración de carbonatación.....	65
Figura 5.8 Medición de penetración de ión cloruro	66
Figura 5.9 Resistencia a compresión Muro de monitoreo A.....	68
Figura 5.10 Resistencia a compresión Muro de monitoreo B	69

Resumen

Es bien conocido, que el recubrimiento de hormigón protege las barras de refuerzo (también llamadas armaduras) contra los agentes agresivos del medio ambiente. Un recubrimiento de hormigón sano y de buena calidad provee a la armadura de una barrera física, previniendo que agentes químicos (iones de cloruro, dióxido de carbono, etc.) lleguen a la superficie de ésta. Sin embargo, en un ambiente marino, los iones cloruro del agua de mar o brisa marina, se acumulan en la superficie del hormigón y lentamente penetran hasta la armadura ubicada en el interior.

Cuando la concentración de cloruros en la armadura excede el valor crítico, la capa pasiva protectora en la superficie de esta armadura se rompe y comienza la corrosión activa.

Son pocos los estudios que se han dedicado a investigar el tema de la incidencia del espesor de recubrimiento y el diámetro de la barra de acero de estructuras de hormigón debido a la corrosión de la armadura. Producto de ese interés y con el fin de obtener datos y resultados que aporten en el futuro manejo del hormigón en condiciones que afectan su durabilidad es que la finalidad de esta tesis es realizar un estudio referente a la incidencia de los espesores de recubrimiento de hormigón y el diámetro de la barra de refuerzo frente al potencial de corrosión de los muros de hormigón cuando estos se encuentran expuestos a ambientes marinos. Para ello se utilizarán muros de monitoreo de hormigón armado como medio de control, los cuales han sido construidos con diferentes combinaciones de espesor de recubrimiento y diámetro de barra de refuerzo con el fin de generar tablas de potencial de corrosión para diferentes combinaciones.

El estudio evalúa las condiciones actuales del hormigón y las barras de refuerzo de muros de monitoreo a través de ensayos no destructivos y la extracción de testigos. Donde en una primera etapa consiste en comprobar la variación de las propiedades de permeabilidad y pasividad de las armaduras y conocer el estado real en el cual se encuentran.⁷

Los resultados obtenidos de la evaluación de los muros permiten concluir que los modelos de predicción de diferentes parámetros de durabilidad en estructuras de hormigón armado expuestas al ambiente marino presentados en anteriores investigaciones cumplen con la estimación de vida útil y daño estimado en los parámetros de diseño de hormigones de recubrimiento que tienen por finalidad proteger a la armadura.

Palabras Clave: Corrosión Acero, Permeabilidad, Durabilidad, Potencial de Corrosión, Despasivación de Armaduras, Especificaciones por Desempeño, Carbonatación.

Abstract

It is well known that the concrete coating protects reinforcing bars (also called armours) against aggressive agents in the environment. A sound concrete coating provides the reinforcement with a physical barrier, preventing chemical agents (chloride ions, carbon dioxide, etc.) from reaching the surface of the reinforcement. However, in a marine environment, chloride ions from seawater or sea breezes accumulate on the surface of the concrete and slowly penetrate to the armor located inside.

When the concentration of chlorides in the reinforcement exceeds the critical value, the protective passive layer on the surface of this reinforcement is broken and active corrosion begins.

There are few studies that have been dedicated to investigate the issue of the incidence of the coating thickness and the diameter of the steel bar of concrete structures due to the corrosion of the reinforcement. Product of that interest and in order to obtain data and results that contribute in the future handling of concrete in conditions that permeate its durability is that the purpose of this thesis is to carry out a study regarding the incidence of the thicknesses of concrete coating and the diameter of the reinforcing bar against the corrosion potential of concrete walls when they are exposed to saline environments. For this purpose, reinforced concrete monitoring walls will be used as control means, which have been built with different combinations of coating thickness and reinforcement bar diameter in order to generate corrosion potential tables for different combinations.

The study evaluates the current conditions of the concrete and the reinforcing bars of the monitoring walls through non-destructive tests and the extraction of witnesses. Where in a first stage is to check the variation of the properties of permeability and passivity of the reinforcements and know the real state in which they are.

The results obtained from the evaluation of the walls allow us to conclude that the prediction models of different durability parameters in reinforced concrete structures exposed to the marine environment presented in previous investigations comply with the estimate of useful life and damage estimated in the design parameters of Coating concretes that are intended to protect the reinforcement.

Key Words: Steel Corrosion, Permeability, Durability, Corrosion Potential, Armor Depassivation, Performance Specifications, Carbonation.

Glosario

- **Iones Cloruro:** El ion cloruro (Cl^-), es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y de mar. Los contenidos de cloruros de las aguas naturales son variables y depende principalmente de la naturaleza de los terrenos atravesados.
- **Dióxido de Carbono:** (CO_2) es un gas incoloro, denso y poco reactivo. Forma parte de la composición de la tropósfera.
- **Capa pasiva:** película generada por el contacto entre la pasta de cemento y las barras de refuerzo que protege a las barras contra el ataque de la corrosión.
- **Carbonatación:** La carbonatación es un proceso lento que ocurre en el hormigón, donde la cal apagada (hidróxido cálcico) del cemento reacciona con el dióxido de carbono del aire formando carbonato cálcico. Esta reacción, necesariamente se produce en medio acuoso, ya que el dióxido de carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico, ya que éste reaccionará con el hidróxido de calcio, obteniendo como resultado el carbonato de calcio y agua. Dado que la carbonatación provoca una bajada de pH (ácido) esto puede llevar a la corrosión de la armadura y dañar la construcción.
- **Deformación plástica:** Es aquella en la que el cuerpo no recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación.
- **Ensayo No Destructivo:** Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de nondestructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo.
- **Potencial de corrosión:** es una magnitud que indica aproximadamente la situación de corrosión o pasividad de esta, medida directamente sobre la estructura.
- **Perfil de cloruro:** es un parámetro importante relacionado con la durabilidad del hormigón reforzado. Se puede medir con diferentes métodos de ensayo basado en la difusión natural, en el que se coloca una muestra de agua saturada de hormigón en contacto con una solución de cloruro, y después de un tiempo se obtiene un perfil de cloruro.
- **Cloruro libre:** Cloruros solubles en agua y son los que representan un riesgo para el acero de refuerzo al alcanzar niveles críticos y causar su despasivación.
- **Cloruro enlazado:** Cloruros combinados a las diferentes fases o compuestos de la pasta de cemento; de los cuales el principal es el aluminato tricálcico.

Capítulo 1 Antecedentes generales

1.1 Introducción

A nivel mundial existen numerosas estructuras de hormigón que se encuentran en condiciones ambientales particularmente agresivas, sometidos al desgaste, como lo son aquellas estructuras ubicadas en ambientes marinos, o brisa marina, donde el principal responsable de la corrosión es el ion cloruro (Ebensperger & Torrent, 2010).

El conocimiento de cómo se originan los casos de corrosión y la detección temprana se traduce en ahorros económicos considerables debido a que se evitaría la interrupción de operaciones de una actividad por causas de reparaciones (León, 2008)

Actualmente la exposición de las estructuras de hormigón a ambientes física y químicamente adversos (como lo es el ambiente salino) desde la etapa inicial de construcción produce un daño que afecta la calidad final del hormigón y de la estructura (Ebensperger & Torrent, 2010)

Esto ha llevado a buscar soluciones más eficientes al momento de diseñar y ejecutar la construcción de dichas estructuras. Un factor por considerar para ello son las condiciones ambientales a las cuales se verá sometida la estructura, las que siendo monitoreadas pueden ayudar a predecir las variaciones de la concentración de cloruros en la superficie del concreto y por ende en los perfiles de cloruros y coeficientes de difusión respectivos.

En los intentos de mitigar los procesos corrosivos y reducir los costos de mantenimiento de los componentes que forman las estructuras de hormigón armado (recubrimientos anticorrosivos, tratamientos superficiales, reemplazo de las partes dañadas, entre otros), se ha aumentado el interés por desarrollar recubrimientos con alto contenido de cromo o níquel, que protejan los sustratos de ambientes agresivos. Dos de los factores más importantes que pueden afectar el comportamiento del hormigón armado son: la corrosión de las barras de acero debido a los iones cloruro y la carbonatación (Juárez & Castro, 2011).

Hoy en día las estructuras de hormigón armado son dañadas principalmente por la corrosión causada por la penetración del ion cloruro en el hormigón, y por la carbonatación. En la actualidad el mayor mecanismo de protección contra la corrosión es la capa de recubrimiento de hormigón. Dicha capa de recubrimiento de hormigón busca proteger las armaduras contra la corrosión inducida por la carbonatación o por ingreso de cloruros. El recubrimiento de hormigón sano provee a la armadura de una barrera física que previene en cierta medida los ataques de agentes químicos (iones de cloruro, dióxido de carbono, etc.) (Ramón, et al, 2013)

A lo anterior se debe sumar el hecho de que, el hormigón constituye el medio propicio para preservar al acero frente a la oxidación natural, pues la pasta cementicia provee las condiciones ideales para que se produzcan las reacciones necesarias que conducen a la formación de una película protectora sobre el metal (Fernández, et al, 2010).

Aunque una de las principales causas de despasivación de las armaduras embebidas en hormigón es la denominada carbonatación, que consiste en la neutralización de la matriz de cemento como consecuencia de su interacción con el CO₂ atmosférico. La carbonatación del hormigón es una de las causas que permiten el inicio de la corrosión de los aceros en estructuras de hormigón armado y puede ser el principal mecanismo de deterioro de dichas estructuras, ya que debido a la porosidad del concreto, las condiciones de humedad relativa en el medio ambiente de exposición y los agentes contaminantes presentes en el aire permiten un rápido avance de la corrosión, siendo de todas estas posibles patologías, la corrosión de las armaduras la principal causa de deterioro del hormigón en estructuras de hormigón armado (Castellote & Andrade, 2009).

Por lo general, una vez que los iones Fe se liberan del acero, reaccionan con el oxígeno circundante, y forman óxidos más estables químicamente, y se van depositando en la superficie del acero. El vacío dejado por el acero consumido no es suficiente para acomodar estos óxidos, ya que son de menor densidad con volumen de 1.7 hasta 6.15 veces el del acero original. Este proceso de corrosión en las estructuras de concreto con refuerzo se ve reflejado en la pérdida de resistencia del material, así como en la tensión interna generada por los productos de corrosión del acero, la cual no logra ser soportada por la deformación plástica limitada del hormigón y conduce al agrietamiento (Castorena et al, 2007).

El ingreso de iones agresivos o moléculas dentro de los hormigones es gobernado por varios mecanismos de transporte. Básicamente hay cuatro mecanismos de transporte: absorción capilar, difusión, permeabilidad y una mezcla entre absorción capilar y permeabilidad. Las investigaciones realizadas agregan que cuando el frente de carbonatación llega hasta el acero de refuerzo, la película pasiva que lo protege pierde estabilidad termodinámica, generando la ruptura y destrucción de la película protectora de óxidos, lo que implica la pérdida de la pasividad y el incremento en la velocidad de corrosión (Carvajal & Jorquera, 2010).

En este contexto se ejecutó el proyecto Fondef D07 I1076 “Diseño e implementación de un Sistema de Especificación por Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado”, el que tuvo dentro de sus objetivos la construcción de estaciones de monitoreo para evaluar en el mediano y largo plazo la influencia de diferentes parámetros de dosificación y propiedades asociadas a la durabilidad de estructuras de hormigón armado. En este escenario se propone la presente investigación, cuyo propósito es evaluar el desempeño de las estaciones de monitoreo antes mencionadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar condiciones de durabilidad de las estaciones de monitoreo de muros de hormigón armado expuestos a ambiente marino.

1.2.2 Objetivo Específicos

- Determinar parámetros de permeabilidad del recubrimiento de los muros de hormigón armado.
- Determinar el potencial de corrosión en las barras de refuerzo en los muros de monitoreo expuestos al ambiente marino.
- Determinar la influencia de la carbonatación sobre la absorción por capilaridad del hormigón.
- Determinar la penetración del ion cloruro en muros de monitoreo expuestos al ambiente salino.

1.3 Alcance de la investigación

- Las estructuras para evaluar son las estaciones de monitoreo de muros de hormigón armado existentes en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Valparaíso Chile. construidas con el proyecto FONDEF DO7I1076 (2008 – 2011)
- El espesor de recubrimiento y el potencial de corrosión serán medidos a través del uso del equipo Elcometer 331 Model B – Model BH
- La homogeneidad del hormigón será determinada con el ensayo de esclerómetro.
- Se realizarán ensayos de permeabilidad al aire y permeabilidad al agua.
- Se realizará la extracción de 5 testigos por muros para evaluar de ellos carbonatación, penetración del ion cloruro y concentración del ion cloruro.

1.4 Estructura de la tesis

Con el fin de cumplir con los objetivos planteados en esta investigación, el presente documento se estructurará como se detalla a continuación.

En el Capítulo 1 se presenta los antecedentes generales del estudio, señalando la problemática que permita justificar y discernir la motivación de la investigación realizada. Se formula los objetivos y alcance.

En el Capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica de los diferentes factores que influyen en la corrosión de las armaduras de los muros de hormigón.

En el Capítulo 3 se presenta los principales ensayos para determinar espesor de recubrimiento, potencial de corrosión, ensayos de permeabilidad al aire y agua incluidos en algunos códigos e instructivos.

En el Capítulo 4 se describe la metodología de trabajo que se utilizará para esta investigación, donde se abordará protocolos de ensayos y levantamiento de datos.

En el Capítulo 5 se presenta y analiza los datos recolectados en las experiencias de terreno y laboratorio.

En el Capítulo 6 se entrega las conclusiones obtenidas de la investigación y se proponen posibles futuras investigaciones.

Capítulo 2 Factores que influyen y desencadenan la corrosión de las armaduras

2.1 Introducción

La durabilidad de las estructuras de hormigón se ve afectada por un conjunto de circunstancias que influyen en la despasivación del acero en el hormigón. Según lo indicado por Ebensperger & Torrent, (2010) la corrosión sólo se produce si el pH baja hasta valores ácidos para un hormigón (<8).

Debido a lo anterior los factores que faciliten o den lugar a una neutralización del medio alcalino que genera la pasta de cemento sobre las barras de acero, o bien es el caso de fisuras que faciliten la ausencia de contacto entre el acero y el hormigón, lo cual dificulta la creación de esta capa alcalina.

Existen diversos factores que inciden, desencadenan o producen uno o ambos efectos en el proceso de corrosión de las armaduras. Algunos de estos procesos son la dosificación, la compactación, la homogeneidad de la mezcla del hormigón, el estado superficial de las armaduras y la humedad ambiente son los algunos de los factores que afectan en el proceso de corrosión.

Por otra parte, los factores desencadenantes que con más frecuencia dan inicio a la corrosión de las barras de refuerzo son: la presencia de estribos de diferente diámetro de espesor (corrosión por picadura, altas tensiones mecánicas en los aceros (pretensado y postensado), corrientes erráticas o de interferencia, contacto galvánico entre diferentes metales, iones despasivantes en el ambiente (Cl⁻, SO₄, entre otros), la acumulación de CO₂ en el ambiente o cualquier líquido que neutralice la alcalinidad del hormigón, lixiviación por aguas blandas o la discontinuidad en el recubrimiento de hormigón (fisuras y grietas), presentando estas últimas una combinación de ambos efectos (Ebensperger & Torrent, 2010).

2.2 Dosificación del hormigón

El hormigón debe ser homogéneo, sólido, resistente, poco poroso y durable, lo que nos permita garantizar la protección sobre las armaduras de acero de la estructura de las acciones agresivas de agente externo, sin olvidar de que nos debe garantizar las prestaciones mecánicas a la cual será solicitada la estructura.

La dosificación del hormigón es uno de los factores que influye significativamente en el comportamiento futuro de este, como elemento protector de las barras de refuerzo.

El hormigón que rodea a las barras de refuerzo debe cumplir una doble función protectora las cuales son: a) Como una barrera física que rechaza la penetración de los agentes agresivos externos y b) Crear una capa pasivante sobre el acero en función de su alcalinidad que lo mantendrá protegido durante un tiempo indefinido. Debido a que el hormigón debe cumplir con ambas funciones es de suma importancia dosificarlo por métodos que proporcionen su máxima compactación lo que significa garantizar una mínima porosidad (RedDurar, 2004).

2.3 Compacidad y homogeneidad

La compacidad del hormigón es la principal propiedad a los efectos de su resistencia a la penetración de agentes agresivos externos. La cual es inversamente proporcional a la porosidad, donde más alta sea la primera se expresará en que magnitud está protegido la barra de refuerzo, minimizando significativamente los efectos de la carbonatación y el posterior ataque de los cloruros, los cuales son los agentes agresivos más importantes (Chávez, et al, 2013).

Por otra parte, la mezclas con relación A/C baja ($<0,4$) son utilizadas en ambientes agresivos debido a la alta protección entregada a la armadura (alta alcalinidad y baja porosidad). Sin embargo, deficiencias en la colocación de las mezclas (curado) impide la hidratación del cemento, principalmente en la superficie del hormigón, lo cual se manifiesta como un aumento de la porosidad y por consiguiente en la disminución de su resistencia a la agresividad ambiental.

No obstante, la homogeneidad de la mezcla de hormigón está directamente relacionada con la fabricación del hormigón mediante un adecuado proceso de producción, transporte, colocación, vibrado, compactación y curado. En la práctica para obtener lo anteriormente mencionado se debe cumplir una serie de actividades secuenciales, de las cuales se encuentran íntimamente ligadas entre sí. Dichas actividades son: buena selección y dosificación de los materiales, mezclado homogéneo y una buena ejecución de los procedimientos de transporte, manipulación, vibrado, compactación, curado y una cuidadosa operación de descimbre (RedDurar, 2004).

2.4 Espesor de recubrimiento

La capa de recubrimiento de hormigón busca proteger a las armaduras contra la corrosión inducida por la carbonatación o el ingreso de cloruros que reaccionan con las barras de refuerzos, siendo por ello la más afectada de ataques químicos o también por la congelación. Con lo señalado anteriormente el recubrimiento de hormigón sano provee a la armadura de una barrera física que previene en cierta medida los ataques de agentes químicos (Cl^- , SO_4 , CO_2 , entre otros) (Ebensperger & Torrent, 2010).

Aunque en muchos casos esta masa de hormigón no cumple con funciones específicas ya que suele ser menos compacta y más porosa que el resto del volumen que compone el elemento.

Dicho fenómeno puede ser producido por varias causas, donde la más importante es una mala compactación del hormigón. En la Figura 2.1 se muestra una comparación de normas internacionales y la NCh 430 Of 2012 en las cuales se especifica los espesores adecuados de acuerdo con la agresividad del ambiente a la que se verá expuesta la estructura de hormigón armado.

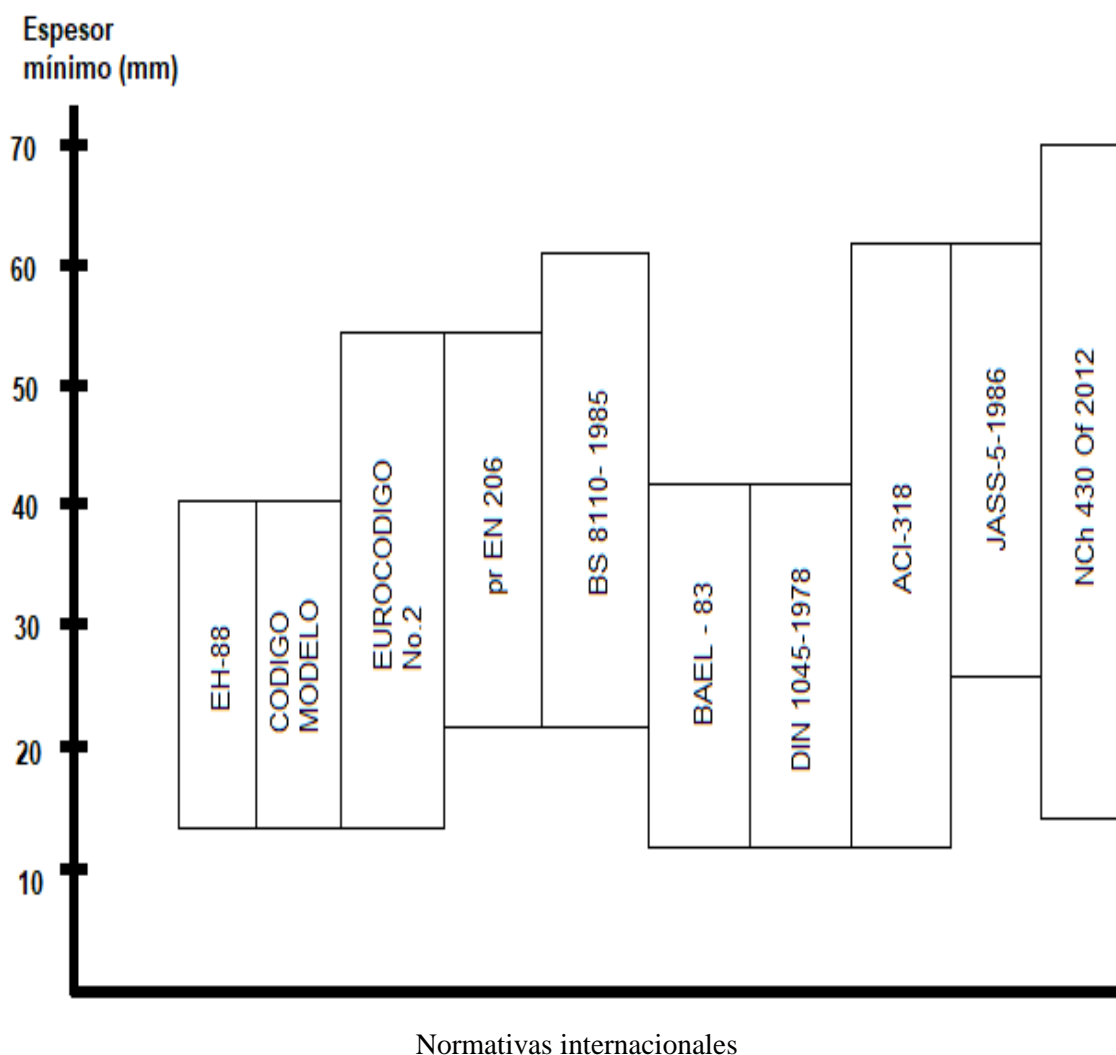


Figura 2.1 Valores de espesor de recubrimientos de armaduras contemplado en diferentes normas

Fuente: Red Durar, XV.B.2004

Sin embargo, es recomendable que este espesor sea el mínimo indispensable, debido a que por ser una zona desprovista de armadura esta puede verse afectada por la fisuración (esfuerzos de tracción). Por este motivo, las normas sugieren que en ambientes agresivos deba utilizarse una mezcla de buena calidad junto a un alto contenido de cemento y una baja relación A/C garantizando espesores de 2 a 3 pulgadas (5,0 – 7,5 cm), dando como resultado una alta durabilidad de la estructura (RedDurar, 2004).

2.5 Estado superficial del acero

En términos generales, el acero cuya superficie posea la cubierta de óxidos provenientes del proceso de conformando (“*mill scale*”) se presenta menos reactivo que aquel cuya superficie esté libre de esta capa. Sin embargo, las presencias de productos de oxidación generados por la corrosión atmosférica tienen una alta probabilidad de estar contaminados con agentes agresivos como el ion cloruro, propiciando la corrosión.

2.6 Iones despasivantes

De estos iones, son los cloruros los que más afectan directamente la pasivación de los refuerzos. Por otra parte, los iones sulfato intervienen en la degradación del hormigón, lo que puede permitir que la armadura quede expuesta al medio, generando así su corrosión.

2.6.1 Cloruros

Como ya se ha señalado, estos provocan una disolución localizada de la capa pasiva, dando lugar a ataques puntuales (picaduras) la cual puede apreciarse en la Figura 2.2, los cuales pueden reducir drásticamente la sección de trabajo, en espacios de tiempo relativamente cortos. Estos iones pueden encontrarse en la masa de hormigón por dos causas, la primera es que las materias primas ya los contengan (agua, aditivos, áridos o cemento), el segundo caso es porque penetran desde el exterior al estar la estructura expuestas a ambientes marinos, salinos o estar sometida a la acción de ciclos de hielo /deshielo.

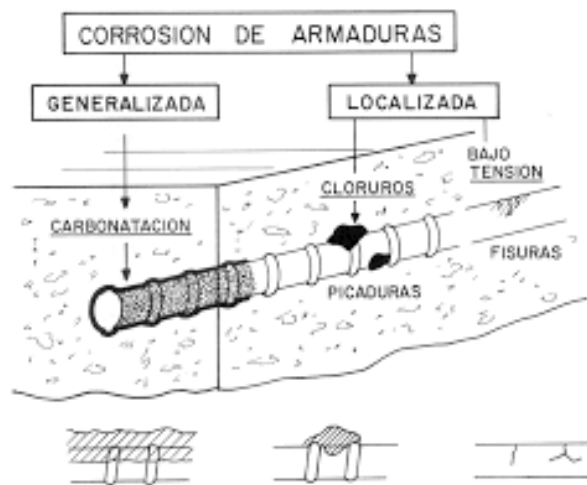


Figura 2.2 Tipos de corrosión de armaduras

Fuente: Red Durar, XV.B.2004

Por consiguiente, se han generado normativas respecto a los valores críticos de cloruros que pueden encontrarse en el cemento al momento de dosificar estructuras de hormigón armado, las que son señaladas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Valor crítico de cloruros en hormigones reforzados

País	Norma	Límite Máx. De Cl^-	Referido A
USA	ACI 318	\leq a 0.15% en ambiente de Cl^-	Cemento
USA	ACI 319	\leq a 0.30% en ambiente normal	Cemento
USA	ACI 320	\leq a 0.10% en ambiente seco	Cemento
Inglaterra	CP-110	\leq a 0.35% al menos en un 95%	Cemento
Australia	AS 3600	\leq al 0.22%	Cemento
Noruega	NS 3474	\leq al 0.06%	Cemento
España	EH 91	\leq al 0.40%	Cemento
Europa	EUROCODIGO 2	\leq al 0.22%	Cemento
Japón	JSCE-SP 2	\leq al 0.6 kg/m ³	Hormigón
Brasil	NBR 6118	\leq al 0.05%	Agua
Chile	NCh 170 Of 2016	1.2 Kg/m ³	Agua

Fuente: (Red Durar, XV.B,2004).

Respecto a la NCh 170 Of 2016 el contenido máximo de sulfatos en el hormigón, expresado como SO_4 , debe ser menor o igual que el 2% del peso del cemento y corresponde a la contribución total de los componentes del hormigón excluyendo el cemento.

Se pueden utilizar áridos y agua cuyos contenidos de sulfatos superen los valores máximos establecidos en NCh163 y NCh1498, siempre que el contenido máximo de sulfatos en el hormigón sea menor que lo establecido precedentemente.

Tres son los aspectos relevantes que tener en consideración en el caso de cloruros que penetren desde el exterior:

- El tiempo que tardan en llegar hasta la armadura
- La proporción que induce la despasivación
- La velocidad de corrosión que provocan una vez iniciada la corrosión

En cuanto a estructuras ya construidas lo importante es averiguar a que profundidad han penetrado en el momento de la inspección, debido a que el espesor de recubrimiento de hormigón debe ser superior a la profundidad que sean capaces de alcanzar estos iones (Carvajal, et al, 2010).

La velocidad de propagación de los cloruros es, por lo general, una función de la raíz cuadrada del tiempo, representada en la Ecuación 2.1.

$$VC = \frac{\text{Pérdida de masa del metal}}{\text{Superficie} * \text{Tiempo}}$$

Ec.2.1

Las unidades se pueden expresar de diversas maneras:

1. Como penetración de ataque, ya sea corrosión localizada o uniforme, expresada en $\mu\text{m/año}$ o mm/año , que se calcula a partir de la pérdida de masa y de la densidad del metal para obtener la profundidad del ataque P_x en μm (10^{-6}) o mm .
2. En $\mu\text{A/cm}^2$ a partir del uso de la Ley de Faraday que convierte las unidades de masa en unidades eléctricas. La expresión de dicha ley es la señalada en la Ec 2.2.

$$\frac{I*t}{F} = \frac{\Delta w}{W_m/z}$$

Ec.2.2

Donde:

I = Corriente eléctrica (Amperios)

t = Tiempo (s)

F = Constante de Faraday (96500 columbios)

Δw = Pérdida de masa (gramos)

W_m = Peso molecular del metal

Z = Valencia invertida

La equivalencia de unidades resulta ser:

$$1\mu\text{A/cm}^2 \Leftrightarrow 11,6\mu\text{m/año}$$

Ello es debido a que, en la mayoría de los casos, tanto los procesos de difusión pura como los de difusión capilar, siguen una ley potencial.

El cálculo de la concentración de cloruros es complejo debido a la multitud de parámetros que influyen (porosidad del hormigón, tipo de cemento, contenido de humedad, nivel de contaminación exterior).

Una de las expresiones matemáticas que más se emplea para efectuar la predicción de la velocidad de penetración, o para ser ajustada a los perfiles de concentración de cloruros encontrados en estructuras en servicio, la cual se ve más detallada en la Figura 2.2 es la solución de la segunda ley de Fick, representada en la ecuación 2.3 (Juarez & Castro, 2011).

$$\partial C / \partial t = -D \partial^2 C / \partial x^2$$

Ec. 2.3

Que se conoce como la ecuación de la función de error, señalada en la Ec. 2.4.

$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{Erf} \frac{XCl}{2\sqrt{D_{ap} t}} \right)$$

Ec. 2.4

C_x = concentración de cloruros a una profundidad X en un tiempo t , % en peso seco de muestra

C_s = Concentración de cloruros en el hormigón, % en peso seco de muestra

XCl = profundidad alcanzada, (cm)

D_{ap} = coeficiente aparente de difusión en estado no estacionario, (cm²/s)

Erf = Función de error de Gauss

t = tiempo de ensayo, (s)

Esta ecuación es de uso limitado dado el comportamiento no riguroso que presenta la penetración de cloruros en el hormigón.

Las razones de este comportamiento pueden ser varias, siendo una de ellas la carbonatación del recubrimiento. Dado que es sabido que las fases carbonatadas del hormigón no fijan los cloruros y muestran coeficientes de difusión D_1 mucho mayores, permitiendo así, que los iones de muevan rápidamente a través de la zona carbonatada y se acumulen en la interfase hormigón carbonatado/no carbonatado como se señala en la Figura 2.3.

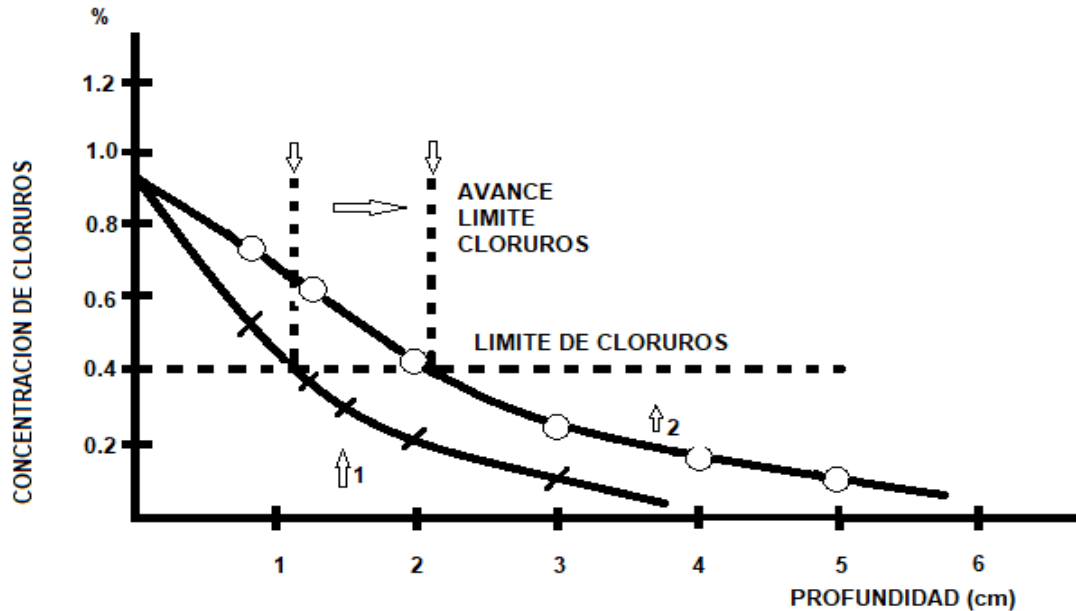


Figura 2.3 Perfil de concentración de cloruros en el hormigón

Fuente: Red Durar, XV.B,2004

2.6.2 Ataques por ácido

Estos ataques se presentan principalmente en condiciones de humedad donde el dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de carbono (CO_2), junto con otros vapores que se encuentran en la atmosfera, forman ácidos que atacan a las estructuras de hormigón, la cuales afectan directamente a la matriz cementicia, (carbonatación) (Ebensperger & Torrent, 2010).

La carbonatación de un hormigón es una de las causas que permite el inicio de la corrosión de los aceros en estructuras de hormigón armado y puede ser el principal mecanismo de deterioro de dichas estructuras, ya que, debido a la porosidad del hormigón, las condiciones de humedad relativa en el medio ambiente de exposición y los agentes contaminantes presentes en el aire permiten un rápido avance de la corrosión (Chávez-Ulloa et al., 2013).

Capítulo 3 Ensayos y equipamientos

3.1 Generalidades

En el presente capítulo se analizan los ensayos que se emplean comúnmente para evaluar la calidad de los hormigones, la homogeneidad, permeabilidad, espesores de recubrimiento en barras de refuerzo, potencial de corrosión del elemento evaluado.

3.2 Medidor espesor de recubrimiento Elcometer 331 Model BH

Este ensayo es para determinar el diámetro de la barra de acero embutida en el hormigón, junto con determinar el espesor de recubrimiento de esta.

En este ensayo se busca verificar en terreno si las estaciones de monitoreo de hormigón envejecido aun poseen el espesor de recubrimiento indicado en las especificaciones técnicas del proyecto Fondef, en las cuales se pudo presenciar la presencia de ninguna anomalía respecto del espesor de recubrimiento o picadura que pudiese generar expuestas a las armaduras de refuerzo. En la Figura 3.1 se observa los elementos que conforman el medidor de hormigón, es importante señalar que el detector puede ser utilizado tanto en forma vertical como horizontal, dependiendo de la dirección de las barras de refuerzo.



Figura 3.1 Medidor de hormigón Elcometer 331 Model BH
Fuente: Elaboración propia

En el uso del equipo Elcometer 331 BH, primero se debe seleccionar la función de medidor espesor de recubrimiento en el panel de control y colocar en “ZERO”. Una vez ya elegida esta opción se debe instalar el lector de metales. Posteriormente se procede a generar un barrido horizontal y vertical sobre la estación de monitoreo y

generar un mapeo de la disposición de las barras de refuerzos, armaduras y estribos. Finalmente, una vez identificada la barra se presiona el botón 0 del detector y tomar la lectura obtenida.

3.3 Medidor de media celda Elcometer 331 Model BH

En este ensayo se medirá en forma directa la diferencia de potencial eléctrico presentes en las barras de refuerzos embebidas en los muros de hormigones. Este ensaye es de carácter no destructivo. Al determinar los diferentes niveles de diferencial de potencial eléctrico (Figura 3.2) mediante el uso de tablas como la siguiente que se muestra en protocolo FONDEF que se adjunta en la Tabla 3.1.



Figura 3.2 Medidor de media celda Elcometer 331 Model BH
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.1 Norma ASTM C876

Ecarr vs Cu/CuSO ₄ (mV)	Riesgo	Estado de corrosión	Probabilidad de corrosión
(Más positivo) > - 200	Bajo	Pasivo	< 10 %
-200 a -350	Moderado	Transición activa – pasivo	Incierta
(más negativo) < -350	Alto	Activo	> 90 %

Fuente: ASTM C876

En el uso del equipo Elcometer 331 BH, primero se debe seleccionar la función de medidor de media celda en el panel de control y colocar en “ZERO”. No obstante, hay que dejar el cabezal de la sonda en una tapa de agua en un intervalo de 2 a 3 minutos para no generar errores en la toma de datos.

Una vez ya elegida esta opción se debe instalar la sonda de plata y los electrodos al equipo de manera que el electrodo negro se una al terminal negro de la figura 3.2 y la sonda y el electrodo rojo se instala con en el terminal rojo del equipo y el “caimán” se adhiere a la barra de acero expuesta.

Finalmente se procede a colocar la sonda en diferentes puntos de interés sobre la estación de monitoreo y poder levantar datos de potencial de corrosión en mV.

3.4 Ensayos para determinar homogeneidad

Este ensayo es para determinar el índice esclerométrico y la homogeneidad del hormigón.

En este ensayo se empleará para el hormigón endurecido, el cual no generará ningún tipo de daño sobre la estructura evaluada.

En la Figura 3.3 se observa los diferentes elementos que conforman el martillo Schmidt, a su vez es relevante indicar que el martillo puede ser utilizado de manera horizontal, inclinada al hormigón o superficie de contacto.

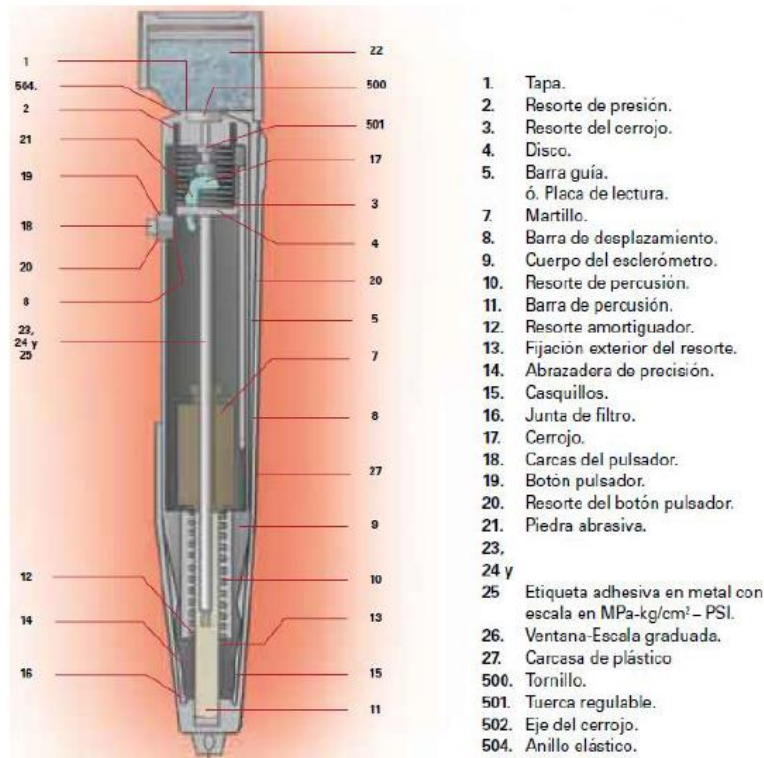


Figura 3.3 elementos que conforman el martillo Schmidt
Fuente: <http://procesoseinstrumentacionfcquach.blogspot.cl>

Según indica la norma NCh 1565 Of 2009, donde esta establece el procedimiento para determinar el índice esclerométrico del hormigón endurecido mediante el uso de un martillo de acero impulsado por resorte. Sin embargo, este procedimiento no es aplicable a la determinación de resistencias del hormigón, por consiguiente, no es alternativo respecto de los ensayos normales de compresión y tracción y por ningún motivo se puede emplear como base para la aceptación o rechazo.

3.5 Ensayo de permeabilidad al aire

Su introducción en las Normas Suizas SIA 262 y 262/1 constituye un paso fundamental hacia el empleo de conceptos de desempeño para especificar y controlar la durabilidad de las estructuras.

El ensayo de permeabilidad al aire es realizado para determinar la clase y grado de permeabilidad de un hormigón frente a la penetración de agentes externos.

Las mediciones se realizarán con el uso del “Método Torrent”, el cual consiste en la disposición instrumental del aparato que se encuentra en la Figura 3.4, en donde sus características distintivas son:

1. Una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda. El que consiste en una cámara interna “i” y una cámara externa “e”.

2. Un regulador de presión a membrana, cuyo fin es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$).

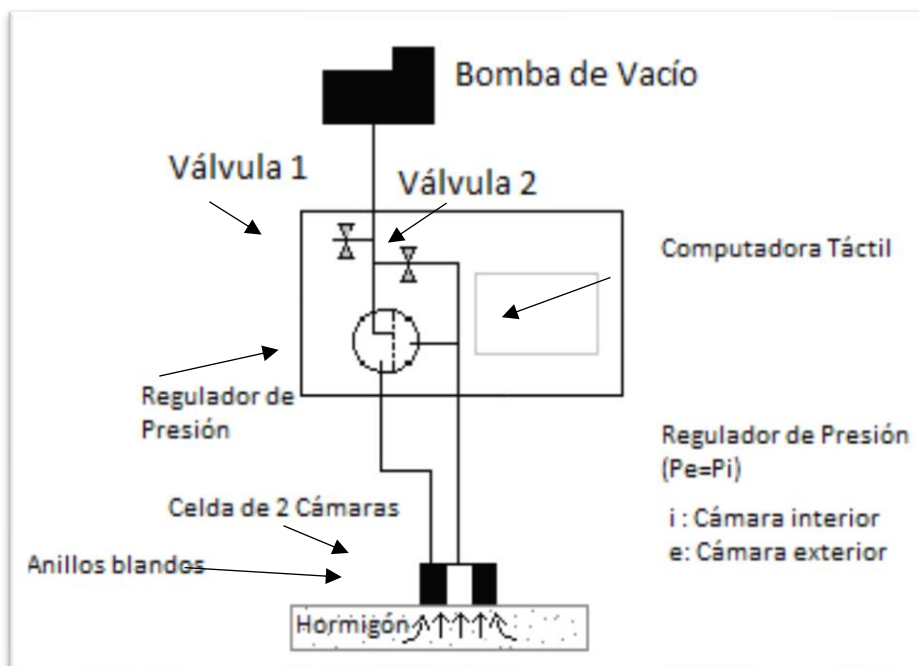


Figura 3.4 Esquema y detalle del método Torrent.

Fuente: Red Durar, XV.B 2004

Para el cálculo de los resultados de manera teórica se utiliza la ecuación 3.1 en donde kT es el coeficiente de permeabilidad al aire y para obtener la profundidad afectada por el ensayo “L” se utiliza la ecuación 3.2.

$$kT = (V_c/A)^2 \cdot \frac{\mu}{2\varepsilon P_a} \left[\frac{\ln\left(\frac{P_a + P}{P_a - P} \cdot \frac{P_a - P_0}{P_a + P_0}\right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2 \quad \text{E.c 3.1}$$

$$L = \sqrt{\frac{2 \cdot kT \cdot P_a}{\varepsilon \mu}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{E.c 3.2}$$

Dónde:

kT : coeficiente de permeabilidad al aire del recubrimiento (m^2)

μ : viscosidad dinámica del aire (Ns/m^2)

V_c : Volumen de la cámara interior (m^3)

A : Área de la cámara interior (m^2)

ϵ : Porosidad vacía del material (m^3/m^3)

p_0 : presión en la cámara interior al inicio de ensayo $t_0 = 60$ s (N/m^2)

p : presión en la cámara interior al final del ensayo t ($t \leq 720$ s) (N/m^2)

L : Distancia afectada por el ensayo (m)

p_a : presión atmosférica (N/m^2)

t : tiempo (s)

3.6 Ensayo de permeabilidad al agua

El ensayo consiste en el uso de una pipeta graduada con forma de L, llamada tubo Karsten, donde la base del tubo se fija a la superficie del sustrato a evaluar por medio de una masilla plástica como se indica en la Figura 3.5. Una vez instalado, se vierte agua destilada en su interior con el uso de un gotero para controlar la cantidad deseada.

Según sea la altura de la columna de agua destilada existente dentro del tubo, se ejercerá sobre la superficie del sustrato una presión equivalente al efecto de una lluvia acompañada de vientos cuya velocidad es posible calcular mediante la siguiente ecuación 3.3.

$$V (m/s^2) = (1600 \times q)^{0,5}$$

Ec 3.3

Donde:

V = Velocidad del viento (m/s)

q = Presión (kN/m^2)



Figura 3.5 Instalación de tubo Karsten
Fuente: Elaboración propia

La presión “q” se calcula con la ecuación 3.4.

$$q = \rho * g * h$$

Ec 3.4

Donde:

q= Presión (kN/m²)

ρ = Densidad del agua (kg/m³)

g= Aceleración de gravedad (m/s²)

h= Altura de columna de agua (m)

En la cual la presión “q” se expresa en (kN/m²). Considerando que 1 cm de altura de columna de agua destilada corresponde a una presión de 0.098 (kN/m²), es posible establecer las relaciones que se entregan en Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Relación altura de columna de agua a velocidad del viento

Velocidad del viento (km/h)	Altura columna de agua (cm)
50	2
100	5
140	9.5

Fuente: Ensayo permeabilidad al agua, Tubo Karsten, Revista Bit, septiembre 2011

Por lo general, el tubo se llena hasta que el nivel superior de altura de este alcance una altura de 5,0 cm, lo que equivale a la presión ejercida por una lluvia con vientos de 100 km/h.

La cantidad de agua absorbida por unidad de tiempo por parte de un sustrato poroso se mide directamente, efectuando la lectura en la escala que posee el tubo Karsten. Si la absorción es alta, se recomienda llenar el tubo una vez que la columna de agua ha descendido 1 cm, con el fin de mantener una presión más o menos constante.

Capítulo 4 Metodología de la investigación

4.1 Generalidades

En el presente capítulo se presenta la metodología utilizada para desarrollar los ensayos en terreno, para la elección de cada lugar, también se detalla los ensayos que se realizaran en laboratorio.

4.2 Secuencia metodológica

Con la finalidad de organizar de mejor manera los pasos necesarios que se deben realizar para desarrollar la investigación, es que estos han sido divididos en tres etapas (Figura 4.1), las cuales se detallan a continuación.

4.2.1 Etapa 1: Formulación de la Investigación

Esta etapa tuvo como objetivo establecer las bases teóricas de la investigación, las cuales dan un argumento que nos permitió desarrollar el diseño experimental, presentando los antecedentes bibliográficos de los cuales se desprende el planteamiento del problema, el cual se busca responder. Para ello, se hizo referencia a los principales mecanismos de deterioro de las estructuras de hormigón armado expuestas al ambiente marino, junto con indicar los aspectos que presentan mayor relevancia en la durabilidad del hormigón armado. También se realizó una revisión de algunas investigaciones en las cuales se buscó establecer especificaciones por desempeño y no resistencia mecánica.

4.2.2 Etapa 2: Diseño de la Investigación

En esta etapa se indagó en el diseño experimental necesario para llevar a cabo la investigación. Dentro de esta etapa se identificaron, determinaron, analizaron y seleccionaron las variables involucradas, los métodos para evaluar el potencial de corrosión de las barras de refuerzo, la permeabilidad del hormigón, la carbonatación del recubrimiento de concreto y otros ensayos relacionados con el propósito de establecer grados de exposición, junto con los requisitos para especificar el hormigón por durabilidad y no solamente por resistencia mecánica.

4.2.3 Etapa 3: Análisis y Evaluación

La tercera y última etapa tuvo por objetivo tomar los datos levantados en la etapa 2, los cuales una vez ya realizados, permitieron presentar los resultados obtenidos, para posteriormente realizar un análisis de los mismos y su correspondiente evaluación para verificar el cumplimiento de los objetivos y finalmente indicar conclusiones.

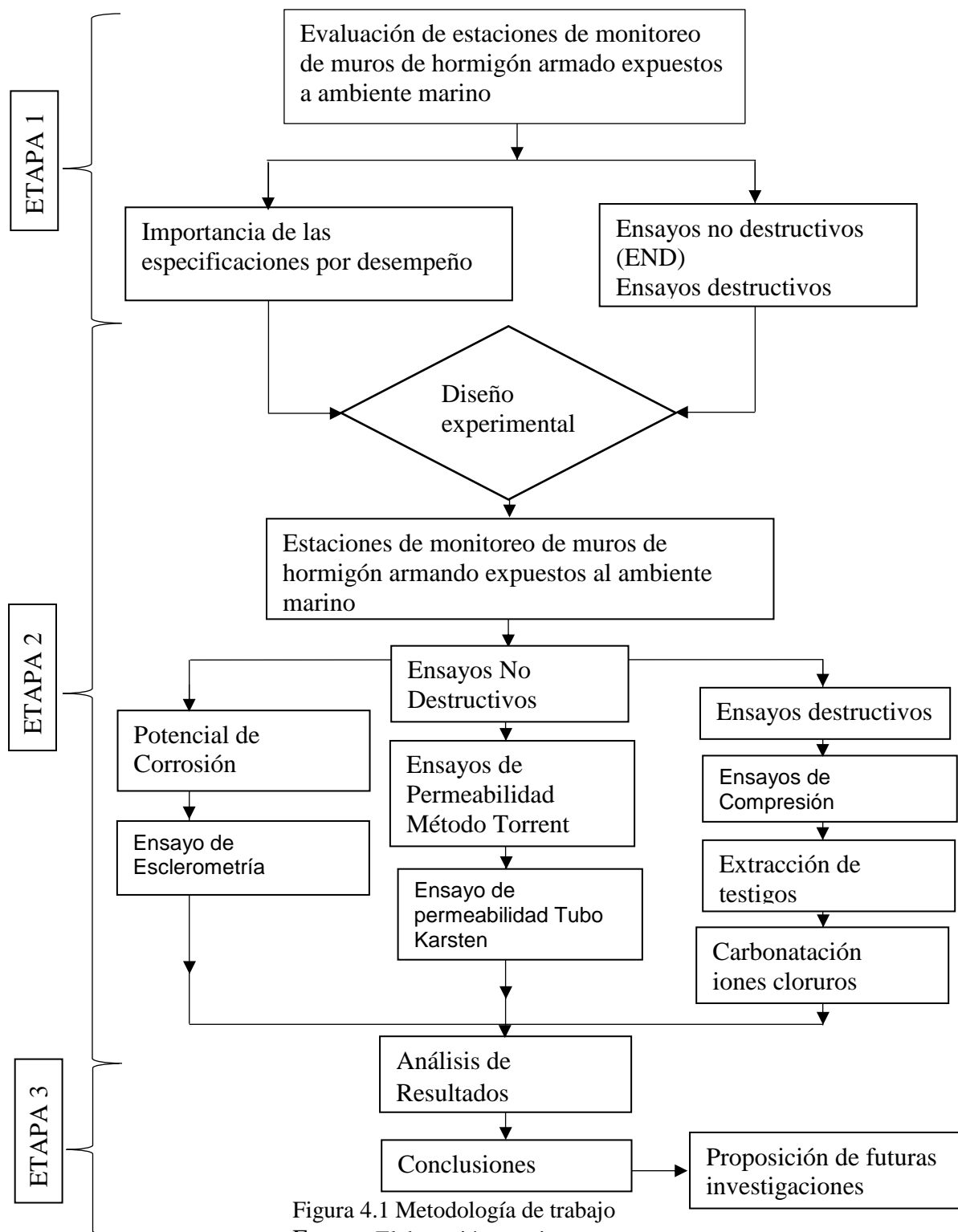


Figura 4.1 Metodología de trabajo
Fuente: Elaboración propia

4.3 Definición de estructuras de hormigón a utilizar

Para el estudio se definió el uso de dos estaciones de monitoreos confeccionada para el Proyecto (D07I1076, 2007) “Diseño e implementación de un Sistema de Especificación por Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado”, cuyo fin es clasificar a las estructuras de hormigón por durabilidad y especificaciones por desempeño frente a ambientes hostiles para los distintos componentes que conforman una estructura de hormigón armado. Dichas estaciones se encuentran ubicadas en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Valparaíso señalada en la Figura 4.2, en cuyas especificaciones técnicas se utilizó una relación de A/C 0,4 y 0,6 respectivamente: puestos en obra, los que se clasificaron por sus diámetros de barras y espesor de recubrimiento.

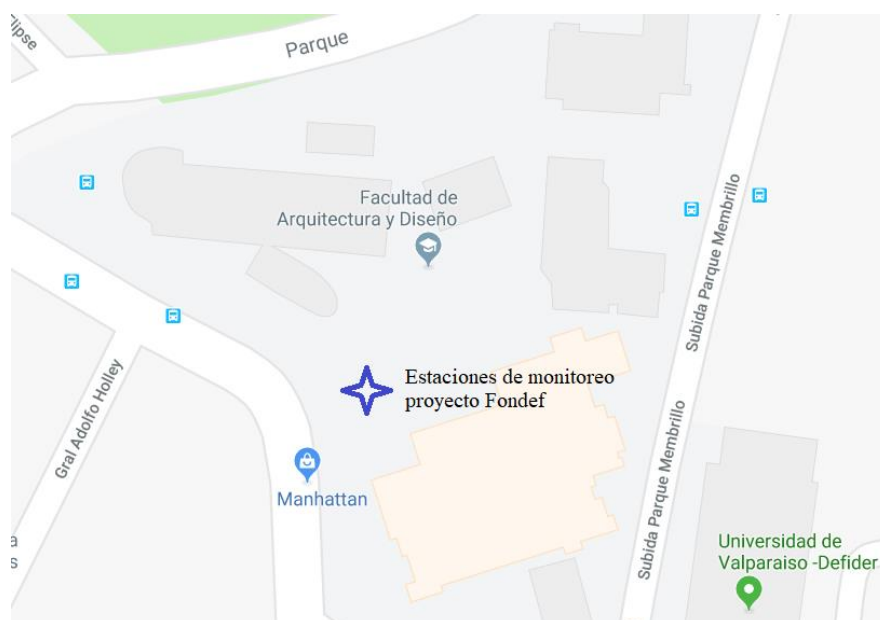


Figura 4.2 Ubicación de las estaciones de monitoreo Facultad de Arquitectura Universidad de Valparaíso Chile

4.3.1 Hormigón

El Hormigón de cimientos será el mismo para los dos muros a construir y consistirá en un hormigón con la siguiente dosificación por metro cúbico.

Tabla 4.1 Dosificación estación monitoreo Proyecto Fondef

Material	Tipo	Kg
Cemento	Cemento portland puzolánico	350
Agua	Potable	175
Gravilla	Chancada	780
Arena	Chancada	1045

Fuente: Proyecto Fondef D07I1076 – IT –h– 05

El emplazamiento exacto de estos elementos fue definido considerando que la cara de ensayos debe estar orientada al poniente y a más de 30 metros de distancia de cualquier edificación, estando alineados entre sí y separados entre cantos a 1,10 metros, en terrenos previamente nivelados.

Los planos de referencia y detalles se caratulan G01, G02 y G03 de fecha 30.07.2010 y se complementan con estas especificaciones.

Los muros (A y B) contemplan diferentes clases de Hormigón entre sí definidos más adelante, y sus dimensiones son de 0,20 m de espesor, 2,90 m de largo y 1,70 m de alto, sobresaliendo 1,60 m del nivel del terreno circundante.

La calidad del acero a usar es A63-42H, de primer uso, libre de todo tipo de contaminación por aceites u otros, y exento de óxidos o signos evidentes de corrosión.

En la vista de elevación Poniente se dispondrá de una marca de Orientación en el extremo superior derecho en bajo relieve de \varnothing 5 cm y 1 cm de profundidad.

4.4 Lugar de muestreo

A continuación, se presentan las estructuras (edificación) que fueron evaluadas en el estudio.

Se utilizó las actuales estaciones de monitorio que se encuentran en la facultad de Arquitectura de la Universidad de Valparaíso, las cuales delimitan con el cierre de calle AV. Playa Ancha, según nos indica en la Figura 4.3. No obstante se realizaron tres mediciones por barra a las alturas de 10, 60 y 110 cms como se aprecia en la Figura 4.3, las cuales se ven representadas por círculos rojo, amarillo y azul respectivamente. No obstante, cabe señalar que las alturas seleccionadas se consideraron desde la corona del muro hacia abajo.



Figura 4.3 Estación de monitoreo A Facultad de Arquitectura, Playa Ancha Valparaíso
Fuente: (Bustos, 2011) Understanding Performance of Concrete using natural pozzolans against Corrosion

4.5 Determinación de espesor de recubrimiento

Para este ensayo se utilizó el equipo Elcometer 331 Model B-Model BH, el cual permite determinar la ubicación de las barras de acero, medición del potencial de corrosión y media celda de las barras de acero embebidas en las estaciones de muestreo.

Como fue señalado en el punto 4.4 las mediciones fueron marcadas sobre las estaciones de monitoreo como se aprecia en la Figura 4.4



Figura 4.4 Demarcación de zonas de trabajo
Fuente: Elaboración propia

Debido a que el procedimiento exige una superficie limpia y seca se procedió a la remoción de los restos de pintura presentes sobre la estación, permitiendo la lectura para los ensayos de espesor de recubrimiento y potencial de corrosión respectivamente.

La superficie de contacto, antes de realizar el ensayo, debió ser lijada y limpiada, ya que esta presentaba salpicaduras de hormigón a lo largo de todo el muro, marcas de pinturas en aerosol, las que fueron quitadas con el uso de una lija de mano N° 400 y el uso de una hela espatulada, permitiendo obtener una superficie lisa y limpia.

Una vez limpia las zonas de trabajo se procedió a identificar todas las barras de refuerzos y estribos como se puede apreciar en la Figura 4.5, para así poder determinar de que cada barra de refuerzo cumpliera con las especificaciones técnicas estipuladas para cada estación de monitoreo respecto al tipo de diámetro de barra de refuerzo, distancia entre estribos y espesor de recubrimiento para cada barra.



Figura 4.5 Detección de armaduras y espesores de recubrimientos

Fuente: Elaboración propia

Además, se realizó un mapeo de cada estación de monitoreo con el objetivo de saber la configuración real de sus barras y estribos para no ser cortados durante la extracción de testigos.

A modo de recomendación para el uso de este equipo es verificar de antemano el nivel de audio del detector de metales con los auriculares del equipo, el cual puede producir un ruido muy agudo al momento de detectar una barra de acero que resultara desagradable para algunos usuarios.

4.6 Medición de media celda

En primera instancia se debe verificar que el equipo (Elcometer Model BH) este en el modo de medidor de media celda, para luego instalar el electrodo y la barra de medición como nos indica la Figura 4.6.

Además, es necesario que la punta de la barra de medición sea sumergida en agua potable durante un lapso de 2 a 3 minutos, lo cual nos mejorara la sensibilidad del equipo y permitiendo una jornada de trabajo de 10 hrs aproximadamente.



Figura 4.6 Medición de potencial de corrosión
Fuente: Elaboración propia

El equipo será armado e instalado según lo descrito en la sección 3.3, poniendo especial cuidado en que las mediciones se realizaron conectando el “caimán” a los extremos expuestos de las 12 barras a evaluar, en donde se levantó 3 mediciones por barra, las que se realizaron de manera directa en los puntos señalados en la Figura 4.7 (colocando directamente la cabeza de la barra de plata sobre los puntos a evaluar).

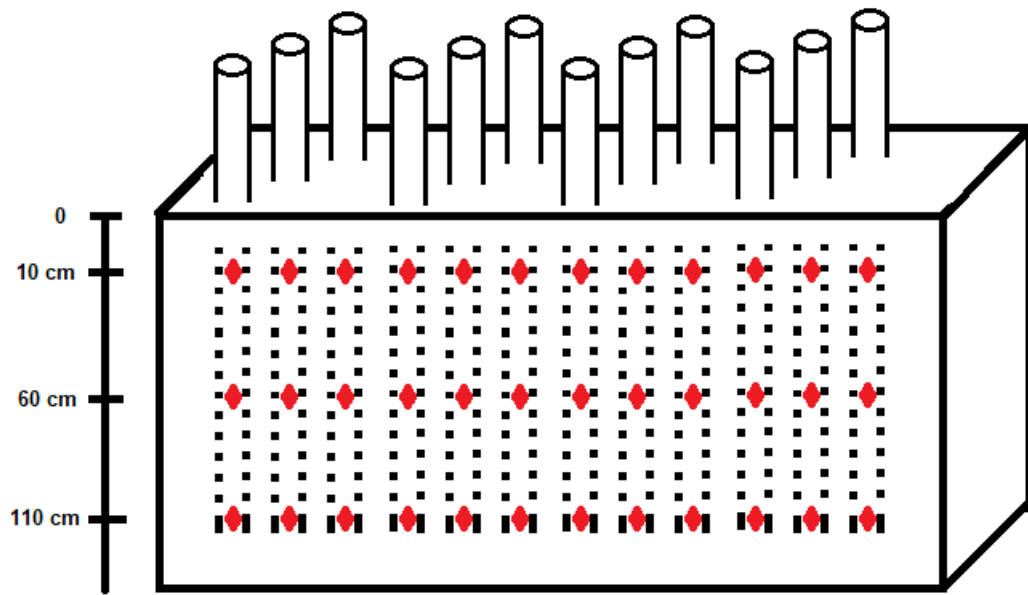


Figura 4.7 Determinación zonas de muestreo A y B para determinar espesor de recubrimiento y potencial de media celda
Fuente: Elaboración propia

4.7 Ensayo permeabilidad al aire

La operación del método Torrent es de la siguiente manera:

En primera instancia se debe determinar las zonas de muestreos como se indica en la Figura 4.8, las cuales fueron limpiadas y pulidas para generar una superficie lisa y sin ninguna protuberancia extraña, mediante el uso de lijas, espátula y los elementos de protección personal.

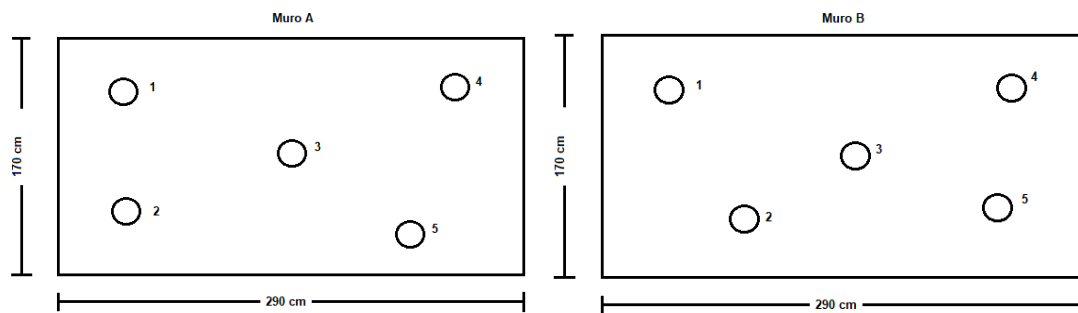


Figura 4.8 Esquema de lugar de muestreo en muros de hormigón armado para permeabilidad al aire, Facultad de Arquitectura, Universidad de Valparaíso Chile.
Fuente: Elaboración propia

Luego se procede a montar el equipo como indica la Figura 4.9 teniendo especial cuidado de verificar que el nivel de aceite de motor se encuentre por sobre el mínimo y no sobrecalentar el equipo.



Figura 4.9 Instalación equipo Torrent
Fuente: Elaboración propia

Después se procede a la calibración del equipo, el cual consiste en colocar la cámara de vacío sobre un rectángulo de policarbonato, el cual está estandarizado para realizar mediciones cercanas a 0 o equivalente a una succión total. Una vez calibrado se procede a nombrar el tipo y número de lote, los cuales serán guardados en la memoria del equipo.

Finalmente se procedió a colocar la cámara de vacío en el primer de los puntos a medir y se esperó un lapso de 0 a 720 segundos, en donde el equipo arrojara diferentes datos, de los cuales el más importante es el coeficiente de permeabilidad, el que se comparará con la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de KT

Clase	KT($10^{-16}m^2$)	Permeabilidad
PK1	< 0.01	Muy Baja
PK2	0.01 - 0.1	Baja
PK3	0.1 - 1.0	Moderada
PK4	1.0 - 10	Alta
PK5	>10	Muy Alta

Fuente: (Ebensperger & Torrent, 2010)

Cabe señalar que mientras más bajo fue el coeficiente de permeabilidad la lectura se generó en un intervalo de 600 a 720 segundos, por el contrario, a un mayor coeficiente de permeabilidad se obtuvieron lecturas en el orden de los 150 a 200 segundos.

Por último, se recopiló la información total de cada prueba, las que se pueden visualizar en anexos en la Tabla N°A.5.

4.8 Ensayo de permeabilidad al agua

El ensayo descrito consistió en el uso de un tubo en forma de "L" de 1 cm² de sección el cual se acopla a un paramento vertical y sujeto mediante una masilla impermeable. El tubo cuenta con una graduación en milímetros en la vertical. Tras llenar el tubo con agua se toma la medición del agua absorbida cada minuto.

Donde se propone un grado de permeabilidad en función del agua que penetra en 10 minutos según la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Grado de permeabilidad en función de penetración de agua

Penetración en cm ³ en diez minutos	Estimación
Más de 3.0	Permeabilidad muy Alta
De 2.4 a 3.0	Permeabilidad Alta
De 1.0 a 2.4	Mediana Permeabilidad
De 0.4 a 1.0	Baja Permeabilidad
De 0.2 a 0.4	Impermeabilidad Relativa
De 0.1 a 0.2	Impermeable
Menos de 0.1	Sin Actividad Capilar

Fuente: (Fernandez, 2011) Ensayo de permeabilidad en fachadas tubo en L o tubo Karsten

Las mediciones de absorción se realizaron en intervalos: 0,1,5,10 y 20 minutos respectivamente, tomando el nivel de agua en cada lapso. Del cual se pudo apreciar una baja o nula absorción por parte de las estaciones de monitoreo esto puede ser a causa de su baja relación de agua/cemento, como una buena preparación, traslado, instalación y curado del hormigón, el cual arrojó como producto una capa cementicia homogénea, la cual no permite el paso del agua.

Por último, con los datos obtenidos en terreo se procedió a la determinación de promedios entre los datos y generar gráficos de absorción en función del tiempo.

4.9 Ensayo de esclerometría

En primera instancia se procedió a generar un cuadrante de 10 puntos equidistantes entre sí con intervalos de 5 cm para luego proceder a utilizar el martillo Schmidt de forma perpendicular a la estructura como se aprecia en la Figura 4.10.



Figura 4.10 Uso del martillo Schmidt
Fuente: Elaboración propia

Una vez ya determinada las zonas de trabajo se coloca el martillo sobre 1 de los 10 puntos señalados en la Figura 4.11 de la cuadrilla de trabajo para posteriormente realizar 10 golpes. Con estas mediciones se generó tablas y gráficos que permiten estimar una resistencia a compresión de manera parcial.

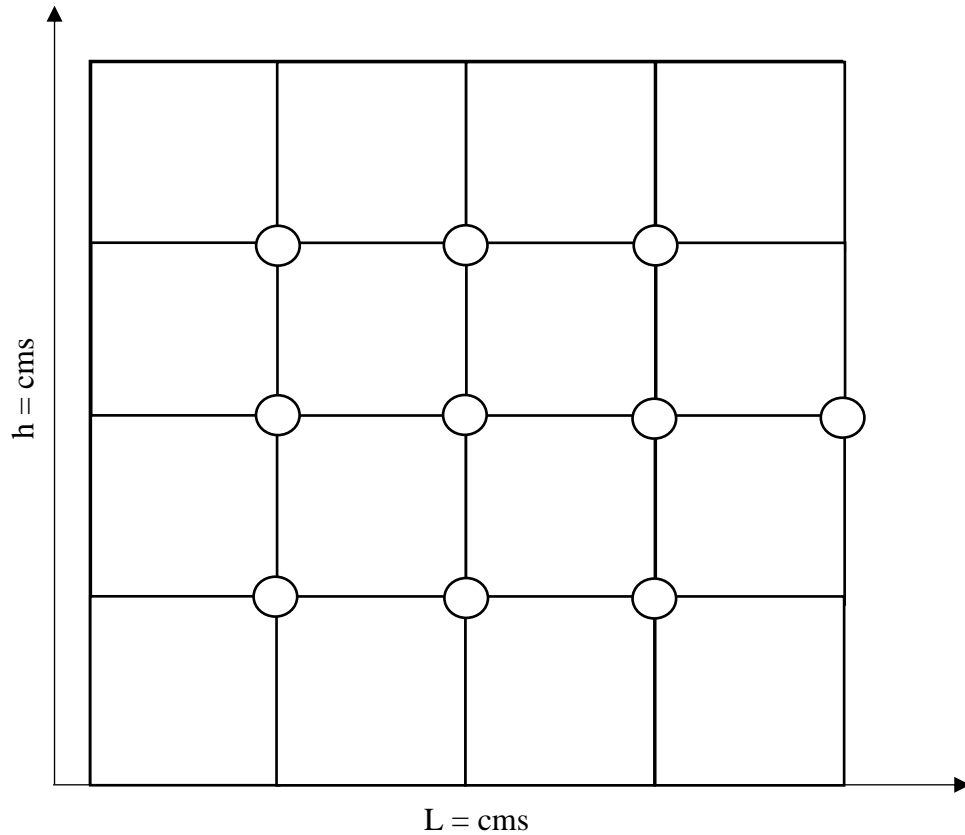


Figura 4.11 Posicionamiento puntos de medición
Fuente: Elaboración propia

4.10 Extracción de testigos

Los testigos extraídos de las estaciones de monitoreo eran de forma cilíndrica. Sobre los cuales se les realizaron los siguientes ensayos según su diámetro indicados en la Figura 4.12, siguiendo los procedimientos de extracción establecidos en la NCh 1171/1 Of 2001.

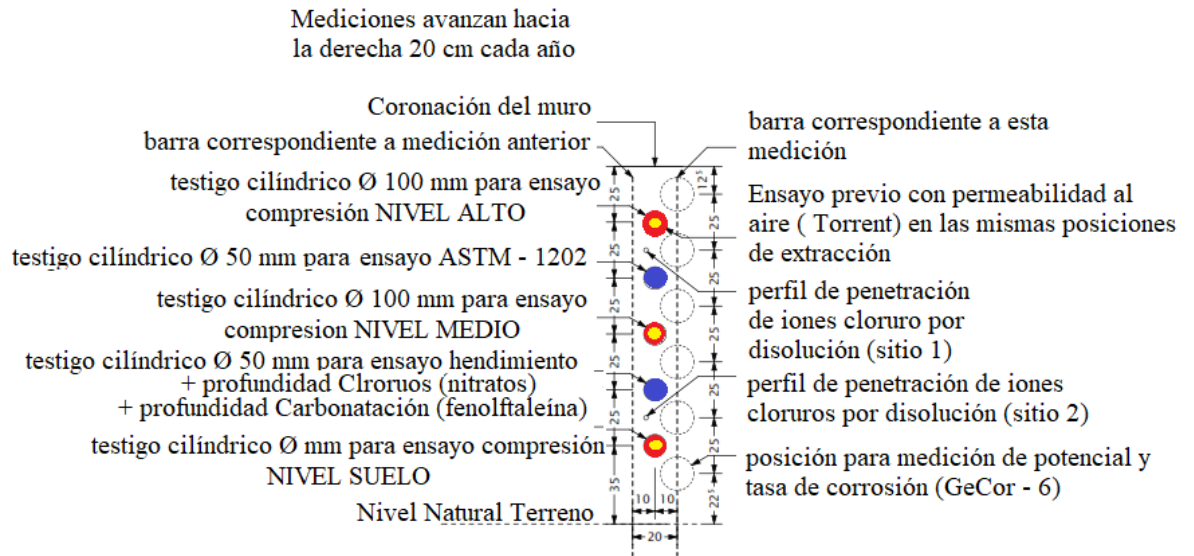


Figura 4.12 Zonas ensayos y extracción de testigos
Fuente: Proyecto Fondef D07I1076 – IT –h– 05

- Testigos compresión (sobre el testigo se medirá carbonatación y penetración)
- Testigos perfil Cl-
- Permeabilidad a aire, Karsten

Como se indicó en el punto 4.5 (Determinación de espesores de recubrimientos), se prestó un especial cuidado en determinar la ubicación exacta de cada barra de acero y estribo, con el propósito de evitar cortar alguno de los elementos anteriormente mencionados y así no afectar la estabilidad de la estructura ni permitir la exposición de las barras al ambiente marino, el cual al largo plazo afectara en futuras mediciones de potencial de corrosión.

La ubicación del lugar de extracción de cada testigo dentro de la zona se debe escoger de acuerdo con el objetivo del estudio. Una vez extraídos los testigos, se deben marcar de inmediato en forma superficial e indeleble sin alterar sus características, de modo que puedan ser identificados en cualquier momento.

Al iniciar la preparación, se debe dejar constancia de las características visibles más importantes que puedan afectar las resistencias mecánicas del hormigón, como segregación, fisuras, porosidades, nidos de piedra, inclusiones extrañas, daños por el proceso de extracción u otros.

Por último, como se puede apreciar en la Figura 4.13 los testigos fueron extraídos desde la parte inferior hacia la superior con el objetivo de evitar la saturación de las muestras por la constante caída de agua utilizada en la refrigeración de las brocas de extracción.



Figura 4.13 Extracción de testigos
Fuente: Elaboración propia

4.10.1 Resistencia a compresión

Se realizó el ensayo de compresión a los testigos extraídos de las estaciones de monitoreo, los cuales tienen dimensiones de 100 milímetros de diámetro y 20 cm de largo. Por cada muro se extrajeron 3 testigos con las dimensiones anteriormente mencionadas, los cuales están posicionados como se señaló en la Figura 4.12.

A efectos de su preparación, se debe tener presente que no se pueden someter a ensayo de compresión, los testigos que tengan:

- Armaduras paralelas o inclinadas respecto del eje de carga:
- Se debe evitar la presencia de cualquier tipo de armadura u otro elemento (tubos, cañerías, bolón desplazador u otros insertos en general) en el testigo y, en caso de no ser posible, un especialista debe evaluar si se somete a ensayo. Si se detecta su presencia una vez ensayado el testigo, se debe dejar constancia de este hecho en el informe.

Determinar la ubicación de la armadura y el espesor de recubrimiento empleando el procedimiento Fondef. Seleccionar la zona donde será extraída la muestra representativa del hormigón, generalmente es la zona con mayor exposición al ambiente agresivo.

A continuación, y previo a cualquier otra operación, se debe cortar los extremos de cada testigo mediante un equipo de sierra diamantada estacionaria como se muestra en la Figura 4.14.



Figura 4.14 Corte de testigos
Fuente: Elaboración propia

El corte realizado en los testigos debe ser lo más perpendicular al eje vertical de la muestra. No obstante, es de gran importancia del largo final de la probeta, ya que de este valor se debe determinar el coeficiente de corrección según la norma NCh 1171/1 Of 2001.

Posteriormente se procede al refrentado de las caras cortadas de la testigo apreciada en la Figura 4.15 con la finalidad de dejar las caras lisas y niveladas del testigo para proceder a introducirlo en la maquina compresora

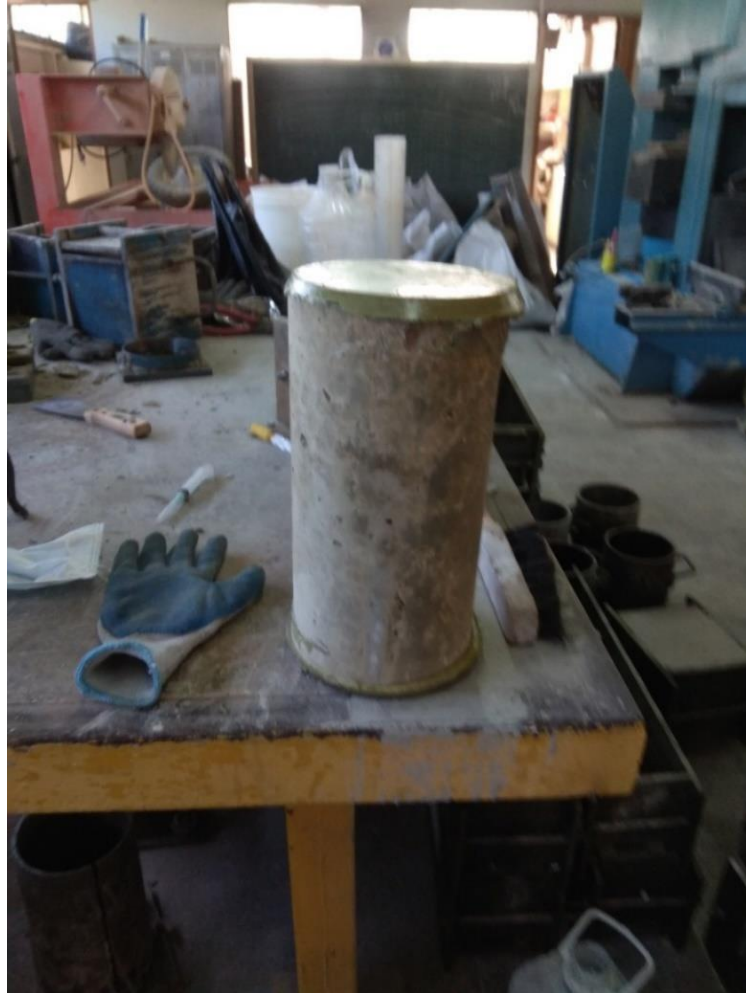


Figura 4.15 Refrentado de testigos
Fuente: Elaboración propia

Finalmente se obtienen los datos del ensayo a compresión de las tres muestras por cada estación de monitorio, arrojando un total de 6 ensayos los que nos permiten determinar de forma más precisa la resistencia a compresión de cada elemento.

4.10.2 Carbonatación in-situ

La Figura 4.16 nos indica el diagrama de flujo del ensayo de carbonatación.

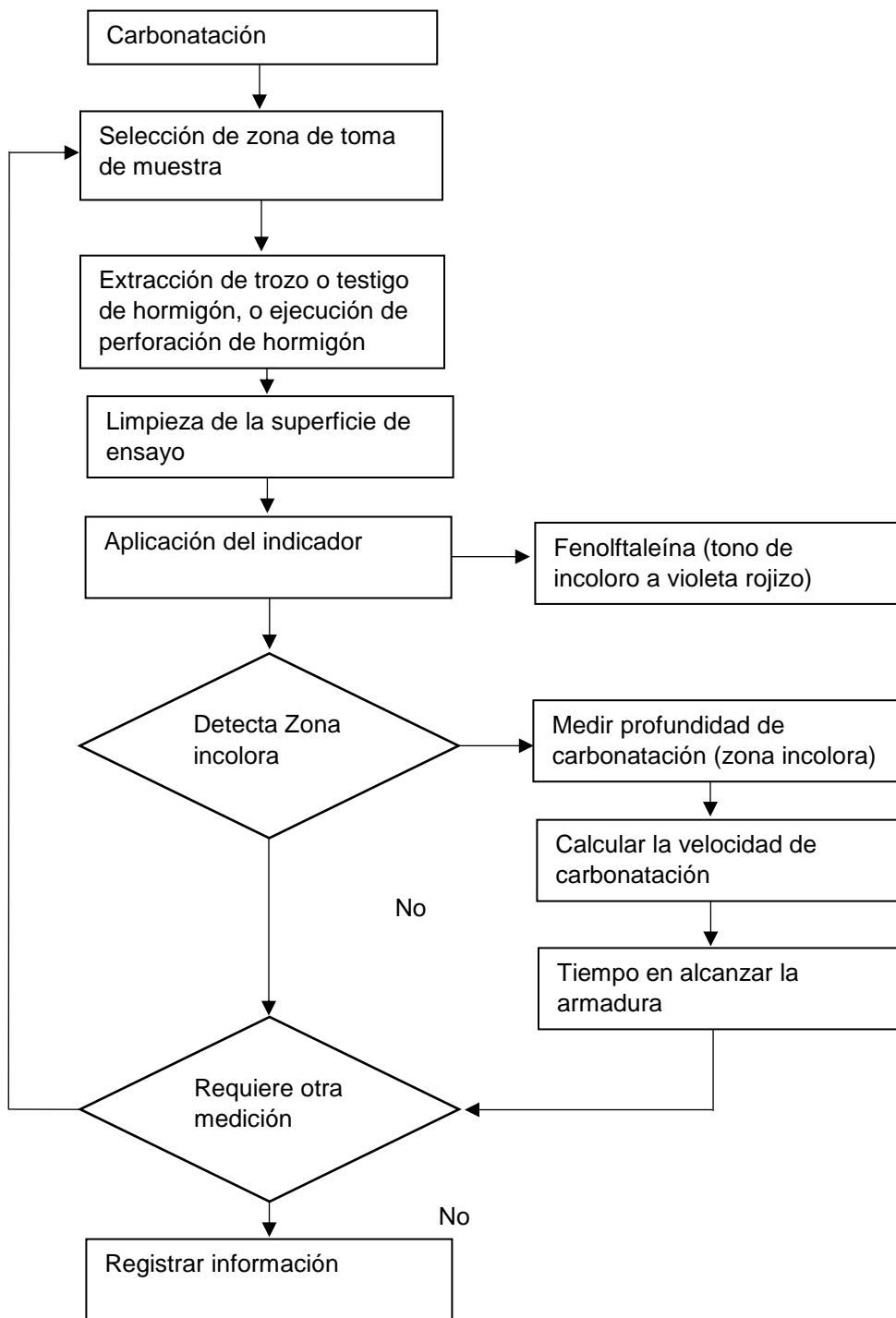


Figura 4.16 Diagrama de flujo carbonatación
Fuente: Fondef DO7I1076-IT-h-04 Carbonatación

La preparación de la solución indicadora, fenolftaleína (1g de fenolftaleína + 49 g de alcohol + 50 g de agua) debe ser realizada con anticipación a la ejecución del ensayo. La solución se debe transportar y mantener en envases herméticos evitando derrames y contaminación.

La aplicación del indicador (Fenolftaleína) no debe demorar más de 15 minutos de extraída la muestra. De preferencia la aplicación del indicador debe ser realizada por atomización.

Como los testigos tienen un proceso extractivo en estado húmedo, se debe limpiar la superficie de la probeta retirando el agua como el sedimento producto del corte. En el caso, del trozo de hormigón y de la perforación se debe quitar todo el polvo y residuos sueltos de la superficie del hormigón.

Dejar actuar la solución por algunos minutos y observar si la superficie del hormigón se torna incolora en su totalidad o en alguna de sus partes. Medir y anotar la profundidad de carbonatación, la cual corresponderá a la superficie que presentó el tono incoloro, así como la ubicación de la zona o punto de ensayo como se muestra en la Figura 4.17.



Figura 4.17 Aplicación de fenolftaleína sobre testigo
Fuente: Elaboración propia

Cabe considerar que, la fenolftaleína es el indicador más empleado y presenta un rango de viraje entre pH 8,2 y pH 9,8.

La profundidad de carbonatación corresponderá al promedio aritmético de la mayor cantidad de medidas de máximos y mínimos, dependiendo del tamaño de la probeta. Ver Figura 4.18.

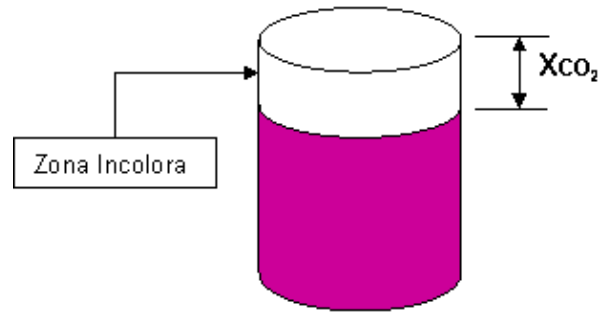


Figura 4.18 Tinción por Fenolftaleína
Fuente: Elaboración propia

Donde la velocidad de carbonatación puede ser calculada de la siguiente expresión:

$$KCO_2 = XCO_2 (t_0^{-0.5}) \text{ (mm/año}^{0.5}) \quad \text{Ec 4.1}$$

Donde:

KCO_2 : Constante o velocidad de corrosión (mm/año^{0,5})

XCO_2 : Profundidad de carbonatación (mm)

t_0 : Tiempo desde la fecha de construcción a la fecha de ensayo (años)

Con el valor obtenido anteriormente, es posible predecir el tiempo que demorará la carbonatación en alcanzar la armadura, según la siguiente expresión.

$$t = (e_c / KCO_2)^2 \text{ (años)} \quad \text{Ec 4.2}$$

Donde:

KCO_2 : Constante o velocidad de corrosión (mm/año^{0,5})

e_c : Espesor de recubrimiento (mm)

t : Tiempo total para que la carbonatación alcance la armadura (años)

Finalmente, con los datos obtenidos de las ecuaciones 4.1 y 4.2 se procede a clasificar la carbonatación según la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Resistencia a la carbonatación

Kco_2 (mm/año ^{0,5})	Resistencia a la carbonatación
≤ 3	Alta
$6 > Kco_2 > 3$	Moderada
≥ 6	Baja

Fuente: Fondef DO711076-IT-h-04 Carbonatación y penetración de Cl-

4.10.3 Ion cloruro

La Figura 4.19 no indica el diagrama de flujo del ensayo penetración de cloruros.

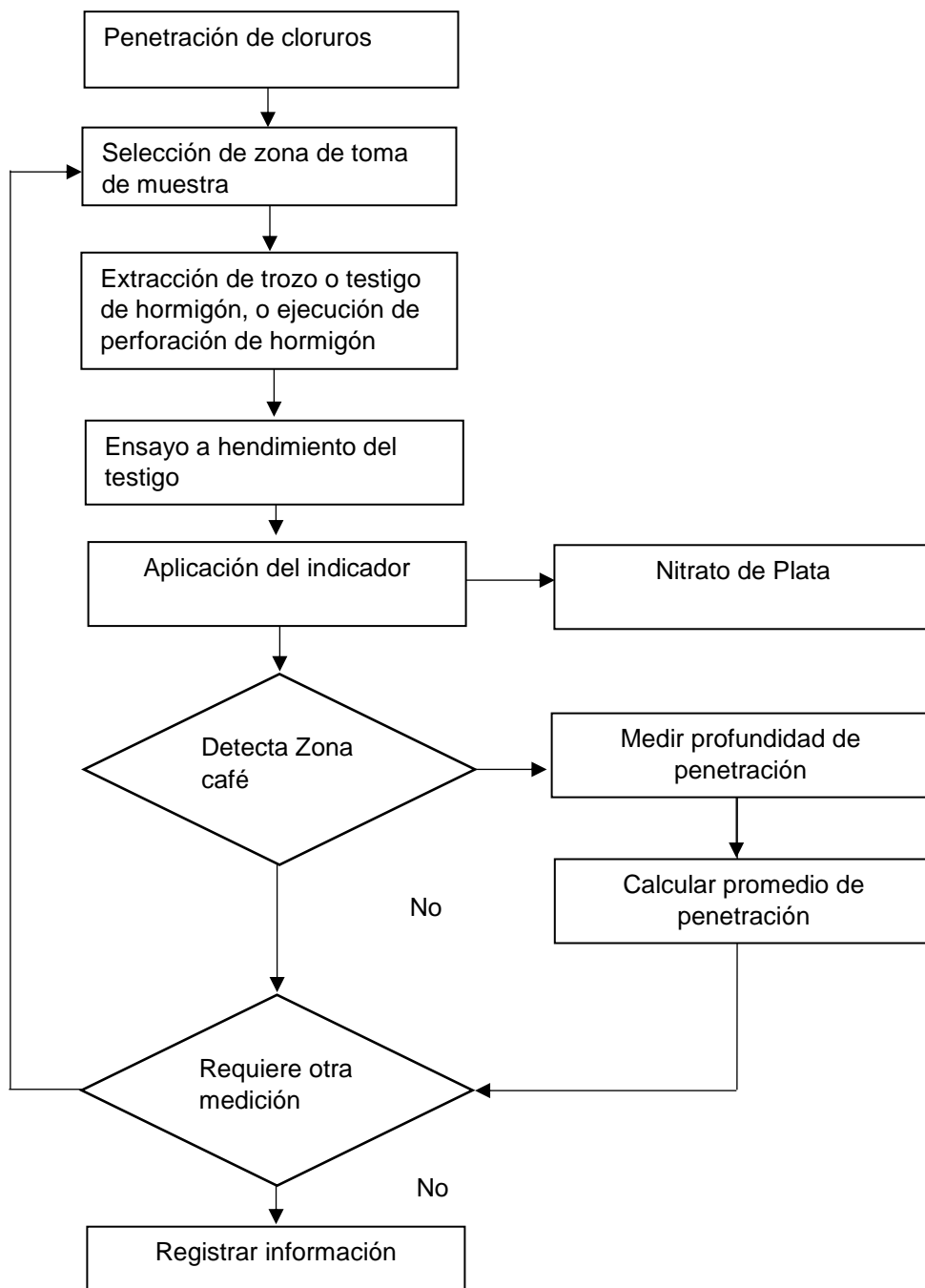


Figura 4.19 Diagrama de flujo ión cloruro
Fuente: Fondef DO7I1076-IT-h-04

Este ensayo se realizó a cada uno de los testigos de 50 milímetros de diámetros extraídos de las cada una de las estaciones de monitoreo in situ situadas en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Valparaíso, aplicándoles nitrato de plata.

La preparación de la solución indicadora, nitrato de plata, debe ser realizada con anticipación a la ejecución del ensayo.

- Con una concentración de 0,1N (Solución normalizada de nitrato de plata 0,1N (AgNO_3) 17 g de AgNO_3 p.a.), disolver con agua destilada y llevar a 1000ml. Por último, traspasar la solución a frasco oscuro con tapón de vidrio, para protegerla de la luz.

Como los testigos tienen un proceso extractivo en estado húmedo, se debe limpiar la superficie de la probeta retirando el agua como el sedimento producto del corte. En el caso, del trozo de hormigón y de la perforación se debe quitar todo el polvo y residuos sueltos de la superficie del hormigón.

La extracción de los testigos se realizará de acuerdo con los procedimientos indicados en la norma NCh 1171/1 Of 2001. Dicho elemento deberá tener una longitud mínima de 15 cm. De los antecedentes entregados de la estructura o elemento de hormigón debe obtenerse la edad del hormigón o tiempo de construcción de la estructura.

La aplicación del indicador (nitrato de plata) debe realizarse en laboratorio mediante un atomizador, sobre toda superficie plana interior del testigo que quedó expuesta. Dejar actuar la solución por algunos minutos y observar si la superficie del hormigón se torna más clara (más blanca). Dicha zona corresponde a la zona afectada por cloruros. La zona no afectada tendrá el color del hormigón o una tonalidad más gris como se señala en la Figura 4.20.



Figura 4.20 Aplicación de nitrato de plata sobre testigo
Fuente: Elaboración propia

Medir y anotar la profundidad de penetración de cloruros, la cual corresponderá a la superficie que presentó el tono más blanco, así como la ubicación de la zona o punto de ensayo.

Se acepta que el comportamiento de difusión de cloruros es similar al de difusión de CO₂.

Calcular el coeficiente de difusión de cloruros mediante la siguiente expresión representada en la ecuación 4.3.

$$K_{Cl^-} = X_{Cl^-} (t_0)^{-0,5} \quad (\text{mm/año}^{0,5})$$

Ec 4.3

Donde:

K_{Cl^-} : Coeficiente de difusión de Cl⁻ (mm/año^{0,5})

X_{Cl^-} : Profundidad de penetración de cloruros (mm)

t_0 : Tiempo desde la fecha de construcción a la fecha de ensayo (años)

Finalmente se procede a clasificar la penetración del ion cloruro según la tabla.

Tabla 4.5 Resistencia a la penetración de Cl⁻

K_{Cl^-} (mm /año ^{0,5})	Resistencia a la penetración de Cl ⁻
≤ 3	Alta
6 > K_{Cl^-} > 3	Moderada
≥ 6	Baja

Fuente: Fondef DO711076-IT-h-05 Cloruros

Capítulo 5 Presentación y análisis de resultados

5.1 Generalidades

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos de la aplicación de los distintos ensayos considerados para la investigación. En primera instancia, se realiza la determinación del espesor de recubrimiento y potencial de corrosión presente en las barras de refuerzo, mediante el uso del equipo Elcometer 331 Model-BH. Posteriormente se presenta la recopilación de resultados de permeabilidad al aire y al agua, donde se aplicó el método Torrent y tubo Karsten respectivamente. También se presentan los resultados y análisis respecto al ensayo esclerométrico. Finalmente se presentan y analizan los resultados de los ensayos de carbonatación, penetración de cloruros aplicados a los testigos extraídos.

5.2 Determinación espesor de recubrimiento

En el desarrollo de este ensayo se tuvo que verificar los distintos espesores de recubrimiento para cada una de las doce barras de refuerzo en cada una de las estaciones de monitoreo, con el objetivo de verificar el cumplimiento de las especificaciones técnicas. Además de generar un mapeo exacto de todos los elementos de acero (barras de refuerzos, estribos) con el fin de evitar dañarlos o cortarlos en el proceso de extracción de testigos.

De lo anterior se pudo verificar que la gran mayoría de barras posee el espesor de recubrimiento solicitado por las especificaciones técnicas señaladas en el punto 4.3.1, pero existen dos barras las cuales fueron identificadas como Barra N°3 y Barra N°12 las cuales presentan un mayor espesor de recubrimiento, llegando a alrededor de 52 mm de espesor la cual se puede apreciar en la Figura 5.1.

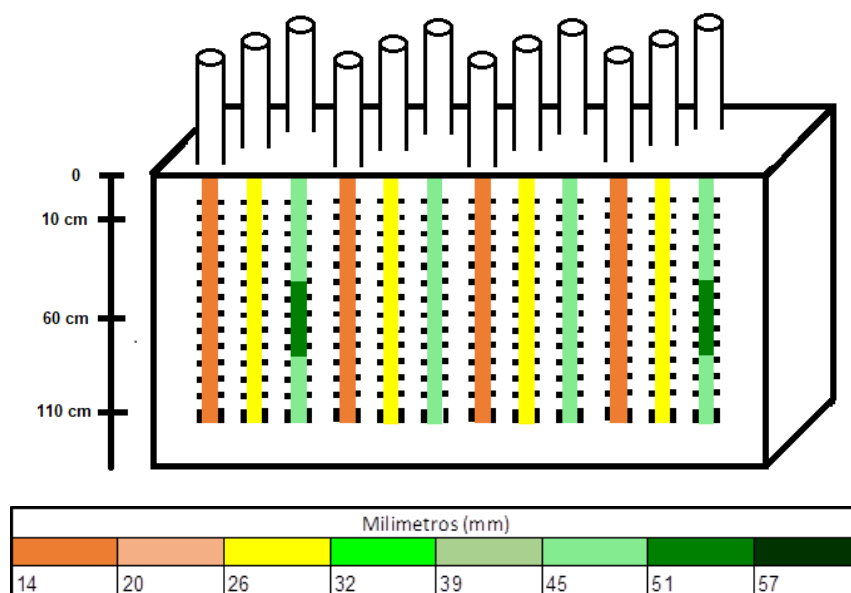


Figura 5.1 Mapeo de espesores de recubrimiento
Fuente: Elaboración propia

5.3 Ensayo potencial de corrosión

Respecto al ensayo de potencial de corrosión en las barras de refuerzo de las estaciones de monitoreo se pudo apreciar que a pesar de los años que se han visto expuestas (11 años), sus elementos de acero no se han visto dañados, su capa pasivante. Por el contrario, se encontró la presencia de algunas secciones de barras las cuales poseían valores positivos en microvolt como nos indica la Figura 5.2, las que no han sido afectadas por los iones cloruros.

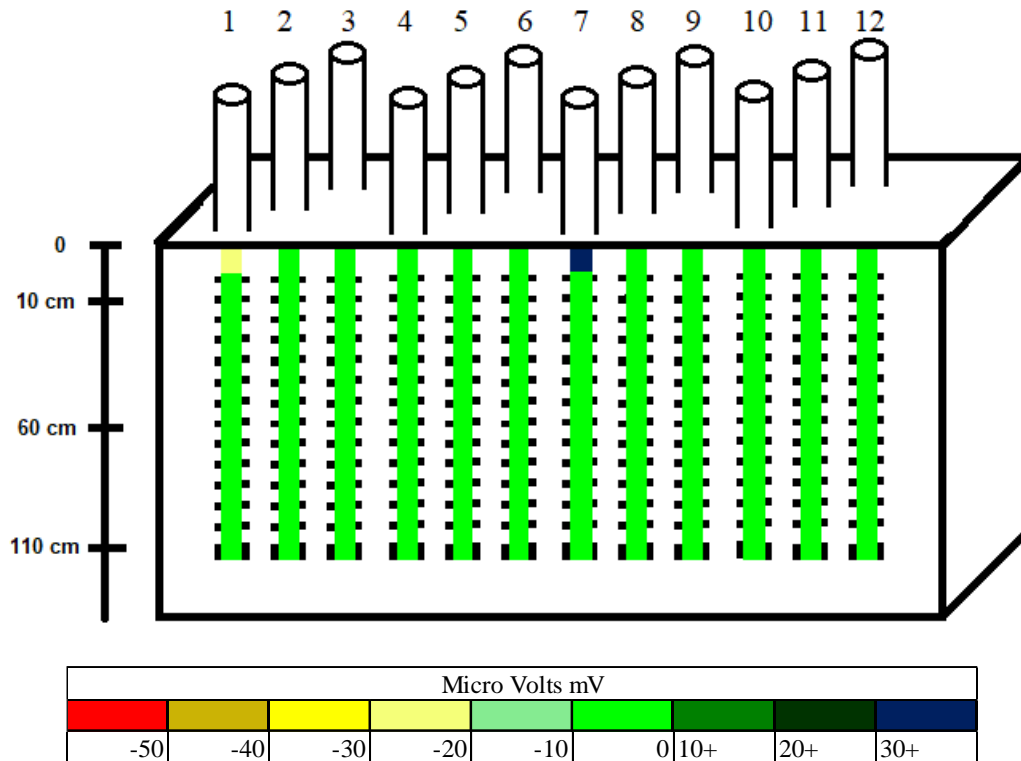


Figura 5.2 Mapeo de potencial de corrosión estaciones de monitoreo
Fuente: Elaboración propia

No obstante, las cabezas de las barras expuestas al ambiente presentan una pequeña capa de óxido apreciable en la Figura 5.3. Sin embargo, todas las barras evaluadas en los distintos niveles de la investigación arrojaron potenciales de corrosión positivos los cuales pueden ser vistos en la Tabla 5.1, por lo cual se puede inferir de que estas barras aún se encuentran en estado pasivo.



Figura 5.3 Capa de oxido
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1 Resultados de medición potencial de corrosión

N° Barra	Muro A			N° Barra	Muro B		
	Diferencial de potencial electrico mV				Diferencial de potencial electrico mV		
	Mediciones a 10 cm	Mediciones a 60 cm	Mediciones a 110 cm		Mediciones a 10 cm	Mediciones a 60 cm	Mediciones a 110 cm
1	6	7	5	1	4	7	5
2	5	6	4	2	6	7	4
3	6	7	6	3	5	10	6
4	5	5	6	4	9	8	6
5	8	8	6	5	7	5	6
6	7	6	7	6	6	6	7
7	6	8	8	7	5	6	8
8	7	7	6	8	3	9	6
9	6	8	9	9	7	7	9
10	7	7	10	10	7	6	10
11	6	5	7	11	7	8	7
12	5	6	12	12	7	7	12

Fuente: Elaboración propia

Respecto de la Tabla 5.1 se puede indicar que no existe una corrosión activa, y que estas barras aún continúan en un estado de pasividad, ya que éstas no han pasado el valor crítico de -0.4 Volts como se señala en el punto 3.3.

5.4 Ensayo de esclerometría

El Ensayo de esclerometría permite determinar el índice esclerométrico de cada una de las estaciones evaluadas, con el fin de conocer la homogeneidad del recubrimiento de hormigón. Esto se realizó con un martillo Schmidt de características presentadas en la sección 4.9.

Los valores entregados en los gráficos de las Figuras 5.4 representan la homogeneidad de cada estación. Estos están en la Tabla N° A.7 de los anexos con los cálculos respectivos.

Podemos apreciar en el gráfico de la Figura 5.4 que la estación A presenta un mayor índice esclerométrico que la estación B, esto es debido en gran parte a la relación A/C, las cuales fueron mencionadas en el punto 4.1.

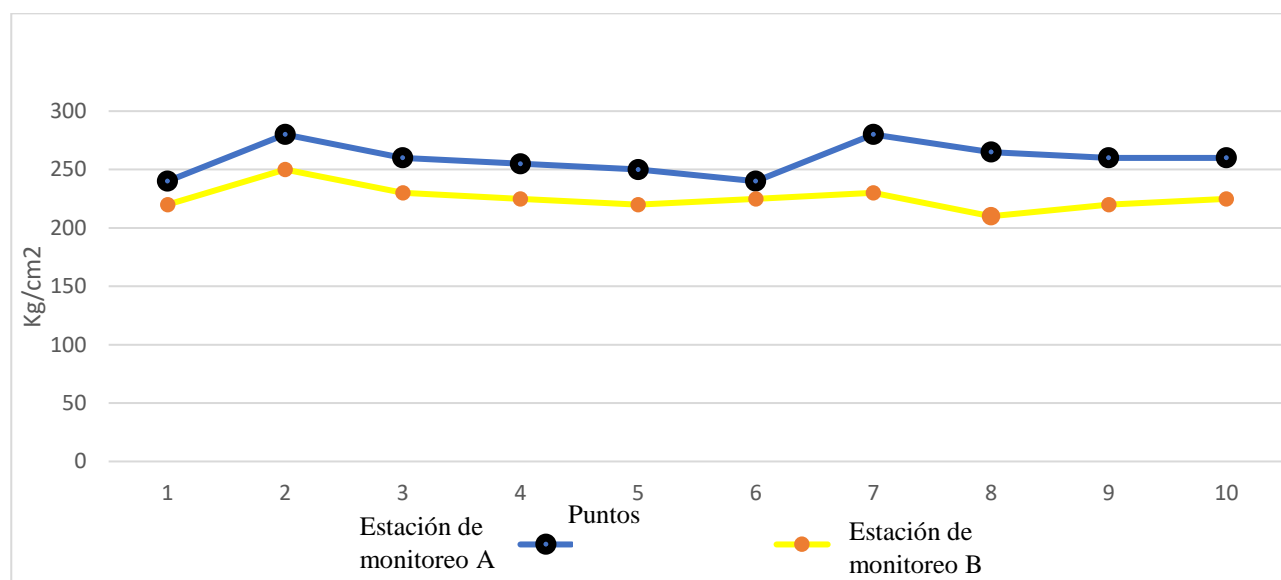


Figura 5.4 Ensayo esclerométrico estaciones de monitoreo A y B
Fuente: Elaboración propia

Dado que la resistencia del hormigón depende de varias características propias de éste (como por ejemplo la antigüedad, compactación, curado, etc.) es que los resultados obtenidos mediante este ensayo por si solos son bastantes referenciales y aproximados respecto a la calidad del hormigón, lo cual se debe tener en cuenta para la interpretación de los resultados.

5.5 Ensayo de permeabilidad al aire

La Tabla 5.2 muestra los resultados promediados de permeabilidad al aire de todos los lugares de muestreo de ambas estaciones de monitoreo y se ve graficada en la Figura 5.5.

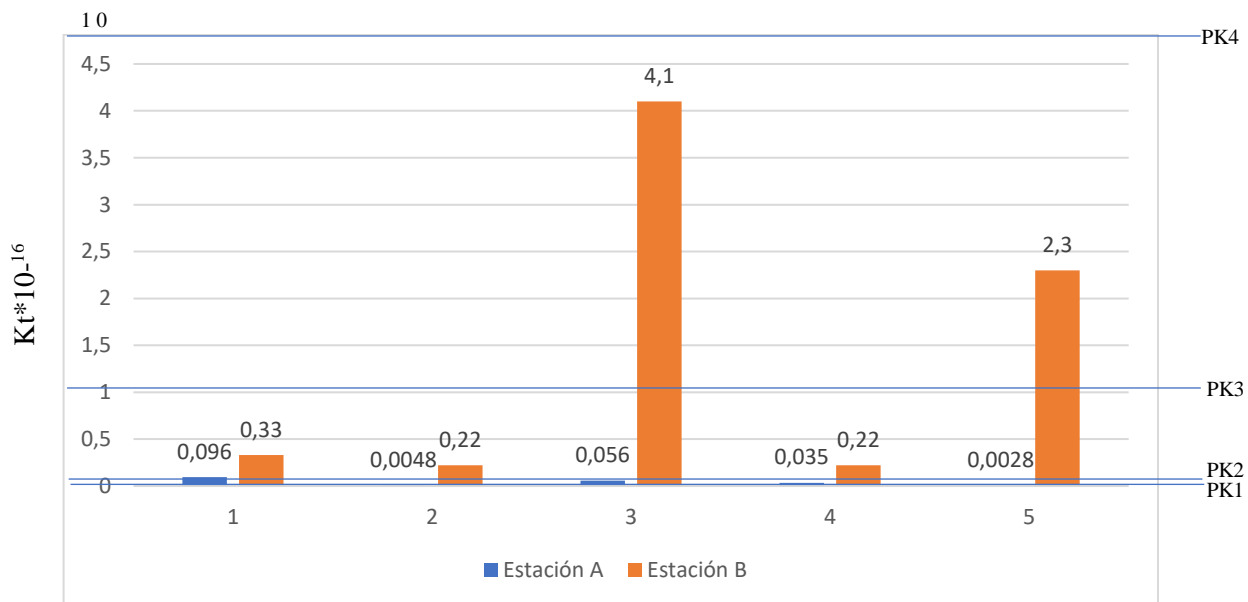


Figura 5.5 Permeabilidad al aire estaciones de monitoreo A y B
Fuente: Elaboración propia

Al comparar los resultados de permeabilidad al aire obtenidos con equipo Torrent en la Tabla 5.2 y compararla con la Tabla 4.2 en el punto 4.7, la cual señala la clase y grado de permeabilidad del hormigón se puede inferir que el muro A se encuentra en la clase PK2 con una baja permeabilidad, por otra parte, los resultados del muro B lo categorizan en la clase PK4 con una alta permeabilidad. Esto significa que tanto la penetración del ion cloruro como la carbonatación presentan un mayor avance en la estación B y reducida en la estación A, debido a que frente a una mayor permeabilidad facilita los mecanismos de transporte tanto para el oxígeno como el ion cloruro, los cuales se verán reflejados en una mayor penetración en el hormigón por parte de estos compuestos.

Tabla 5.2 Resultados de medición de coeficiente de permeabilidad al aire método Torrent

	Muro A (A/C 0,4)	Muro B (A/C 0,6)
KT($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	0,03892	1,4
L (mm)	12	44
RH interna (%)	55,6	59,1
T interna ($^{\circ}\text{C}$)	19	19,5

Fuente: Elaboración propia

5.6 Ensayo de permeabilidad al agua

Este ensayo se realizó con dos tubos Karsten trabajando de forma simultánea en ambas estaciones de monitoreo. Los resultados de la cantidad de agua absorbida por periodos de 0,15, 10 Y 20 minutos entregan los resultados que se presentan en las Figura 5.6.

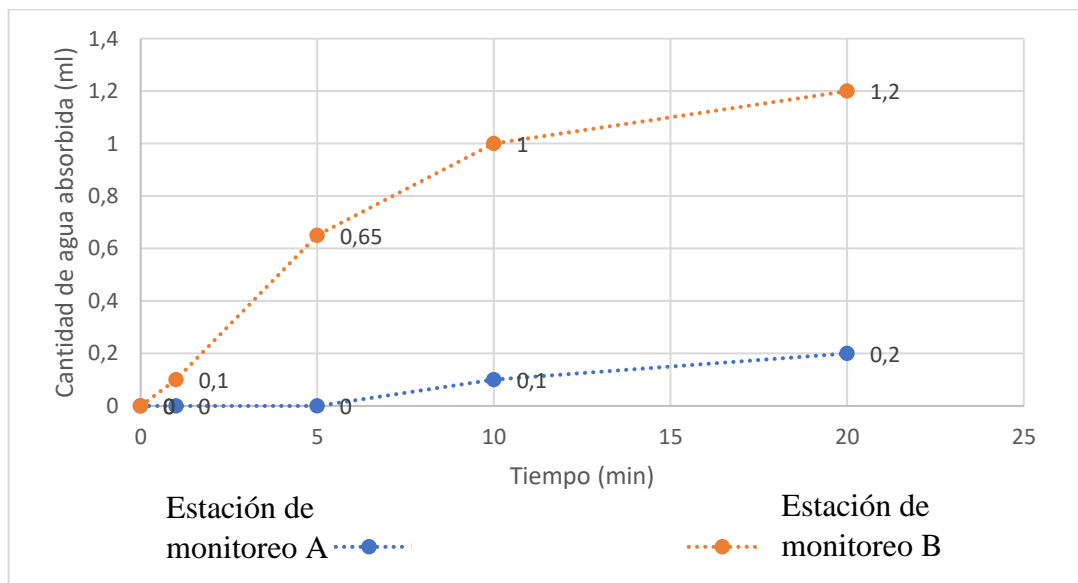


Figura 5.6 Permeabilidad al agua con tubo Karsten en estaciones de monitoreo A y B
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la estación de monitoreo A, es la que presenta más baja permeabilidad, ya que es la que absorbe menos agua en los intervalos de tiempo especificados, lo que era esperado al ser la más homogénea de sus ejemplares según los obtenidos en el ensayo de esclerometría.

Por otra parte, la estación de monitoreo B, se presentó una permeabilidad media, lo que nuevamente se ve reflejado en el ensayo de esclerometría.

Como era de esperarse la estación de monitoreo A presentó un resultado que permite clasificarlo como impermeable, debido a la baja absorción de agua en función del tiempo, situación que se condice con su baja relación agua/cemento de 0.4. Por otro lado, la estación de monitoreo B arrojó una mayor absorción de agua en función del tiempo con una estimación de permeabilidad media la cual puede ser apreciada en la Tabla 5.3, esto puede ser atribuido a que su relación agua/cemento es de 0.6, la cual produce una estructura de mayor porosidad, situación que a su vez facilita los medios de transporte tanto para el oxígeno y el ion cloruro

Tabla 5.3 Promedio ensayo permeabilidad al agua "tubo Karsten"

Promedio Muro A		Promedio Muro B	
Tiempo (min)	Altura columna de agua (cm)	Tiempo (min)	Altura columna de agua (cm)
0	5	0	5
1	5	1	4,9
5	5	5	4,35
10	4,9	10	4
20	4,8	20	3,8

Fuente: Elaboración propia

5.7 Ensayo de carbonatación (tinción con fenolftaleína)

Como se puede observar los datos levantados Tabla 5.4, indica los resultados obtenidos del ensayo in-situ de tinción con fenolftaleína.

Tabla 5.4 Penetración de carbonatación

Penetración carbonatación (cm)	
Estación de monitoreo A	Estación de monitoreo B
0,3	1
0,4	1
Promedio (cm)	
0,4	1

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que claramente existe una mayor penetración en la estación B, la cual se ve reflejada en una menor coloración del testigo.



Figura 5.7 Medición de penetración de carbonatación

Fuente: Elaboración propia

Además, se pudo verificar que la fórmula empírica señalada en la sección 4.10.2 concuerda con los datos levantados “in situ” en las tablas 5.5, 5.6, 57 y 5.8 respectivamente, dando validez al ensayo y el modelo matemático.

Tabla 5.5 Velocidad de carbonatación

Velocidad de carbonatación Muro A		Velocidad de carbonatación Muro B	
K_{CO_2}	1,3	K_{CO_2}	3,8
X_{CO_2}	3,5	X_{CO_2}	10
t_0	7	t_0	7

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.6 Predicción de tiempo para que la carbonatación alcance la armadura

Velocidad de carbonatación Estación A					Velocidad de carbonatación Estación B						
K_{CO_2} (mm/año ^{0,5})	1	K_{CO_2}	1	K_{CO_2}	1	K_{CO_2} (mm/año ^{0,5})	4	K_{CO_2}	4	K_{CO_2}	4
e_c (mm)	10	e_c	30	e_c	50	e_c (mm)	10	e_c	30	e_c	50
t (años)	57	t	514	t	1429	t (años)	7	t	63	t	175

Fuente: Elaboración propia

Por último, podemos señalar que debido a que la estación de monitoreo A es de grado impermeable, ésta presenta una menor penetración de carbonatación. Por el contrario, la estación de monitoreo B al tener una permeabilidad media se ha visto más afectada en la penetración de CO_2 .

5.8 Ensayo de penetración del ion cloruro

Al igual que el ensayo anterior se puede identificar claramente que existe una mayor penetración de cloruros en la estación B. La cual se debe a la gran diferencia de permeabilidad. En cualquier caso, se debe realizar el ensayo de concentración de cloruros de ambos testigos de 2 pulgadas y capilaridad para corroborar dicha afirmación.

La penetración de cloruros en el testigo A fue del orden de 5 mm, por otra parte, el testigo B indico una penetración de 14 mm la cual se ve en la Figura 5.8.



Figura 5.8 Medición de penetración de ion cloruro

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 5.7 muestra los resultados de penetración de cloruros en las estaciones de monitoreo mediante un ensayo in-situ de tinción con nitrato de plata al 0,1N.

Tabla 5.7 Penetración de Ion Cloruro

Penetración Ion cloruro (cm)	
Estación de monitoreo A	Estación de monitoreo B
0,5	1,5
0,5	1,3
Promedio (cm)	
0,5	1,4

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperarse de los resultados arrojados por los ensayos de permeabilidad la estación de monitoreo A presenta una menor penetración del ion cloruro, la cual al ser proyectada nos indica una cantidad de años de más de 57 años para espesores mayores de 1 cm que se puede apreciar en la Tabla N° A.9 en los anexos, pero al tener una relación de agua/cemento tan baja, esta estructura en la práctica presenta una poca trabajabilidad, por lo cual se recomienda una mayor relación agua cemento, siendo en la práctica más cercana a la estación de monitoreo B, para la cual se debe tener un espesor mínimo de recubrimiento de 3 cm para poder considerar una vida útil razonable.

Cabe señalar que a medida que avanza la carbonatación esta tiende a llenar las microfisuras internas de los hormigones, las cuales impiden el paso del ion cloruro ralentizando la corrosión.

5.9 Ensayo de resistencia a compresión

La resistencia a compresión de los hormigones analizados fue determinada a través de la extracción de 3 testigos de 100 mm de diámetro a las alturas indicadas en la sección 4.10.

Con los datos obtenidos de los testigos normalizados y refrentados se obtuvieron los datos con los cuales se construyeron los gráficos de la Figuras 5.9 y 5.10. las que representan a las estaciones de monitoreo A y B respectivamente.

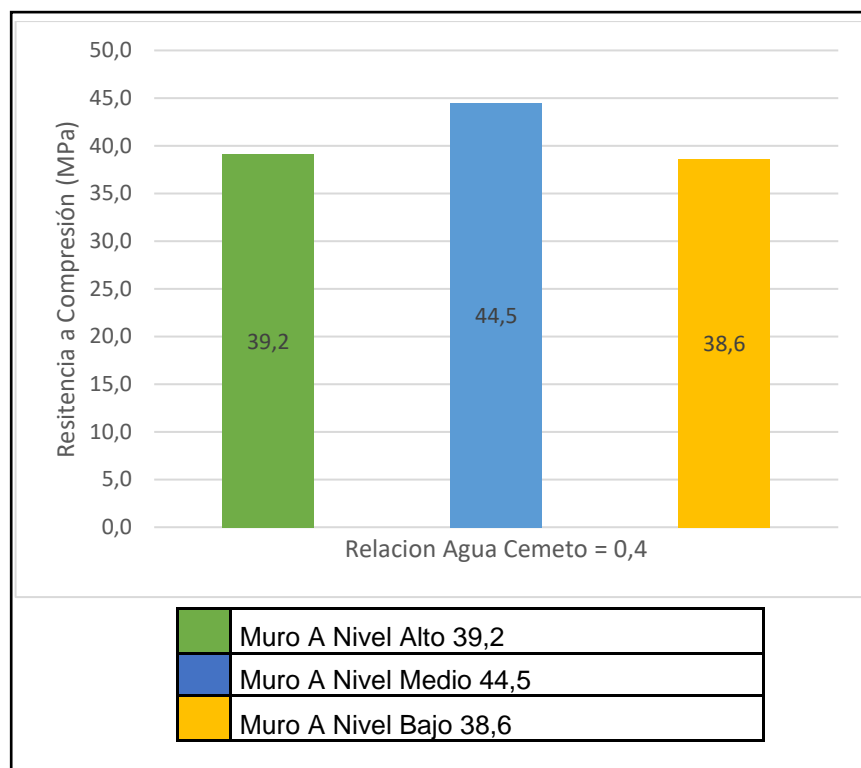


Figura 5.9 Resistencia a compresión Muro de monitoreo A

Fuente: Elaboración propia

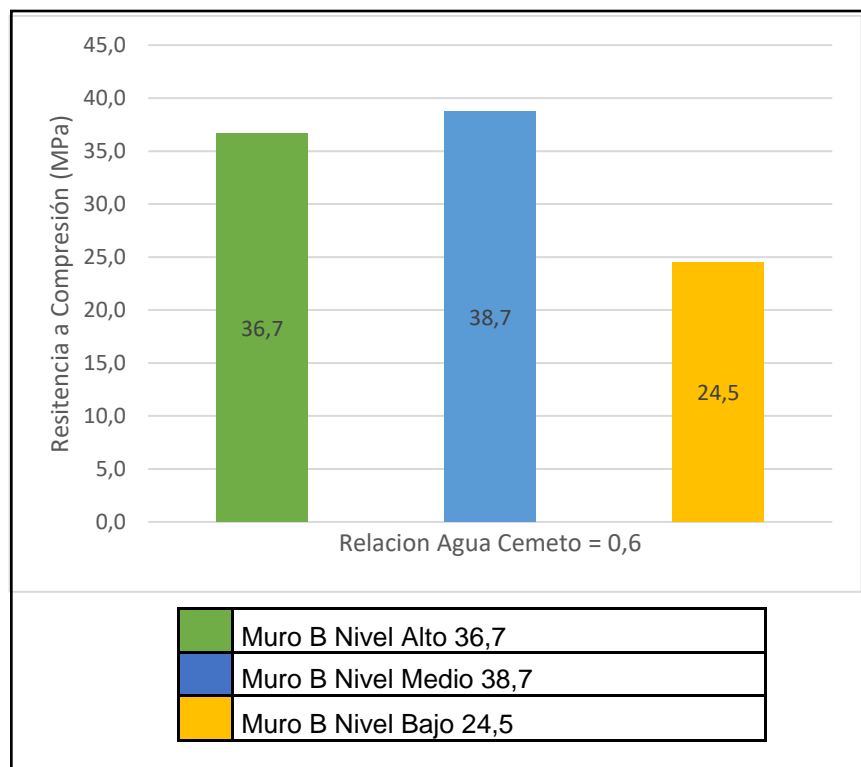


Figura 5.10 Resistencia a compresión Muro de monitoreo B

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.9 nos indica que la estación de monitoreo A presenta una baja diferencia entre los diferentes niveles evaluados, en donde se aprecia un aumento de la resistencia en la estación A, la cual inicio siendo de 35 MPa obtenida en la investigación de Santibáñez (2008).

Por otra parte, la Figura 5.10 nos señala que en la estación de monitoreo B si presenta una diferencia en uno de sus niveles evaluados, el cual se vio afectado debido a una mala faena de hormigonado y presencia de juntas frías.

Además, al comparar los datos obtenidos en esta investigación de Santibáñez (2008), nos encontramos que la resistencia determinada en la primera etapa del proyecto FONDEF nos indicó de una resistencia a la compresión estimada de 32.9 MPa y 27.2MPa para las estaciones A y B respectivamente. Por lo cual se ve claramente un aumento de la resistencia de las estaciones debido al envejecimiento de las estructuras, por lo que la evolución de estas mediciones coincide con lo esperado por Santivañez (2008).

Capítulo 6 Conclusiones y futuras investigaciones

En el presente capítulo se exponen las principales conclusiones extraídas de la investigación, Además, se presentan algunas recomendaciones para futuras investigaciones.

6.1 Conclusiones

De acuerdo con los datos experimentales obtenidos de los diferentes ensayos realizados y al análisis de resultados, es posible concluir lo siguiente.

- Lo primero que se debe señalar es que los resultados de esta investigación no deben ser extrapolados a otras regiones, debido a que las condiciones que afectan el desempeño de las estructuras evaluadas pueden verse afectada por la agresividad ambiental de donde se encuentren ubicadas ya sean por condiciones climáticas, cuidados de las estructuras, agentes nocivos externos, entre otros.
- De acuerdo con la clasificación para las estaciones de monitoreo según permeabilidad al aire con el Permea Torr y permeabilidad al agua con el tubo Karsten, se concluye que ambos ensayos arrojaron resultados similares, indicando el grado de permeabilidad de ambas estaciones las cuales se ven directamente relacionadas con la relación agua/cemento y la penetración sufrida tanto por carbonatación y el ion cloruro.
- La evaluación de los ensayos de penetración de cloruros y carbonatación se ven directamente influenciados por la permeabilidad de las estaciones de monitoreo. Además de que los resultados empíricos en las ecuaciones del proyecto FONDEF vs los resultados obtenidos “in situ” coinciden casi en su totalidad, indicando que la estimación de la fórmula es acertada.
- Además, las barras de refuerzo de las estaciones evaluadas se encuentran aún en el rango de pasividad, a pesar de la diferencia entre los diferentes espesores de recubrimiento, donde las barras que presenten un mayor grado de acercamiento a la corrosión activa son las que presentan un menor espesor de recubrimiento.
- Por tanto, es posible concluir, con respecto al objetivo general de esta investigación, que las condiciones de durabilidad de las estaciones de monitoreo han sido adecuadas para el tiempo de exposición que éstas tienen, en función a los parámetros de diseño de los hormigones de recubrimiento que tienen la misión de proteger la armadura

6.2 Propuesta de futuras investigaciones

Como recomendaciones para futuras investigaciones se pueden destacar:

- Complementar esta investigación con la aplicación de otras técnicas no destructivas tales como ultrasonido, ensayo de perfil de penetración y/o perfil de dureza.
- Realizar la misma investigación sobre las estaciones de monitoreo en años venideros y verificar la velocidad de corrosión y penetración del ion cloruro y carbonatación cada año. A su vez levantar datos de las estaciones de monitoreo ubicadas en Santiago.
- Generar probetas o estaciones de hormigón armado con diferentes composiciones de relación agua/cemento, variabilidad de tipos de cementos y verificar los diferentes grados de resistencia mecánica y grados de durabilidad según los ensayos propuestos en esta investigación.

Bibliografía

- Bustos, F. (2011). *Understanding Performance of Concrete using natural pozzolans against Corrosion*.
- Carvajal, A. M., & Jorquera, C. (2010). Estudio del efecto del ambiente marinoindustrial en estructuras de hormigón armado que poseen protección superficial de mortero con acrílico incorporado. *Revista de La Construcción*, 9(2), 108–115. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2010000200011>
- Carvajal, A. M., Maturana, P., Benavides, F., & Cortés, J. E. (2010). Metodología de obtención de muestras de hormigón en polvo para análisis de cloruro y correlación entre el contenido de cloruros en ambiente marino real por cinco años y ambiente acelerado de muestras de hormigón. *Revista de La Construcción*, 9(1), 74–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2010000100008>
- Castellote, M., & Andrade, C. (2009). Modelamiento del proceso de carbonatación del hormigón (UR-CORE), con datos de conversión fraccional obtenidos a través de experimentos de difracción de neutrones monitoreados in-situ. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24, 245–258. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732009000300003>
- Castorena, J., Pérez, J. L., Borunda, A., Gaona, C., Velázquez, I., & F, M. A. A. (2007). Modelación con elementos finitos del agrietamiento en el hormigón por corrosión localizada en la armadura Finite element modeling of cracking in concrete due to localized corrosion in the reinforcement. *Revista Ingeniería de Construcción*, 22, 35–42. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000100004>
- Chávez-Ulloa, E., López, T. P., Trujeque, J. R., & Pérez, F. C. (2013). Deterioro de estructuras de concreto por carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada. *Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidad Del Zulia*, 36(2), 104–113.
- DO711076, F. (2007). Definición e Implementación de un Sistema de Especificación por Durabilidad de Estructuras de Hormigón Armado. XV Concurso de Proyectos de I+D FONDEF 2007.
- Ebensperger, L., & Torrent, R. (2010). Medición “ in situ ” de la permeabilidad al aire del hormigón : status quo Concrete air permeability “ in situ ” test : status quo. *Concrete*, 25, 371–382.
- Fernandez, C. (2011). Ensayo de permeabilidad en fachadas tubo en L o tubo Karsten. Retrieved from <https://www.patologiasconstruccion.net/2012/11/ensayo-de-permeabilidad-en-fachadas-tubo-en-l-o-tubo-rilem/>
- Fernández, J. L., Sota, J. D., Carbonari, R. O., & Romagnoli, R. (2010). Variación de la adherencia de las armaduras polarizadas católicamente en morteros de cemento con escoria. *Informacion Tecnológica*, 21(4), 109–116. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4315it.09>
- Juarez, L., & Castro, P. (2011). Development and implementation of a behavior model of the surface concentration of chlorides in concrete for marine microenvironments, 16–28.
- Ramón Corral, H., Susana Arredondo, R., Jorge Almaral, S., & José Gómez, S. (2013).

Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios. *Revista Ingeniería de Construcción*, 28(1), 21–35. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732013000100002>

RedDurar, X. . (2004). Predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante la utilización de un modelo de difusión de cloruro. *RedDurar*, 6(2), 159–165. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22159/ijpps.2017v9i10.20454>

Anexos

Tabla N° A.1 Clasificación de espesores de recubrimiento de hormigón en barras de refuerzo y diferencial de potencial eléctrico a 10 cms.

Muro A				Muro B			
Medicones a 10 cms				Medicones a 10 cms			
N° Barra	Diametro de la barra (mm)	Espesor de recubrimiento mm	Diferencial de potencial electrico mV	N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Diferencial de potencial electrico mV
1	16	<11	6	1	16	18	4
2	16	30	5	2	16	30	6
3	16	50	6	3	16	50	5
4	16	12	5	4	16	15	9
5	16	30	8	5	16	27	7
6	16	47	7	6	16	43	6
7	16	13	6	7	16	<11	5
8	16	26	7	8	16	22	3
9	16	44	6	9	16	45	7
10	16	14	7	10	16	13	7
11	16	26	6	11	16	26	7
12	16	49	5	12	16	46	7

Tabla N° A.2 Clasificación de espesores de recubrimiento de hormigón en barras de refuerzo y diferencial de potencial eléctrico a 60 cms.

Muro A				Muro B			
Medicones a 60 cms				Medicones a 60 cms			
N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Diferencial de potencial electrico mV	N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Diferencial de potencial electrico mV
1	16	<11	7	1	16	25	7
2	16	30	6	2	16	35	7
3	16	52	7	3	16	57	10
4	16	18	5	4	16	21	8
5	16	33	8	5	16	32	5
6	16	49	6	6	16	50	6
7	16	18	8	7	16	20	6
8	16	30	7	8	16	28	9
9	16	49	8	9	16	52	7
10	16	17	7	10	16	18	6
11	16	32	5	11	16	32	8
12	16	52	6	12	16	52	7

Tabla N° A.3 Clasificación de espesores de recubrimiento de hormigón en barras de refuerzo y diferencial de potencial eléctrico a 110 cms.

Muro A				Muro B			
Mediciones a 110 cms				Mediciones a 110 cms			
N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Diferencial de potencial electrico mV	N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Diferencial de potencial electrico mV
1	16	12	5	1	16	12	5
2	16	27	4	2	16	27	4
3	16	49	6	3	16	49	6
4	16	15	6	4	16	15	6
5	16	27	6	5	16	27	6
6	16	46	7	6	16	46	7
7	16	18	8	7	16	18	8
8	16	30	6	8	16	30	6
9	16	49	9	9	16	49	9
10	16	17	10	10	16	17	10
11	16	31	7	11	16	31	7
12	10	50	12	12	16	50	12

Tabla N° A.4 Clasificación de espesores de recubrimiento de hormigón en barras de refuerzo y diferencial de potencial eléctrico a en barras expuestas al ambiente.

Muro A		Muro B	
Medición superficial (barras expuestas)		Medición superficial (barras expuestas)	
N° Barra	Diferencial de potencial eléctrico mV	N° Barra	Diferencial de potencial eléctrico mV
1	-12	1	5
2	5	2	6
3	6	3	4
4	4	4	7
5	6	5	6
6	5	6	5
7	31	7	3
8	7	8	4
9	6	9	7
10	24	10	7
11	5	11	6
12	3	12	6

Tabla N° A.5 Levantamiento de datos del método Torrent.

Test #1	Muro A		Test #6	Muro B		Test #3	Muro A		Test #8	Muro B	
	Pi (mbar)	81,3		Pi (mbar)	98		Pi (mbar)	76,4		Pi (mbar)	86,6
	Pe (mbar)	79,5		Pe (mbar)	96,5		Pe (mbar)	74,6		Pe (mbar)	85
	Δ Pi (mbar)	15,2		Δ Pi (mbar)	21,4		Δ Pi (mbar)	4,4		Δ Pi (mbar)	21,3
	Kt (m ²)	0,096*10 ⁻¹⁶		Kt (m ²)	0,33*10 ⁻¹⁶		Kt (m ²)	0,0048*10 ⁻¹⁶		Kt (m ²)	0,22*10 ⁻¹⁶
	L (mm)	22		L (mm)	34		L (mm)	5		L (mm)	32
	t (s)	720		t (s)	525		t (s)	720		t (s)	660
Test #2	Muro A		Test #7	Muro B		Test #4	Muro A		Test #9	Muro B	
	Pi (mbar)	78,4		Pi (mbar)	82,6		Pi (mbar)	83,6		Pi (mbar)	98,3
	Pe (mbar)	76,6		Pe (mbar)	81		Pe (mbar)	82		Pe (mbar)	96,8
	Δ Pi (mbar)	11,9		Δ Pi (mbar)	21,5		Δ Pi (mbar)	9,7		Δ Pi (mbar)	21,3
	Kt (m ²)	0,056*10 ⁻¹⁶		Kt (m ²)	4,1*10 ⁻¹⁶		Kt (m ²)	0,035*10 ⁻¹⁶		Kt (m ²)	0,22*10 ⁻¹⁶
	L (mm)	17		L (mm)	65		L (mm)	13		L (mm)	32
	t (s)	720		t (s)	150		t (s)	720		t (s)	675
Test #5	Muro A		Test #10	Muro B		Muro B					
	Pi (mbar)	78,4		Pi (mbar)	76,7	Pi (mbar)	112,5				
	Pe (mbar)	76,7		Δ Pi (mbar)	3,7	Pe (mbar)	111,4				
	Δ Pi (mbar)	3,7		Kt (m ²)	0,0028*10 ⁻¹⁶	Δ Pi (mbar)	22,4				
	Kt (m ²)	0,0028*10 ⁻¹⁶		L (mm)	5	Kt (m ²)	2,3*10 ⁻¹⁶				
	L (mm)	5		t (s)	720	L (mm)	55				
	t (s)	720				t (s)	195				

Tabla N° A.6 Mediciones ensayo permeabilidad al agua, en función columna de agua y tiempo.

Muro A			
Tiempo (min)	Altura columna de agua (cm)	Tiempo (min)	Altura columna de agua (cm)
0	5	0	5
1	5	1	5
5	5	5	5
10	5	10	4,9
20	5	20	4,9
Muro B			
Tiempo (min)	Altura columna de agua (cm)	Tiempo (min)	Altura columna de agua (cm)
0	5	0	5
1	5	1	5
5	4,9	5	4,9
10	4,9	10	4,9
20	4,9	20	4,8

Tabla N° A.7 Mediciones ensayo de esclerometría.

	Punto N°	Mediciones kg/cm ²										Promedio 1	Promedio 2
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Muro B	1	220	220	225	215	215	220	225	220	220	215	220	225,55
	2	250	255	250	245	245	250	250	255	250	250	250	
	3	230	230	230	235	235	225	225	230	230	230	230	
	4	225	230	230	220	220	225	225	230	220	225	225	
	5	220	220	225	215	215	220	215	220	220	220	220	
	6	225	220	230	230	225	225	220	225	220	225	225	
	7	230	225	230	230	235	230	235	225	225	230	230	
	8	210	215	215	210	205	205	210	210	210	205	210	
	9	220	220	220	225	215	215	220	220	215	220	220	
	10	225	225	225	220	220	230	225	220	225	225	225	

Muro A	Ensayo de esclerometría Muro A												
	Punto N°	Mediciones kg/cm ²										Promedio 1	Promedio
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	240	235	240	240	245	230	250	235	240	240	240	240	259,1
2	280	275	275	280	280	275	275	290	285	280	280	280	
3	260	255	265	260	260	255	255	265	260	265	260	260	
4	255	260	260	250	250	255	255	245	265	255	255	255	
5	250	260	240	245	255	245	250	255	245	250	250	250	
6	240	245	230	250	235	240	240	235	240	240	240	240	
7	280	280	280	275	275	285	280	280	275	285	280	280	
8	265	265	265	270	265	265	265	260	260	265	260	265	
9	260	255	265	255	260	255	260	260	265	260	260	260	
10	260	255	255	260	260	260	255	265	260	260	260	260	

Tabla N° A.8 Penetración de carbonatación e Ion Cloruro.

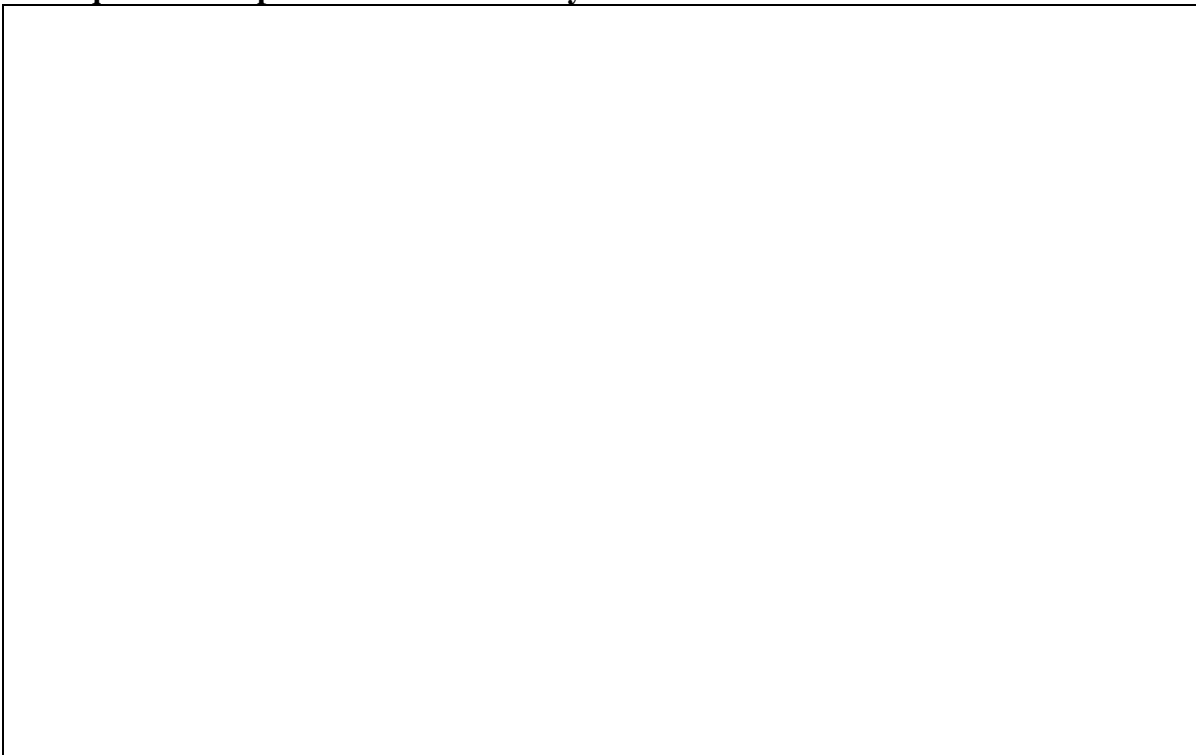
Muro A		Muro B	
Penetracion (cm)		Penetracion (cm)	
Carbonatacion	Ion Cloruro	Carbonatacion	Ion Cloruro
0,3	0,5	1	1,5
0,4	0,5	1	1,3
Promedio		Promedio	
0,35	0,5	1	1,4

Tabla N° A.9 Predicción en años para que la carbonatación alcance las armaduras.

Muro A				Muro B			
Medicones a 10 cms				Medicones a 10 cms			
N° Barra	Diametro de la barra (mm)	Espesor de recubrimiento mm	Predicción carbonatación en armadura (años)	N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Predicción carbonatación en armadura
1	16	<11	72	1	16	18	22
2	16	30	533	2	16	30	62
3	16	50	1479	3	16	50	173
4	16	12	85	4	16	15	16
5	16	30	533	5	16	27	50
6	16	47	1307	6	16	43	128
7	16	13	100	7	16	<11	8
8	16	26	400	8	16	22	34
9	16	44	1146	9	16	45	140
10	16	14	116	10	16	13	12
11	16	26	400	11	16	26	47
12	16	49	1421	12	16	46	147
Muro A				Muro B			
Medicones a 60 cms				Medicones a 60 cms			
N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Predicción carbonatación en armadura	N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Predicción carbonatación en armadura
1	16	<11	72	1	16	25	43
2	16	30	533	2	16	35	85
3	16	52	1600	3	16	57	225
4	16	18	192	4	16	21	31
5	16	33	644	5	16	32	71
6	16	49	1421	6	16	50	173
7	16	18	192	7	16	20	28
8	16	30	533	8	16	28	54
9	16	49	1421	9	16	52	187
10	16	17	171	10	16	18	22
11	16	32	606	11	16	32	71
12	16	52	1600	12	16	52	187
Muro A				Muro B			
Medicones a 110 cms				Medicones a 110 cms			
N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Predicción carbonatación en armadura	N° Barra	Diametro de la barra mm	Espesor de recubrimiento mm	Predicción carbonatación en armadura
1	16	12	85	1	16	12	10
2	16	27	431	2	16	27	50
3	16	49	1421	3	16	49	166
4	16	15	133	4	16	15	16
5	16	27	431	5	16	27	50
6	16	46	1252	6	16	46	147
7	16	18	192	7	16	18	22
8	16	30	533	8	16	30	62
9	16	49	1421	9	16	49	166
10	16	17	171	10	16	17	20
11	16	31	569	11	16	31	67
12	10	50	1479	12	16	50	173

ANEXO - FORMULARIO DE TRABAJO**Formulario de trabajo – Proyecto Fondef D07I1076 – FT –h– 04****CARBONATACIÓN****a. Antecedentes generales**

Solicitante	
Ubicación de la estructura	
Sector o recinto de ensayo	
Elemento	
Fecha de ensayo	

b. Esquema de la probeta o zona de ensayo

c. Mediciones

Probeta N°						
Número de ensayo						
Posición y/o nivel probeta						
Diámetro armadura (mm)						
Espesor recubrimiento e_c (mm)						
Edad estructura u hormigón t_0 (años)						
Profundidad mínima 1 (mm)						
Profundidad mínima 2 (mm)						
Profundidad máxima 1 (mm)						
Profundidad máxima 2 (mm)						
Profundidad promedio X_{CO_2} (mm)						
K_{CO_2} (mm/año ^{0.5})						
Tiempo en alcanzar armadura t (años)						

$$K_{CO_2} = X_{CO_2} (t_0)^{-0.5} \text{ (mm/año}^{0.5}\text{)}$$

$$t = (e_c / K_{CO_2})^2 \text{ (años)}$$

d. Observaciones

--

Formulario de trabajo – Proyecto Fondef D07I1076 – FT –h– 04

PENETRACION DE CLORUROS**e. Antecedentes generales**

Solicitante	
Ubicación de la estructura	
Sector o recinto de ensayo	
Elemento	
Fecha de ensayo	

f. Esquema de la probeta o zona de ensayo



g. Mediciones

Probeta N°						
Número de ensayo						
Posición y/o nivel probeta						
Diámetro armadura (mm)						
Espesor recubrimiento e_c (mm)						
Edad estructura u hormigón t_0 (años)						
Profundidad 1 (mm)						
Profundidad 2 (mm)						
Profundidad 3 (mm)						
Profundidad 4 (mm)						
Profundidad 5 (mm)						
Profundidad 6 (mm)						
Profundidad promedio X_{CL} (mm)						
K_{CL} (mm/año ^{0,5})						
Tiempo en alcanzar armadura t (años)						

$$K_{CL} = X_{CL} \cdot (t_0)^{-0,5} \text{ (mm/año}^{0,5}\text{)}$$

$$t = (e_c / K_{CL})^2 \text{ (años)}$$

h. Observaciones

--