



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS ANTIGUAS DE HORMIGÓN
ARMADO, CON ÉNFASIS EN LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS ALBERTO ROJAS KEIM

**PROFESOR GUÍA:
ATILANO LAMANA POLA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARIO PARDO PEDEMONTE
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

**SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2006**

RESUMEN DE MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: LUIS ROJAS KEIM
FECHA: 26 DE DICIEMBRE DE 2006
PROF. GUÍA: ATILANO LAMANA POLA

ESTUDIO DE LA DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS ANTIGUAS DE HORMIGÓN ARMADO, CON ÉNFASIS EN LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS.

El objetivo del presente trabajo de título es el estudio del comportamiento del hormigón armado tanto respecto de la carbonatación como de la penetración de ion cloruro, y la susceptibilidad a la corrosión de las armaduras que causan ambos procesos. Para tal efecto se analizaron estructuras antiguas. La idea era que los procesos de carbonatación y de penetración de ion cloruro esten avanzados, para poder apreciarlos en su real dimensión, así como establecer un criterio comparativo en que fuese determinante la variable temporal.

El estudio se realizó en ocho edificaciones, algunas de ellas de gran importancia patrimonial, por su emblemático carácter institucional; cuatro estructuras ubicadas en la V Región y cuatro en la Región Metropolitana.

La metodología empleada para medir la profundidad de carbonatación está basada en la norma RILEM CPC-18. Para la extracción y determinación de ion cloruro se siguió la metodología empleada por la Unidad Química del Laboratorio de Aglomerantes del IDIEM.

En la investigación se observó que las profundidades de carbonatación son mayores en las estructuras analizadas en Santiago que en las estructuras estudiadas en la zona costera de la V región. Las razones más probables de esta diferencia son la mayor variación estacional de la humedad relativa, Humedades Relativas cercanas al 50% -tasa en que se potencia al máximo la carbonatación-, y mayor concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

En la zona costera de la V región se puede observar, a través del análisis de tres puentes de la ciudad de Viña del Mar, cercanos al litoral, que el problema más importante radica en el ataque de cloruros. Un hecho del mayor interés radica en la baja carbonatación encontrada en dichas estructuras.

Con todo, se constató que a pesar de la edad de dichas estructuras, no existen graves deterioros que pongan en peligro el funcionamiento de ellas. Sin perjuicio de lo anterior, se recomienda un estudio en la misma línea investigativa, una especie de catastro, que abarque estructuras de diferentes períodos, con el fin de que la norma chilena contemple un espesor de recubrimiento que considere variables tales como la relación A/C y las condiciones climáticas. En Chile no se tiene real conciencia del problema de la durabilidad del hormigón armado y se piensa que es eterno, de modo que trabajos como éste muestran que el tema es de la mayor relevancia.

A mis padres

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis agradecimientos a todos quienes me apoyaron en esta larga carrera.

A mi familia, a la memoria de mi padre, a mi madre por su infinita paciencia y constante ánimo para no claudicar; a mis hermanos y a mi novia Natalia.

Al Profesor don Atilano Lamana Pola por haber confiado en mí y por su invaluable aporte para que esta Memoria llegara a ser una realidad.

A los profesores Federico Delfín y Mario Pardo por sus muy útiles consejos y buena disposición para corregir errores.

A Alejandro Ochoa, José Quiroz, Alejandro Garrido, Héctor Iturra, y Don Marcel de la sección de hormigones del IDIEM.

A Felipe Jiménez y Reinaldo Zepeda de la Unidad Química del Laboratorio de Aglomerantes del IDIEM y a Víctor Basaure del Depto. de Química de la Facultad.

A mis amigos Rodolfo Silva y Horacio Lira, y a tantos compañeros que me ayudaron durante mi carrera, en especial a mis amigos Gustavo Solar y Marcelo Rojas.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Alcances.....	3
CAPÍTULO II ANTECEDENTES GENERALES	4
2.1. Generalidades.....	5
2.2. Conceptos básicos del hormigón.....	6
2.2.1. Un poco de historia.....	6
2.2.2. Componentes del cemento.....	9
2.2.3. Proceso de hidratación del cemento.....	11
2.3. Fenómeno de la difusión.....	12
2.4. Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.....	13
2.5. Carbonatación.....	13
2.5.1. Proceso de carbonatación.....	13
2.5.2. Velocidad de avance del frente de carbonatación.....	14
2.5.3. Otros efectos de la carbonatación.....	16
2.6. Proceso químico de la corrosión.....	16
2.6.1. Corrosión y protección.....	16
2.6.2. Mecanismo de la corrosión.....	17
2.7. Corrosión de las armaduras inducida por cloruros.....	20
CAPÍTULO III METODOLOGÍA Y EQUIPOS USADOS	23
3.1. Metodología para medir la carbonatación.....	24
3.1.1. Procedimiento de extracción de testigos.....	24
3.1.2. Determinación de la profundidad de carbonatación.....	25
3.1.3. Determinación de la resistencia a la compresión.....	27
3.1.4. Determinación del estado de corrosión de las armaduras.....	27
3.1.5. Reparación de daños producidos a las estructuras.....	27
3.2. Instrumentos utilizados para medir carbonatación.....	28
3.3. Metodología para la extracción y determinación de la concentración de ion cloruro.....	30
3.4. Instrumentos utilizados para medir concentración de ion cloruro.....	31
CAPÍTULO IV DESCRIPCION DE LAS OBRAS ANALIZADAS Y PRESENTACION DE LOS RESULTADOS	34
4.1. Características de los edificios a estudiar.....	35
4.1.1. Puentes de la V Región	35
4.1.2. Edificios de la Región Metropolitana.....	38
4.2. Presentación de resultados ensayo de carbonatación.....	40
4.3. Presentación resultados ensayo de penetración de ion cloruro.....	45
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	47
5.1. Introducción.....	48

5.2.	Cálculo de la profundidad de carbonatación teórica.....	48
5.3.	Análisis de los resultados.....	49
5.3.1.	Puente Quillota.....	49
5.3.2.	Internado Nacional Barros Arana.....	50
5.3.3.	Escuela de Ingeniería.....	51
5.3.4.	Tribunales de Justicia.....	53
5.3.5.	Puente Huaquén.....	54
5.3.6.	Escuela de Derecho.....	55
5.3.7.	Puente Libertad	56
5.3.8.	Puente Mercado	57
CAPÍTULO VI CONCLUSIONES.....		58
CAPÍTULO VII BIBLIOGRAFÍA.....		61
ANEXO A: FOTOGRAFÍAS DE LAS OBRAS ESTUDIADAS.....		64
ANEXO B: ANTECEDENTES CLIMÁTICOS.....		103

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. N° 1: Reacciones en la cocción del clínker _____	9
Fig. N° 2: Formación de un potencial de electrodo por disociación iónica del hierro	18
Fig.N° 3: Corrosión galvánica del hierro _____	19
Fig. N° 4: Corrosión galvánica del acero en el hormigón _____	20
Fig N° 5 : Plano Viña del Mar _____	42
Fig.N°6: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Quillota____	49
Fig.N°7: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra I.N.B.A _____	50
Fig.N°8: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Escuela de Ingeniería (cara superior losa sala 18 sur) _____	51
Fig.N°9: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Escuela de Ingeniería (cara inferior losa sala 18 sur) _____	52
Fig.N°10: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Tribunales de Justicia _____	53
Fig. N°11: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Huaquén__	54
Fig.N°12: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Escuela de Derecho	55
Fig.N°13: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Libertad	56
Fig.N°14: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Mercado	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Análisis de óxidos de un cemento Portland típico_____	10
Tabla N°2: Constituyentes principales del cemento Pórtland _____	10
Tabla N°3: Valores de las constantes r_c , r_a , r_s utilizadas en la formula de Hamada____	15
Tabla N°4: Características mortero Presec_____	28
Tabla N° 5: Resultados obtenidos en terreno del Internado Nacional Barros Arana____	40
Tabla N° 6: Resultados obtenidos en terreno de la Escuela de Ingeniería_____	40
Tabla N° 7: Resultados obtenidos en terreno del Puente Quillota_____	41
Tabla N° 8: Resultados obtenidos en terreno del Puente Libertad_____	42
Tabla N° 9: Resultados obtenidos en terreno del Puente Mercado_____	43
Tabla N° 10: Resultados obtenidos en terreno del Puente Huaquén_____	44
Tabla N° 11: Resultados penetración de ion cloruro Puente Quillota_____	45
Tabla N° 12: Resultados penetración de ion cloruro Puente Libertad_____	45
Tabla N° 13: Resultados penetración de ion cloruro Puente Mercado_____	46
Tabla N° 14: Resumen carbonatación Puente Quillota_____	49
Tabla N° 15: Resumen carbonatación Internado Nacional Barros Arana_____	50
Tabla N°16: Resumen carbonatación cara superior losa sala 18 sur Escuela de Ingeniería_____	51
Tabla N° 17: Resumen carbonatación cara superior losa sala 18 sur Escuela de Ingeniería_____	52
Tabla N°18: Resumen carbonatación Tribunales de Justicia_____	53
Tabla N°19: Resumen carbonatación Puente Huaquén_____	54
Tabla N°20: Resumen carbonatación Escuela de Derecho_____	55
Tabla N°21: Resumen carbonatación Puente Libertad_____	56
Tabla N°22: Resumen carbonatación Puente Mercado_____	57
Tabla N° 23: Humedad Relativa Región Metropolitana_____	104

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El hormigón es hoy por hoy el material al que se le atribuyen las mejores condiciones para garantizar que la calidad de las construcciones se ajuste a las exigencias de la vida moderna, principalmente por la resistencia que ofrece ante tensiones tanto de tracción como de compresión.

La durabilidad del hormigón armado es el aspecto más problemático de este material de construcción. Por eso es tan importante el estudio tanto de las reacciones químicas que producen carbonatación, como las que se generan por penetración de iones cloruro en las armaduras de acero, fenómenos que debido al proceso de corrosión que desencadenan, inciden directamente en la disminución de la vida útil de las estructuras elaboradas con este material.

La durabilidad del hormigón armado está íntimamente relacionada con la duración de las barras de acero que componen su estructura interna. Esto se debe principalmente a que en la naturaleza el acero, a diferencia del hormigón, que no es un elemento natural, se encuentra químicamente inestable y por lo tanto tiende a volver a su estado natural, que es el de óxido de hierro (Fe_2O_3).

Las barras de acero están protegidas contra la corrosión por un recubrimiento de hormigón, sin embargo esta protección sola no es todo lo efectiva que se requiere para garantizar una razonable durabilidad de las estructuras. Las barras de acero, además, cuentan con una protección que es generada por el ambiente alcalino del hormigón. Esta se manifiesta formando una delgada película de óxido de hierro sobre la barra, la que se estabiliza en el medio alcalino e impide la corrosión posterior de las armaduras. La alcalinidad del hormigón es causada principalmente por el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento. Sin embargo, el dióxido carbónico del aire penetra lentamente hacia el interior, neutralizando la alcalinidad, proceso más conocido como carbonatación. Con el paso de los años esta pérdida de alcalinidad puede alcanzar las armaduras lo cual facilita el posterior proceso de corrosión.

Los efectos producidos por la oxidación del acero provocan un deterioro estructural en el hormigón, el que se debe a una disminución de la sección de acero y a la pérdida de adherencia de las barras, factor principal de la resistencia del hormigón armado, lo que provoca una pérdida de su capacidad estructural; además se produce un daño estético, o sea, en la percepción externa que el público experimenta respecto de las edificaciones, lo que repercute en la confianza de las personas para el uso de la estructura.

Actualmente hay en Chile una importante cantidad de trabajos sobre la corrosión de las armaduras de acero y la carbonatación del hormigón, pero en su mayoría se basan en ensayos acelerados realizados en condiciones de laboratorio, los cuales, si bien reflejan de una manera correcta los pasos y propiedades del proceso, no siempre revelan lo que realmente sucede en terreno, donde entran a tallar variables que o no son reproducibles en condiciones artificiales, o que resultan imposibles de considerar y prever fuera de la experiencia concreta y cotidiana. Debido a lo anterior, y aprovechando la coyuntura en que se cumplen 100 años desde que se construyó la primera estructura de hormigón armado en Chile, y que IDIEM ha decidido realizar una investigación que abarque estructuras antiguas de hormigón armado, se propone este tema de memoria para estudiar estos fenómenos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estudiar la durabilidad del hormigón armado recurriendo al análisis de estructuras antiguas, centrandó nuestro estudio en los fenómenos de la carbonatación, penetración de iones de cloruro, y de la corrosión de las armaduras.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar las zonas en que se produce mayor carbonatación.
- Identificar la parte de la estructura en que se produce mayor corrosión.
- Medir la profundidad de la carbonatación en estructuras antiguas de hormigón armado en base a parámetros científicos y técnicos definidos internacionalmente.
- Medir la penetración de iones cloruro.
- Recomendar reparaciones de daños o deterioros en el caso que los haya.
- Medir los niveles de corrosión de las estructuras.

1.3. Alcances

Este trabajo se centrará en el estudio de la durabilidad del hormigón armado, particularmente en lo que se refiere a los procesos de corrosión por carbonatación y por ingreso de cloruros que afectan a las armaduras de acero, que son las que otorgan a este material de construcción la resistencia y durabilidad que le son características, y que lo hacen altamente apreciado por los constructores de grandes estructuras y/o edificios.

El estudio se desarrollará en estructuras antiguas de hormigón armado, muy escasas en nuestro país, y que fueron pioneras en el uso de este material. Las edades fluctúan entre 44 años (Puente Mercado) y 98 años (Puente Quillota).

Debido al tiempo de ejecución de la investigación y principalmente a la dificultad de obtención de permisos, sólo fue posible realizar experimentos en 8 obras, aunque se trata de ejemplos altamente representativos.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES GENERALES

2.1.- Generalidades

Pese a que se ignora a menudo la trascendencia que ha tenido para el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad, el haberle añadido acero al hormigón es, ciertamente, uno de los más importantes descubrimientos que ha hecho la humanidad, en tanto ha sido la causa de que las estructuras sean muchísimo más resistentes, lo que reviste enorme importancia en un país que presenta una intensa actividad sísmica.

El hormigón es un material de composición heterogénea de áridos, cemento y agua en una cierta proporción que puede variar dentro de cierto rango. El cemento y el agua reaccionan formando una pasta aglomerante, que al unirse con los áridos produce un material que presenta una enorme resistencia a la compresión, pero con un pobre desempeño frente a la tracción. Esta deficiencia ha sido suplida por el acero de refuerzo, que presenta un excelente comportamiento ante la tracción. La complementación entre acero y hormigón es posible gracias a la buena adherencia entre ambos y a la similitud de sus coeficientes de dilatación térmica.

Pero la durabilidad es el talón de Aquiles del hormigón armado, y por esa razón es que la presente Memoria de Título ha tomado como propósito fundamental el estudio de los fenómenos químicos que, debido al posterior proceso de corrosión que desencadenan, mayor incidencia tienen en la disminución potencial de la vida útil de las estructuras elaboradas con este material de construcción.

En realidad, la propensión a la corrosión del acero, es solucionada sólo parcialmente por la protección física y química que le brinda el hormigón, y por ello es necesario abordar el estudio del problema de la durabilidad, en orden a identificar los factores que podrían incidir en la disminución de ésta.

La permeabilidad del hormigón se debe, principalmente, a que el cemento requiere del orden del 25% de su peso en agua para hidratarse totalmente. Sin embargo, con esta proporción de agua se hace prácticamente imposible lograr una buena trabajabilidad y compactación. Debido a esto, en la práctica se suelen usar relaciones agua / cemento no menores que 0.35, a pesar de la incorporación de aditivos reductores de agua. El agua en exceso que no interviene en la hidratación del cemento posteriormente se evapora. Con su salida deja una gran cantidad de microporos y capilares que son la causa principal de la permeabilidad del hormigón. Esto, sumado a factores como las fisuras producidas por retracciones de fraguado, sedimentación y temperaturas no deseadas, además de la permeabilidad propia de los áridos, tiene como consecuencia que el hormigón es intrínsecamente permeable, y debido a que contiene un cierto grado de humedad, actúa como electrolito, que además, deja pasar el oxígeno hacia las barras de refuerzo. En conclusión, si la protección del acero dependiese sólo de la protección física que le brinda el hormigón a las barras, bastaría con pequeñas diferencias de composición, de aireación, de humedad, o incluso de composición del acero, para producir pilas locales de corrosión activas.

Como ya vimos, el recubrimiento del hormigón no asegura el aislamiento de agentes ambientales agresivos a las barras de refuerzo. Sin embargo, el hormigón les brinda una cierta protección química. Esta protección se debe a que la barra de acero reacciona frente al medio alcalino que le ofrece el hormigón, produciendo una delgada película de óxido de hierro que es estable en este medio, evitando así que el proceso de corrosión continúe. De este modo, las barras de acero se encuentran protegidas químicamente por el ambiente alcalino del hormigón.

La presencia de cloruros y la carbonatación, son los agentes principales que desencadenan la corrosión en las barras de acero. Los iones de cloruro aumentan el potencial del electrodo formado por el conjunto hormigón-acero, produciéndose así la pérdida de pasividad. Por otro lado, la carbonatación es el proceso por el cual el dióxido de carbono se combina con las sales libres del hormigón, disminuyendo así la alcalinidad que produce la pasividad del acero.

2.2 Conceptos básicos del hormigón

2.2.1 Un poco de historia

El hormigón pertenece a una familia de materiales de construcción compuestos que consisten esencialmente en la unión o composición de un material pétreo con una pasta ligante. El material pétreo debe ser inerte. Llamamos ligante al material activo que cumple con la condición de plasticidad y docilidad en el momento de proceder a su colocación, para luego adquirir la resistencia que le es característica.

Como ligantes a lo largo de la historia se han usado diversos materiales tales como arcilla, asfalto, yeso, cal y cemento. Al colocar y pegar las piezas del material inerte, tales como piedras, adobes o ladrillos, etc., se forma la albañilería. Cuando el material inerte es un árido pétreo previamente mezclado con el material ligante y el conjunto se vierte a granel con moldajes, tenemos entonces el hormigón. El ligante, para formar el mortero, se usa mezclado con arena, pues ésta reduce la retracción, lo que disminuye la probabilidad de agrietamiento de la moldura al secarse.

Piedra en seco

Históricamente, sin embargo, abundan los antecedentes de culturas antiguas e incluso arcaicas que nos hablan de enormes construcciones en las que se prescindió absolutamente de la utilización de ligantes; es el caso de viejos monumentos megalíticos, templos grecorromanos, construcciones mayas e incaicas, etc. Los romanos solían utilizar el mortero de cal, pero son numerosas las obras aun en pie en que se prescindió totalmente de su uso.

Arcilla

Todo indica que lo primero que se utilizó como aglomerante natural fue la arcilla, material que al añadirle agua adquiere enorme plasticidad, así como una gran rigidez al secarse. Tanto la arcilla como los materiales pétreos para el desarrollo de esta incipiente albañilería, se caracterizan por su abundancia natural en muchos lugares de la tierra. Por ello es que el uso del adobe se encuentra documentado arqueológicamente desde tiempos muy remotos, sobre todo en zonas áridas, y su uso perdura hasta hoy. La pasta de tierra es mezclada con paja para evitar el agrietamiento durante el secado, a lo que contribuye también el proceso de secado gradual mediante la protección del sol directo y del viento durante los primeros días. Mesopotamia, Egipto, Grecia y Roma, nos brindan numerosos ejemplos del uso del adobe para la construcción de edificaciones de la más variada laya. Asimismo, España, país donde se acuñó este término de origen morisco, nos ofrece abundantes documentos históricos de su uso. Por ello es que la construcción durante la Colonia en Chile, fue predominantemente llevada a cabo con el uso intensivo de esta técnica, del que hay testimonio escrito desde la llegada misma de Pedro de Valdivia.

El primer antecedente de una técnica similar a la del hormigón actual es el tapial, muro construido con arcilla, áridos finos y gruesos, agua, y la utilización de un molde formado por tableros. Los romanos llamaban formaceos a estos tapiales, probable origen de la palabra “hormigón” (forma = horma). Datos fidedignos nos hablan de su secular perdurabilidad. Como ya se dijo, en nuestro país predominó el adobe, y la técnica del tapial, llamado también “adobón”, sólo se usó excepcionalmente en la erección de fuertes y algunas iglesias.

Asfalto

Herodoto es el primero que describe la utilización en Babilonia de un betún con el que se pegaban los ladrillos de arcilla cocidos, técnica superior a la del adobe y desarrollada en la Mesopotamia antigua. El betún mencionado es el que hoy conocemos como asfalto, muy abundante hasta hoy en Palestina, el que flotaba en un afluente del Éufrates en forma de grumos.

Yeso

Este material fue usado por los egipcios a modo de pasta aglomerante. Su gran inconveniente es que la humedad tiende a disolverlo. Se sabe que se usó en la construcción de las grandes pirámides faraónicas, donde su utilización se justificaba por la facilitación que brindaba a la superposición de los pesados bloques con que fueron erigidas, ya que disminuía en un grado considerable la fricción del bloque ya emplazado con el que se iba a colocar, lo que permitía un más fácil deslizamiento del nuevo bloque hasta ajustar su posición. Esta disminución de la fricción, en todo caso, es una función que obligatoriamente debe cumplir el mortero usado en toda obra de albañilería, incluido el hormigón, ya que si el mortero no envuelve totalmente los granos de grava y no se reduce la fricción interna durante el secado, puede haber nocivas interferencias en el proceso de compactación y acomodo de las piezas colindantes.

Cal

El descubrimiento de la cal como material aglomerante es un suceso que casi con seguridad acaeció espontánea e independientemente en distintas culturas donde el azar debió mostrar los efectos que el fuego y luego el agua producían sobre la piedra caliza. Su primer uso, a juzgar por las crónicas antiguas, debió reducirse a su aplicación como revestimiento de superficies, lo que comúnmente se conoce como estuco. Se sabe que los griegos la usaron como mortero de albañilería, y que explotaron caleras en las islas Cícladas. También hay datos de recientes excavaciones arqueológicas en Galilea, donde se estima que el uso de cales se remontaría a unos 7.000 años antes de Cristo.

El perfeccionamiento de la técnica de hormigones de cal se lo debemos a los romanos, quienes hicieron de la experimentación con este material un acopio de técnicas de gran utilidad, ya que permitió el desarrollo del arco como motivo arquitectónico de enorme aplicabilidad.

La experimentación llevó a la incorporación de la puzolana, sobre todo en obras portuarias, donde la cal sola presentaba la limitante, ya mencionada, de su baja resistencia a la humedad. Pronto los romanos se dieron cuenta que la puzolana se endurecía homogéneamente incluso bajo el agua, ya que su endurecimiento no depende de la paulatina penetración del aire desde la superficie hacia el interior.

El hormigón pertenece a una familia de materiales de construcción compuestos que consisten esencialmente en la unión o composición de un material pétreo con una pasta ligante. Llamamos ligante al material activo que cumple con la condición de plasticidad y docilidad en el momento de proceder a su colocación, para luego adquirir la resistencia que le es característica. El material pétreo, por su parte, debe ser inerte.

El hormigón armado consiste en una unión de acero y hormigón, íntimamente ligados en piezas o elementos resistentes. Esta unión es posible gracias a la buena adherencia entre ambos y a la similitud de sus coeficientes de dilatación térmica, lo que evita que sufra tensiones internas. Con respecto a la durabilidad, la baja estabilidad química del acero en el medio ambiente -lo que hace que se corra fácilmente-, es subsanada por el recubrimiento de hormigón, material altamente durable y protector.

La gran ventaja del hormigón armado consiste en su coherencia monolítica y en su adaptación a cualquier forma (plasticidad). Por ello, el hormigón armado es apropiado tanto para la construcción de obras de gran volumen y cierta tosquedad, como cimentaciones, muros de sostenimiento, presas y puentes macizos, como para la construcción de elementos finos en edificios. Sin embargo, donde el hormigón ha demostrado el máximo de sus posibilidades es en la construcción de cubiertas de gran luz y de estructura ligera y esbelta, en sustitución de las pesadas bóvedas y cúpulas.

2.2.2 Componentes del cemento

El cemento es un material de fabricación artificial, formado por la mezcla de silicatos, aluminato y ferroaluminato de calcio. Se fabrica moliendo finamente arcilla y caliza (CaCO_3), dependiendo de la calidad de la materia prima, en una solución acuosa o en forma seca, formando una "harina cruda" que luego se coloca en un horno giratorio de alta temperatura (1500°C). Aquí la caliza se descompone, formando CaO y la arcilla se deshidrata para posteriormente combinarse formando el clínker. Esto queda claramente ejemplificado en el esquema mostrado en la Figura 1.

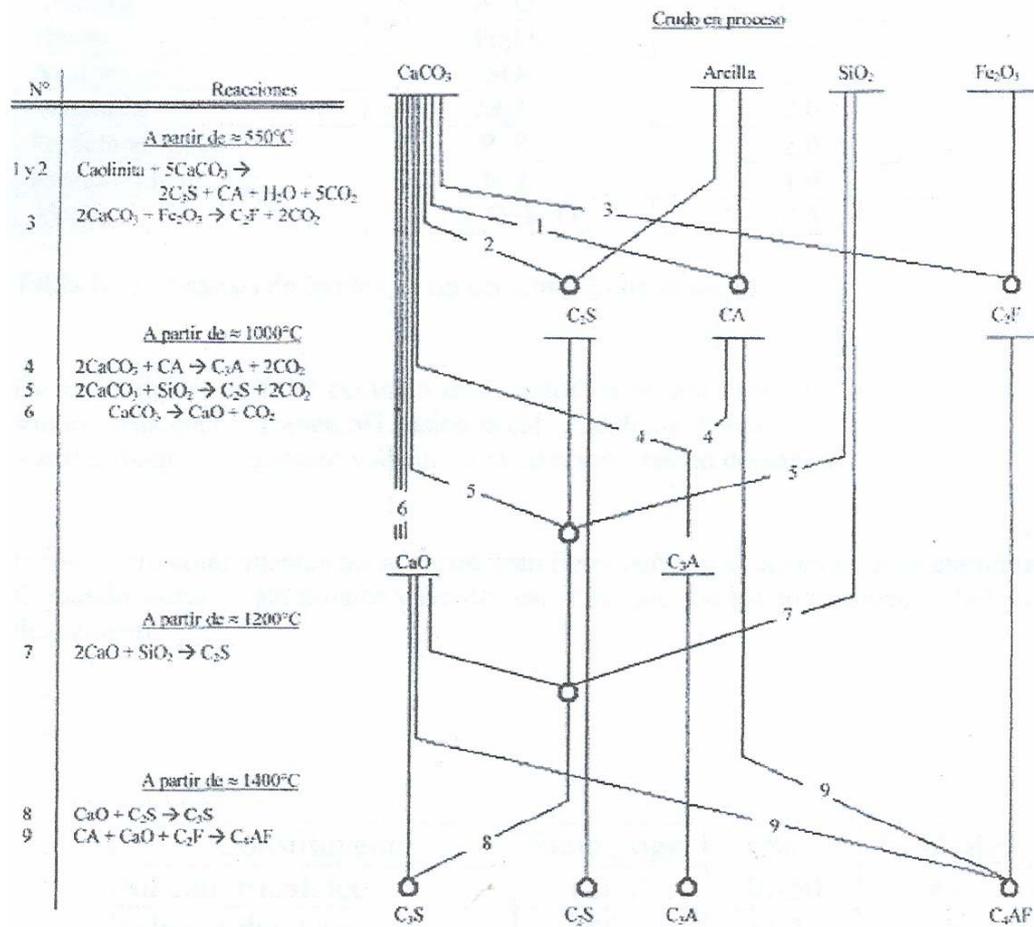


Fig. Nº 1: Reacciones en la cocción del clínker, no considerando el MgO , el residuo de los combustibles, la formación de A_7C_{12} y la espurrita.

Posteriormente el clínker es molido hasta reducirlo a un polvo fino, en conjunto con un pequeño porcentaje de yeso, para retardar su fraguado. El resultado de esta molienda se conoce como Cemento Portland. En el caso de los cementos puzolánicos, a la mezcla antes mencionada también se le agrega puzolana y en los siderúrgicos, escoria de alto horno, y se muelen en conjunto.

Para determinar la composición química del cemento se debe proceder a un análisis. Ésta se expresa en forma de óxidos. La composición química media de un cemento Portland puede ser la siguiente:

Constituyente	Notación	Porcentaje
Cal combinada	CaO	62.5
Sílice	SiO ₂	21.0
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.5
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.5
Azufre	SO ₃	2.0
Magnesia	MgO	2.0
Pérdida al fuego	P. F.	2.0
Residuo insoluble	R. I.	1.0
Álcalis	Na ₂ O+K ₂ O	0.5

Tabla N° 1: Análisis de óxidos de un cemento Portland típico.

De los componentes del cemento enunciados en la tabla anterior, los cuatro primeros son los principales. Tienen pH básico la cal, y ácido los demás.

Azufre, óxido de magnesio y álcalis, son componentes no deseados.

Estos cuatro componentes no se encuentran libremente en el cemento, sino combinados, formando silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los constituyentes hidráulicos del cemento.

Constituyente	Simbología	%	% Medio
Silicato tricálcico	(SC ₃)	40-50	48
Silicato dicálcico	(SC ₂)	20-30	28
Aluminato tricálcico	(AC ₃)	10-15	12
Alumino ferrito tetracálcico	(AFC ₄)	5-10	8

Tabla N°2: Constituyentes principales del cemento Portland.

A continuación enunciaremos algunas características de los cuatro componentes citados:

a) Silicato tricálcico.

Es el compuesto más activo del clínker. Desarrolla una elevada resistencia inicial, y un elevado calor de hidratación. Su fraguado es relativamente lento en comparación con el aluminato tricálcico y su endurecimiento es bastante rápido. Por esta razón, para cementos de endurecimiento rápido y los de altas resistencias, se le encuentra en gran proporción.

b) Silicato dicálcico

Este componente comunica al cemento su resistencia a largo plazo, gracias a su lentitud en el fraguado y endurecimiento. Su calor de hidratación es el más bajo de los cuatro.

c) Aluminato tricálcico

Suministra al cemento un calor de hidratación muy alto. Posee una elevadísima velocidad de fraguado y gran retracción, por lo que gobierna las resistencias a corto plazo.

d) Aluminoferrito tetracálcico

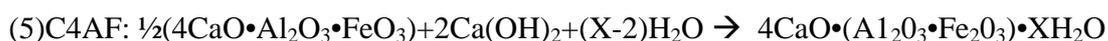
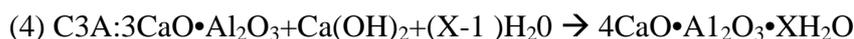
No participa prácticamente en las resistencias mecánicas y su presencia se debe a la necesidad de utilizar fundentes que contienen hierro en la fabricación del clínker. Tiene un pequeño calor de hidratación y gran velocidad de fraguado.

2.2.3. Proceso de hidratación del cemento

La resistencia del hormigón se debe a las reacciones químicas que se van produciendo al mezclarse el agua con el cemento, proceso que llamamos hidratación.

Como ya lo hemos dejado establecido, los compuestos principales del cemento son el silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. Los silicatos solamente, constituyen aproximadamente el 75% del cemento sin hidratar.

A continuación se presentan las reacciones producidas durante el proceso de hidratación: Ecuaciones de Keil (1973).



(Siendo X = 13 ó 19).

En las ecuaciones 2) y 3) se puede observar que las reacciones que se producen con los silicatos tricálcico y dicálcico, producen la liberación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). En cambio, las reacciones que producen los aluminatos y ferroaluminatos lo consumen; sin embargo, a consecuencia de la mayor presencia de los silicatos, se genera una alta producción de hidróxido de calcio, factor que resulta decisivo para la alcalinidad del hormigón.

Pero la alcalinidad del hormigón no se debe sólo a la liberación del hidróxido de calcio durante el proceso de hidratación, pues, aunque en una proporción menos significativa, también tienen un papel importante las reacciones que producen los álcalis óxido de potasio (K_2O) y óxido de sodio (Na_2O), los que durante el proceso de hidratación, dan lugar a la formación del hidróxido de potasio ($\text{K}(\text{OH})$) e hidróxido de sodio ($\text{Na}(\text{OH})$), respectivamente.

2.3 Fenómeno de la difusión

La difusión de gases a través de un medio poroso –fenómeno que reviste especial importancia, dados los propósitos de este estudio–, responde a la fórmula de la primera ley de Fick:

$$J = -D \frac{dc}{dL}$$

Donde:

$$\begin{aligned} dc/dL &= \text{Gradiente de concentración en } [\text{kg}/\text{m}^4] \text{ o } [\text{moles}/\text{m}^4] \\ D &= \text{Coeficiente de difusión en } [\text{m}^2/\text{s}]. \quad D = 1/(\text{Masa Molar})^{1/2} \\ J &= \text{Masa transportada en } [\text{kg}/\text{m}^2\text{s}] \text{ o } [\text{moles}/\text{m}^2\text{s}]. \\ L &= \text{Espesor de la muestra en } [\text{m}]. \end{aligned}$$

La difusión de los gases en el interior del hormigón se da en función del gradiente de concentración entre el interior y el exterior (medio ambiente).

En relación con el problema de la durabilidad del hormigón armado, que es el asunto que nos interesa, es necesario poner atención a la difusión del dióxido de carbono y del oxígeno, que son los que producen la neutralización del hidróxido de calcio y la corrosión de las barras de acero, respectivamente.

En el hormigón la difusión de gases se produce a través de los poros y capilares. Debido a ello, hay que tener presente que los valores de J se refieren a la sección de hormigón, y D , al coeficiente de difusión efectivo.

El coeficiente de difusión efectivo D se puede obtener en función de la porosidad de la pasta de cemento y de la humedad relativa del ambiente.

La relación entre el coeficiente de difusión del hormigón y su resistencia a la compresión se expresa en que, a mayor resistencia, el coeficiente de difusión es menor.

Pero hay que tener en cuenta que la difusión de los gases es un fenómeno de larga duración, por lo que es la resistencia a edad avanzada la que se debe tener en consideración, más que la resistencia normalmente especificada, que es a 28 días. En otras palabras, una misma resistencia medida a 28 días, va a tener en el largo plazo un coeficiente de difusión menor en hormigones de cementos más lentos, los que desarrollarán a la postre una mayor capacidad de resistencia.

2.4 Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera.

Al ser este un problema global, pero no “local”, en Chile no tenemos una entidad que mida rigurosamente este elemento. La CONAMA (Comisión Nacional del Medio Ambiente) por ejemplo, mide el monóxido de carbono, por ser este más letal para el ser humano. Sin embargo, para las estructuras lo letal es el dióxido de carbono que penetra por los poros de estas.

La emisión de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera tiene su principal fuente en la quema de combustibles fósiles (gas natural, petróleo) y biomasa (quemadas de roza, leña), en procesos productivos industriales, en el transporte, y en actividades domésticas como cocina y calefacción. Los incendios forestales y de pastizales constituyen también una fuente importante de CO₂ atmosférico.

Según datos estimativos, la concentración del CO₂ atmosférico subió desde 280 ppm en el periodo 1000-1750 a 368 ppm en el año 2000, lo que representa un incremento del 31%.

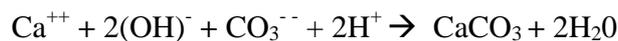
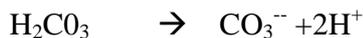
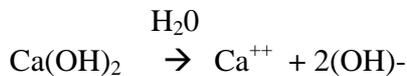
A pesar de que la difusión del dióxido de carbono en la atmósfera es muy rápida, hay lugares donde las concentraciones de este gas alcanzan cifras particularmente altas, como por ejemplo, en túneles de tránsito vehicular y chimeneas, fenómeno que se agudiza al estar la fuente de emisión de CO₂ en el interior de la estructura, lo que unido a una escasa ventilación, provoca concentraciones que no se encuentran normalmente en otros lugares.

2.5 Carbonatación

2.5.1 Proceso químico de la carbonatación

La carbonatación es un fenómeno químico que consiste en una reacción que transforma el hidróxido de calcio en carbonato de calcio, proceso en el curso del cual se pierde la alcalinidad del medio. El dióxido de carbono presente en el medio ambiente, al difundirse hacia el interior del hormigón, se mezcla con el agua que éste mismo contiene, lo cual hace que se forme ácido carbónico. El hidróxido de calcio que se libera en el proceso de hidratación, al cual el hormigón debe en gran medida su alcalinidad, al reaccionar con el ácido carbónico, forma el carbonato de calcio o caliza, cuyo pH es menor. Esta disminución de la alcalinidad propia del hormigón, produce una pérdida de la pasividad química de las armaduras de refuerzo, lo que las hace más susceptibles a la corrosión.

Las ecuaciones por las que se representa este proceso están expuestas a continuación



Ya hemos dejado establecido que la carbonatación es un fenómeno que requiere la presencia de dióxido de carbono y agua. Pero para que ello ocurra, la proporción de agua contenida en el hormigón no puede excederse de cierto rango: el fenómeno de la carbonatación se produce con humedades relativas ambientales (H.R.A.) entre el 30% y el 80%, alcanzando su

máximo cuando H.R.A. se aproxima al 50%. Bajo el 30% de H.R.A., no existe la cantidad mínima de agua necesaria para que el dióxido de carbono se disuelva y forme así, el ácido carbónico. A su vez, cuando H.R.A. se empuja por sobre el 80%, los poros y microporos del hormigón se saturan, generando las condiciones que hacen que el proceso de carbonatación se pueda volver hasta 4 veces más lento. Como ya se explicó anteriormente, la difusión del dióxido de carbono en el agua es 4 veces más lenta que en el aire, lo que produce una demora mucho mayor en el inicio de su contacto con el frente de carbonatación.

2.5.2 Velocidad de avance del frente de carbonatación

El frente de carbonatación avanza hacia el interior describiendo una línea aproximadamente paralela a la cara exterior del hormigón. La velocidad con que va ocurriendo este avance va disminuyendo paulatinamente, debido fundamentalmente a que la distancia que debe recorrer el dióxido de carbono para tomar contacto con el frente de carbonatación (que es donde se va produciendo la reacción química), se va haciendo cada vez mayor; por otra parte, el hormigón, al carbonatarse, disminuye su porosidad, lo que pone más dificultades al ingreso de gases.

La velocidad de avance del frente de carbonatación depende de variados factores, pero algunos de ellos tienen una mayor incidencia en el fenómeno. Son principalmente los siguientes:

- a) Tipo de cemento.
- b) Permeabilidad del hormigón.
- c) Curado del hormigón.
- d) Humedad relativa del aire.
- e) Concentración de CO₂ en el ambiente.

Muchos estudios han permitido cuantificar la velocidad de avance del frente de carbonatación. En todos ellos se toma en cuenta cada uno de estos factores, pero hay algunos estudios (v.gr. Papadakis, 1991) que además de los factores que hemos mencionado, incorporan también en el análisis las concentraciones de silicatos en el cemento y de hidróxido de calcio en el hormigón, de lo que resultan fórmulas algo más complejas, pero, tal vez, más descriptivas del problema.

Entre las que han alcanzado mayor celebridad y reputación en nuestros días, está la que desarrolló Minoru Hamada en el año 1968, fórmula que permite cuantificar el avance del frente de carbonatación en el tiempo tomando en consideración variables como el tipo de cemento, la razón agua / cemento, el tipo de áridos y terminación superficial, lográndolos relacionar de una manera relativamente simple.

El tiempo “t” que demora el frente de carbonatación en alcanzar una cierta profundidad, queda dado por la siguiente expresión:

$$t = \frac{k x^2}{R^2}$$

$$k = \frac{0,3(1,15+3w)}{(w - 0,25)^2}$$

Donde:

$$R = r_c \times r_a \times r_s$$

w = Razón agua/cemento.

r_c , r_a , r_s se obtienen a partir de las siguientes tablas:

Tipos de Cemento	Cemento Portland		Cemento Siderúrgico		Cemento puzolánico	Cemento con ceniza volcánica (20%)
	Corriente	Alta Resistencia	30-40% Escoria	60% Escoria		
r_c	1.0	0.6	1.4	2.2	1.7	1.9

Tipos de agregados	Arena de río, grava de río.	Arena de río, grava de pumicita	Arena de pumicita, grava de pumicita	Ceniza volcánica (fina, gruesa)
R_a	1.0	1.2	2.9	3.3

Terminación	Plana	AEA	Agente
Superficial		(incorporador de aire)	Dispersante
r_s	1.0	0.6	0.4

Tabla N°3: Valores de las constantes r_c , r_a , r_s utilizadas en la formula de Hamada.

Un factor fundamental que no está considerado en la fórmula, y que tiene una incidencia más que notoria en la velocidad de avance de la carbonatación, es el tiempo de curado inicial del hormigón, pues el hormigón se hace menos propenso a la carbonatación en la medida que aumenta el tiempo de curado húmedo inicial.

Muy importante es hacer notar, que la fórmula de Hamada no sirve para calcular el avance del frente de carbonatación en estructuras que se encuentren bajo tierra.

2.5.3 Otros efectos de la carbonatación

Hemos definido la carbonatación como el proceso químico que se produce al reaccionar el hidróxido de calcio con el dióxido de carbono de la atmósfera, lo que deriva directamente en una disminución de la alcalinidad que le es propia al hormigón. Sin embargo, no es éste el único efecto que se produce. Además, existen otros, aunque en general su repercusión es menos relevante que éste al que aquí hacemos referencia.

Pero también hay efectos positivos. Uno de ellos es que, al producirse la reacción del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono, resulta carbonato de calcio más agua; como este último ocupa un mayor volumen, la porosidad del hormigón se ve reducida; luego, la liberación de agua que se produce, contribuye a que continúe el proceso de hidratación de la pasta ligante, lo que redundará en un aumento de la capacidad de resistencia en la zona carbonatada del hormigón. Esto es lo que nos debe hacer tener especial cuidado con la utilización de métodos esclerométricos -como el martillo Schmidt-, para determinar la resistencia de un hormigón carbonatado, pues este instrumento basa el cálculo de la resistencia fundamentalmente en la dureza superficial del hormigón, relacionándola con un determinado standard de resistencia, prefijado a 28 días, de donde el cálculo podría resultar excesivo, lo que nos debe llevar a corregirlo.

Otra consecuencia importante a tener en cuenta es que la pérdida de humedad que se produce en el proceso de hidratación originado por la carbonatación, hace aumentar las tensiones superficiales en el hormigón. Como resultado de estas tensiones se produce una fisuración superficial que aun cuando no afecta a la masa de hormigón, puede afear su aspecto. Este efecto no deseado es el que comúnmente llamamos retracción por carbonatación.

2.6 Proceso Químico de la Corrosión

2.6.1 Corrosión y protección

Estadísticamente la corrosión es una anomalía, pero podemos asegurar que los casos en que se produce es por la alteración de ciertas variables, alteración que es provocada por dos factores principales: la presencia de cloruros y la carbonatación. Los cloruros, ya provengan de los materiales usados en la preparación del hormigón, o hayan ingresado desde el exterior, destruyen la pasividad del acero, creando las condiciones para iniciar el proceso corrosivo. A su vez, el contenido carbónico del aire es un factor de neutralización de la alcalinidad del hormigón, y su capacidad de penetrar, y por ende, de llegar hasta las armaduras, se halla en función del tiempo y de la permeabilidad.

Se supone, en general, que la seguridad de las construcciones en hormigón es un asunto garantizado, por ello causa conmoción cuando en algún caso aparece corrosión en las barras de acero del hormigón armado. Pero en realidad no es tan evidente que el hormigón sea un protector eficaz del acero, pues al parecer, el mecanismo por el que se lleva a cabo el proceso corrosivo es más complejo de lo que en general se piensa, y no bastaría la barrera física que opone el cemento para que las armaduras no se corroan. Incluso siendo el espesor del recubrimiento superior a 2 cm. -lo que supera ampliamente al de una película de pintura- nada garantiza que podamos evitarlo.

El hormigón es un material esencialmente permeable y con un cierto grado de humedad propia, la que resulta suficiente para actuar como electrolito y permitir así que el oxígeno pase a las armaduras. La barrera física que opone el recubrimiento de hormigón, entonces, no bastaría para evitar la corrosión, pues al ser inestable el equilibrio en que se encuentra el acero, diferencias aparentemente insignificantes de composición tanto del acero como del mismo hormigón, de la humedad, de la aireación, etc., podrían ocasionar la aparición de pilas locales de corrosión. Resulta pues, que la barrera protectora es esencialmente química, y sólo accidentalmente física, lo que no obsta a que esta última sea muy necesaria, lo que supone asegurar que las condiciones de exposición del acero sean las adecuadas al objeto de preservar las variables que eviten el inicio de un proceso corrosivo.

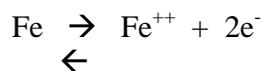
2.6.2 Mecanismo de la Corrosión

El hierro no existe naturalmente en estado puro. Su forma natural son los óxidos, que es la modalidad en que se presentan los llamados minerales de hierro, de los cuales se obtiene el acero a través de un proceso de reducción del óxido mediante la aplicación de enormes cantidades de energía calórica que hacen que el óxido libere su componente de oxígeno, quedando así el metal. Esto deja al hierro en un estado de energía potencial, es decir, en una situación de inestabilidad química, lo que hace que al volver a un ambiente natural tienda a recapturar el oxígeno perdido artificialmente, y recuperar así su estabilidad. Esta, que es una cualidad general de los metales, se puede medir electroquímicamente y establecer de este modo el llamado potencial de electrodo de un determinado elemento.

Al sumergir una barra de hierro en una solución, el hierro tenderá a pasar a la solución bajo la forma de iones positivos (cationes), y liberará electrones.



Como contrapartida a esta reacción química, se produce recíprocamente la tendencia a la recombinación de los iones y los electrones, de manera que se alcanza un equilibrio dinámico en que iones y electrones se recombinan a la misma velocidad con que se forman.



Al quedar con exceso de electrones libres, el hierro queda con carga negativa, es decir, con potencial de electrodo. Esto no debiese causar peligro alguno, pero sucede que el hierro puede presentar diferencias granulares en su composición, las que harían heterogéneo el potencial de electrodo del propio hierro, generando así reacciones electroquímicas entre distintos puntos de la armadura.

Pero la solución, en este caso la pasta de cemento que actúa como electrolito, también puede presentar heterogeneidades en su composición que produzcan diferencias de potencial.

Si dos trozos de hierro con distinto potencial son sumergidos en una solución electrolítica puede ocurrir que la reacción anódica se complemente con una reacción en el cátodo. Para que ello ocurra en un medio alcalino como el hormigón, se requiere la presencia de oxígeno.

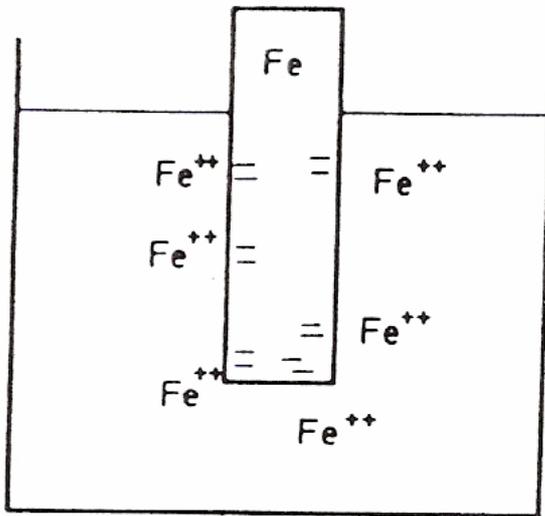
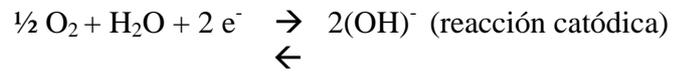
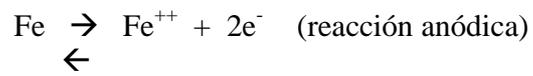


Fig. N° 2: Formación de un potencial de electrodo por disociación iónica del hierro.

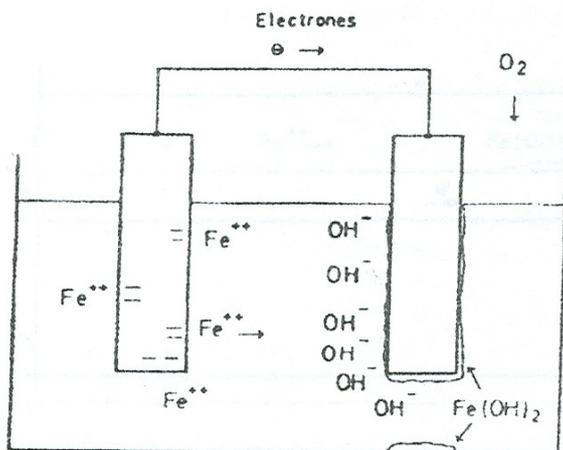
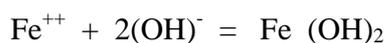


Fig.Nº 3: Corrosión galvánica del hierro.

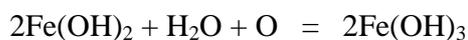
Los iones OH^- y los iones Fe^{++} presentes en el electrolito, se encuentran y reaccionan entre sí.



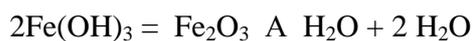
Como el hidróxido ferroso es prácticamente insoluble, precipita y retira los iones Fe^{++} y $(\text{OH})^-$ del electrolito, por lo que las reacciones anódica y catódica se desequilibran y actúan hacia la derecha.

La formación de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ requiere movilidad de los iones para que entren en contacto. Pero los iones Fe^{++} , que son de un radio menor, se difunden más rápido que los iones $(\text{OH})^-$ que son de tamaño mayor; además, solamente un ion Fe^{++} debe emigrar hacia el cátodo por cada dos iones $(\text{OH})^-$ que deberían ir hacia el ánodo. Por eso la corrosión se produce en el ánodo, aunque los productos de la corrosión se depositan en el cátodo.

Pero el óxido ferroso, por acción del oxígeno, se puede transformar en hidróxido férrico.



El hidróxido férrico se puede transformar en óxido férrico hidratado o en un oxi-hidróxido de hierro.



Estos productos o la mezcla de ellos, constituyen la herrumbre.

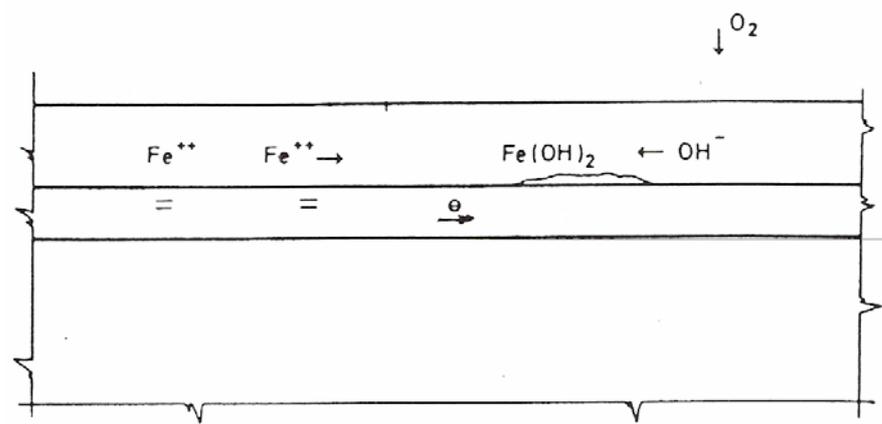


Fig. N° 4: Corrosión galvánica del acero en el hormigón.

No obstante todo lo dicho, para que este proceso corrosivo tenga lugar en las barras de acero, la capa protectora de óxido tendría que presentar alguna ruptura o discontinuidad, de modo que el circuito electroquímico se cierre.

No habrá, por lo tanto, corrosión si no se dan las siguientes condiciones:

- Diferencia de potencial de electrodo
- Conexión eléctrica entre electrodos
- Acceso de oxígeno al cátodo
- Humedad en el hormigón
- Falla de la capa protectora.

2.7. Corrosión de las armaduras inducida por cloruros

La corrosión producida por cloruros resulta más compleja de entender que la que se produce por carbonatación, ya que se asocia con intensos ataques locales que afectan a las barras de acero, problema que se conoce como “pitting” o picadura.

Los fundamentos del proceso químico de la corrosión, ya han sido explicados, y se ha hablado largamente de los daños que provoca en el hormigón. Sin embargo, y aun cuando esta memoria está enfocada principalmente hacia la corrosión producida por la carbonatación, también haremos mediciones para determinar el porcentaje de ion cloruro presente en el hormigón (Puente Quillota), y tener así una visión más completa del fenómeno de la corrosión.

El fenómeno de “pitting” provoca dificultades para establecer los límites en el nivel permisible de contaminación de cloruros en el hormigón, sobre todo cuando se usan cementos compuestos. Según diversos autores, la corrosión se inicia para contenidos de iones Cl^- que variarían entre 0.025% y 0.04% en peso del hormigón (0.6 a 0.95 kg/m^3). Si bien el mecanismo de “pitting” es complejo, un aspecto esencial del proceso es la alteración de la composición química de una zona respecto de las que se hallan inmediatamente a su lado; para que el proceso continúe, la concentración local de iones Cl^- debe aumentar respecto de la concentración de iones OH^- . Si esta condición no se cumple, la zona de acero donde se está produciendo la alteración volverá a ser pasiva.

Este modelo, permite estimar el riesgo de corrosión del acero en el hormigón inducida por cloruros en base a dos parámetros, los que se relacionan con los procesos químicos que tienen lugar en la matriz de cemento:

- En la fase acuosa de los poros, las concentraciones relativas de iones Cl^- agresivos y iones OH^- inhibidores.
- La movilidad iónica, que determina la capacidad de difusión de los cloruros. El proceso de “pitting” tiende a desactivarse cuando la matriz de cemento interrumpe o retrasa el tránsito de iones Cl^- .

Una diversidad de factores puede influir sobre el primer parámetro; entre ellos, la alcalinidad del cemento está entre los de primer orden. Asimismo, el contenido de aluminato tricálcico (C_3A) es importante, pues en esta fase forma un complejo insoluble, -el cloro-aluminato de calcio-, que disminuye la concentración de iones Cl^- en los poros. Estos iones pueden liberarse porque la presencia de sulfatos hace formarse primero el complejo sulfo—aluminato de calcio. Otros factores, tales como la forma cristalográfica del aluminato tricálcico, la temperatura y la descomposición del cloro—aluminato de calcio debida a la carbonatación, pueden determinar la concentración de iones Cl^- . También se ha observado algún grado de influencia del tipo de catión asociado a este ión, particularmente durante los primeros estados de hidratación del cemento.

Las dinámicas fundamentales a través de las cuales los iones Cl^- se concentran y transportan al interior del hormigón son los siguientes:

Capilaridad:

El agua, al pasar de las caras externas saturadas hacia las caras internas alcanzará un punto en que la tasa de abastecimiento de agua será igual a la de evaporación. En esta condición, las sales solubles contenidas en el agua se depositarán en los poros del hormigón, de lo que resultarán elevadas concentraciones de sales y particularmente de cloruros.

Difusión iónica:

Los iones Cl^- penetran el hormigón a través del agua presente en los poros. La velocidad de avance está determinada, entre otros factores, por la química del cemento (es decir el contenido de C_3A que tiene la capacidad de fijar cloruros), el gradiente de concentración, los procedimientos de curado, y el tamaño y orientación de los poros capilares que están determinados por los materiales constituyentes del hormigón y sus proporciones.

Factores como la estructura de poros, las propiedades mineralógicas de la matriz de cemento del hormigón, la concentración y naturaleza de los cloruros, y el contenido de humedad, tienen gran influencia en tanto variables de difusión iónica.

Los iones Cl^- que se encuentran en los poros del hormigón se originan principalmente en los materiales que constituyen al hormigón: agua de amasado, aditivos aceleradores de fraguado, áridos contaminados con diversas sales, y finalmente, el propio cemento. En seguida deberemos considerar los iones procedentes del exterior, del agua de mar (Puente Quillota, Puente Libertad y Puente Mercado), de suelos salinos, o expuesta a agua con cloro y que atraviesan la masa de

hormigón hasta alcanzar las armaduras.

La penetración y la acumulación de iones Cl^- en el hormigón desde el medio ambiente se puede explicar porque los hormigones están formados por partículas sólidas en un sistema poroso, que constituye un medio físico ideal para el transporte de soluciones salinas.

CAPITULO III
METODOLOGIA Y EQUIPOS UTILIZADOS

3.1. Metodología para medir la carbonatación

Debido a que uno de los objetivos fundamentales que nos hemos propuesto es el estudio del avance del frente de carbonatación y la profundidad que eventualmente alcance, nos interesa estudiar estructuras con una edad prolongada en las cuales el fenómeno debiera encontrarse relativamente avanzado. Para ello procederemos a analizar antiguos edificios de nuestro país, basándonos en una preestimación sacada a partir de la fórmula de Hamada.

En nuestro procedimiento utilizaremos el método definido por la norma RILEM CPC-18. Sin embargo, como la velocidad de avance del frente de carbonatación depende de muchas variables, es necesario además, determinar con precisión datos tales como el tipo de cemento utilizado, la resistencia a la compresión del hormigón y la edad de la estructura.

3.1.1 Procedimiento de extracción de testigos.

Necesariamente, la extracción de un testigo de hormigón producirá algún daño a la estructura del edificio sometido a estudio. Sin embargo este daño se puede muchas veces disminuir hasta un punto que para efectos prácticos no resulta ser de consideración. Para que ello resulte así, es necesario extraer testigos en lugares donde las solicitaciones estructurales sean las menores posibles y donde a la vez el daño estético no sea demasiado considerable.

El proceso de extracción de testigos tomó alrededor de 120 minutos (para 6 testigos), y fue necesario poner atención en algunos aspectos, tales como que no existen testigueras que trabajen sobre cabeza, es decir, que permitan sacar muestras del cielo de una habitación. Sólo se puede medir con éstas hacia abajo, o muros, pero no hacia arriba, pues el agua que enfría las piezas perforantes puede entrar al motor, lo que obliga a una espera de dos horas para que se seque, pues de lo contrario el operador puede sufrir un golpe de corriente. Este obstáculo fue clave en la elección del lugar a examinar, por ejemplo, en la Escuela de Ingeniería, donde a primera vista era más fácil obtener una muestra del techo de la sala 3 sur. Finalmente se optó por extraer testigos de la losa de la sala 18 sur, pues una eventual caída de agua no ocasionaría daños, ya que debajo de esta estructura había un pasillo.

Otro aspecto importante a la hora de elegir el lugar es poner atención a que no haya cañerías, ya que la testiguera ocupa mucha agua en el proceso de extracción y esta podría caer sobre ellas y originar graves problemas.

3.1.2 Determinación de la profundidad de carbonatación.

En la norma RILEM CPC-18, que es la que se utiliza para determinar la profundidad de carbonatación alcanzada por un elemento estructural de hormigón, se señalan dos posibles métodos para ser utilizados. Uno de ellos consiste en picar con un cincel el hormigón hasta llegar a una profundidad en la cual al rociar una solución de fenolftaleína se torna de un color violeta (no hay carbonatación); luego de esto se debe medir la distancia existente entre la superficie del hormigón y la zona donde se produce el inicio del color rojizo. Esta medición se hace en forma perpendicular a la superficie, revelando la profundidad de carbonatación del hormigón, y es el método que se debió utilizar en los Tribunales de Justicia, donde no se nos permitió proceder a la extracción de testigos.

El otro método que propone la norma y que es en general el más el usado, y el que se ha preferido en el presente estudio (Internado Barros Arana, Puente Quillota, Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, Puente Libertad y Puente Mercado), consiste en extraer un testigo de hormigón de a lo menos 2" de diámetro (en esta memoria se sacaron testigos de 4") al cual posteriormente se le realiza el ensayo de hendimiento con el objetivo de partir la probeta de manera diametral, para luego de esto rociar la zona fracturada con la solución de fenolftaleína, quedando de esta manera mucho más cómoda la medición de la profundidad de carbonatación.

La solución de fenolftaleína que propone la norma RILEM está compuesta por un 1 % de fenolftaleína disuelta en una solución que contiene un 70% de alcohol. De esta manera se tiene una solución que se torna de un color rojizo al estar en contacto con materiales que posean un pH > 9,2 y mantiene el color del material al poseer éste un pH <9,2.

Reviste una enorme importancia realizar el ensayo de hendimiento, ya que al extraer una probeta se produce un lavado del testigo en su cara lateral debido a la gran cantidad de agua que ocupa la testiguera en su funcionamiento. A consecuencia de esto, si se rocía la solución de fenolftaleína directamente sobre la cara cilíndrica obtenemos un límite de carbonatación muy poco claro y disparejo; en cambio, al rociar la solución sobre la zona fracturada después de haber realizado el ensayo de hendimiento, aparece un frente de carbonatación mucho más parejo y claro. Se probó echar la solución de fenolftaleína inmediatamente, pero los resultados eran muy diferentes a los obtenidos al echarla después del ensayo de hendimiento.

La norma RILEM nos indica también que las mediciones de profundidad de carbonatación se deben hacer en los lugares donde no haya áridos de gran tamaño, es decir, se deben hacer en lugares donde el frente esté, en lo posible, sólo con pasta de cemento. La norma indica además, que la exactitud con que se hace la medición se debe aproximar al milímetro.

Ensayo de Hendimiento



Foto N° 1: Colocación testigo



Foto N°2: Testigo ensayado

3.1.3. Determinación de la resistencia a la compresión.

Para la determinación de la resistencia a la compresión del hormigón en estudio, existen diversos métodos, los cuales se pueden clasificar entre métodos destructivos y métodos no destructivos.

En el caso de la presente investigación se utilizaron ambos.

La metodología para determinar la resistencia a la compresión del hormigón a partir del martillo Schmidt, es la siguiente:

- Antes de comenzar la utilización del martillo, éste debe ser calibrado.
- Se determina el lugar donde se va a medir la resistencia y se marcan 16 puntos equidistantes dentro de un cuadrado de alrededor de 20 cm de arista. Se busca que los puntos no estén en lugares donde existan piedras o algún tipo de irregularidades que afecten las mediciones a tomar.
- Luego de obtener los resultados de los rebotes con el martillo, se procede a eliminar los 3 valores más altos y los 3 valores más bajos obtenidos.
- Con los 10 valores restantes de los rebotes, se calcula el promedio.

Una vez obtenido el promedio de la magnitud de los rebotes con el martillo, se procede a determinar la resistencia a la compresión del hormigón a partir de la curva que trae adosada el instrumento, la cual liga una determinada magnitud de rebote a una resistencia a la compresión, dependiendo del ángulo con la horizontal utilizado con el instrumento para obtener las magnitudes de los rebotes. En esta memoria se ocupó la curva de correlación para un ángulo de ejecución de 0°, por tratarse de estructuras verticales (cepas, muros, etc.)

Otro método –de carácter destructivo, a diferencia del anterior-, que sirve para determinar la resistencia a la compresión de los testigos, es el que propone la Norma NCh 1565 of 79. Antes de ensayar el testigo es sometido a un emparejamiento de su superficie, y luego al proceso de refrentado.

3.1.4 Determinación del estado de corrosión de las armaduras

La manera más conveniente de determinar el estado de corrosión de las armaduras, es realizando un pequeño orificio. Ello permite apreciarlas a simple vista, y así determinar su estado y el espesor del recubrimiento de hormigón. Otro dato que conviene registrar es el diámetro de las barras. No se hicieron medidas químicas para medir corrosión, puesto que la mayoría de los instrumentos para medirla requieren que el proceso de corrosión este activo, y esto no se dio en las estructuras estudiadas, debido a la antigüedad de ellas.

3.1.5. Reparación de daños producidos a la estructura

Una vez terminada la experimentación, fueron reparados los orificios y desperfectos que se le ocasionaron a las construcciones como consecuencia de la extracción de testigos. Para esto utilizamos un mortero PRÉSEC T-09 para Reparaciones Alta Resistencia, que tiene las siguientes características técnicas:

Resistencia característica	200 kg/cm ²
Resistencia a la tracción (adherencia)	6 kg/cm ²
Tamaño máximo nominal	1,25 mm
Grado resistencia hidráulica	8 - 9
Retentividad	Grado 1 (>70%)
Rendimiento saco 2 kg.:	1,2 ± 0,04 lt/saco
Rendimiento saco 5 kg.:	3 ± 0,1 lt/saco
Dosis de agua saco 2 kg.:	0,4 ± 0,1 lt/saco
Dosis de agua saco 5 kg.:	1,2 ± 0,1 lt/saco
Tiempo de trabajabilidad:	60 min.
Consistencia:	Plástica

Tabla N°4: Características mortero Presec



Foto N° 3: Ejemplo de reparación Internado Nacional Barros Arana

3.2. Instrumentos utilizados para medir la Carbonatación

Para la realización de los experimentos se utilizaron los siguientes instrumentos:

Testiguera:

Máquina utilizada para la extracción de testigos cilíndricos de hormigón, que consta básicamente de una broca cilíndrica diamantada la cual gira impulsada por un motor de manera muy similar a la de un taladro convencional. El diámetro de la broca a usar depende principalmente del tamaño máximo del agregado que posea el hormigón y del posterior tipo de ensayo que se desee realizar al testigo.



Foto N°4: Ejemplo uso testiguera Puente Quillota

Martillo Schmidt:

Instrumento utilizado para determinar aproximadamente la resistencia a la compresión del hormigón endurecido. La importancia de éste instrumento es que permite obtener la resistencia del hormigón sin producir daño alguno a la estructura. Mide la dureza del hormigón basándose en un martillo de acero impulsado por un resorte que al dispararse golpea un émbolo de acero en contacto con la superficie de hormigón. Cuando se usa en hormigones antiguos se debe hacer una corrección ya que este instrumento está calibrado para dar la resistencia a los 28 días.



Foto N° 5: Ejemplo de utilización Martillo Schmidt Puente Quillota

Generador Eléctrico:

Este aparato fue necesario en la extracción de testigos del Puente Quillota, pues no se disponía de electricidad para el funcionamiento de la testiguera.



Foto N° 6: Generador eléctrico usado en Puente Quillota

3.3 Metodología para la extracción y determinación de la concentración de ion cloruro

Hemos seguido la metodología propuesta por el ingeniero Héctor Varela Díaz, que es la empleada actualmente por la Unidad Química del Laboratorio de Aglomerantes del IDIEM. Los pasos a seguir son los siguientes:

Tomar alrededor de 2 kg de muestra, triturlarla hasta que pase por malla ASTM # 10 (abertura 2,0 mm). Hacer muestreo representativo de aproximadamente 500 g y secar a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante. Moler hasta pasar por malla ASTM # 140 (abertura 0,105 mm).

Pesar alrededor de 20 g de muestra con aproximación a 0,1 mg transferirla a un cartucho filtrante de celulosa Extraktion Huslen (Schleicher Schull N°603) y colocarlo en el cuerpo del extractor Soxhlet. Agregar 200 ml de agua destilada al balón, ajustar uniones y mantener en funcionamiento durante 6 horas. Enfriar la solución y diluir a 400 ml con agua destilada, agregar gotas de fenolftaleína y neutralizar con solución de HNO_3 2N hasta decoloración del color rosado.

Enrasar en matraz aforado de 500 ml.

Tomar una alícuota de 100 ml, rebajar el pH a un valor de $2,5 \pm 0,2$ agregando gota a gota solución de HNO_3 2N.

Agregar 10 gotas del indicador difenil carbazona bromofenol y titular con solución $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ 0,025 N hasta que el color cambia a azul violeta.

3.4 Instrumentos utilizados para medir concentración de ion cloruro

El material usado así como los reactivos químicos empleados tanto para la extracción como para la determinación de la concentración de ión cloruro son los siguientes:

Extracción:

Equipo de extracción Soxhlet.

Plancha de temperatura.

Agua destilada.

Determinación de concentración de iones cloruro:

Matraz aforado de 500 ml.

Reactivos ácido nítrico y nitrato mercúrico.

Indicador difenil carbazona bromofenol

Peachímetro.

Bureta

Agitador magnético

Fotos instrumentos utilizados en proceso de medición concentración de ion cloruro



Foto N° 7: Testigo después del proceso de Lixiviación



Foto N° 8 : Bureta que contiene el Nitrato Mercúrico



Foto N° 9 : Matraces de aforo de 500 ml



Foto N° 10 : Sistema de Lixiviación

CAPITULO IV
DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS ANALIZADAS Y
PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Características de los edificios a estudiar

La experimentación se llevó a cabo en 8 obras, cuya importancia radica en que están entre las más antiguas construidas en Chile con hormigón armado; el cemento utilizado en la confección de estas obras fue del tipo Portland, debido a que era el único tipo de cemento disponible en el país a la sazón.

Las obras sometidas a estudio son las siguientes: Puente Quillota, Puente Libertad, Puente Mercado, Puente Huaquén, Internado Nacional Barros Arana, Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, Palacio de los Tribunales de Justicia y Escuela de Derecho de la Universidad de Chile.

4.1.1 Puentes de la V Región

El puente Quillota es la primera obra de hormigón armado hecha en Chile, construida por la Compañía Holandesa de Obras de Concreto Armado, que fue la empresa pionera en Chile en la utilización del hormigón armado. El puente, que data de 1908, se encuentra en la calle Quillota, sobre el estero Marga Marga, en la ciudad de Viña del Mar. La desastrosa experiencia acaecida en años anteriores, cuando se derrumbó el edificio nuevo de la casa comercial Prá, ubicada en calle Compañía entre Ahumada y Estado, antes de finalizada su construcción (1905), con una técnica de construcción que se pudo haber confundido con la del hormigón armado, pero que en realidad no lo era, pues sólo se trataba de la utilización de un sistema de construcción mixta de ladrillos huecos, fierro y hormigón armado, provocó una generalizada reacción adversa al uso del nuevo material que se buscaba masificar en país. La importancia histórica de este puente es enorme, pues se trata de la primera obra que se entregó al uso público enteramente edificada mediante la aplicación de esta técnica.



Foto N° 11: Vista general Puente Quillota

El Puente Libertad fue construido en 1950 por la empresa constructora Almarza. Los cálculos de ingeniería los realizó el ingeniero civil José Manuel Herreros, quien también ejerció como Director de Obras de la Municipalidad de Viña del Mar. Ejercía el oficio sin haberse titulado, lo que era frecuente motivo de sorna entre sus pares; esto lo motivó a presentar los cálculos del puente Libertad como Memoria de Grado ante la U. Católica, logrando titularse de ingeniero. La construcción se llevó a cabo para reemplazar el antiguo puente ubicado en el mismo lugar, que databa de 1915. Se le considera el mejor logrado de todos desde el punto de vista arquitectónico y estético.



Foto N°12 : Vista general Puente Libertad

El Puente Mercado es de construcción más reciente, y es el primero que no presenta una forma curva sino plana, pues fue construido siguiendo una técnica francesa de construcción. Fue entregado al uso público en noviembre de 1962.

El puente Huaquén se ubica en el kilómetro 172 de la Carretera Panamericana Norte y fue construido el año 1952. Las mediciones obtenidas corresponden a datos proporcionados por el archivo del IDIEM.

El estudio simultáneo de estos puentes es muy importante para los propósitos de esta memoria, pues permite establecer un criterio comparativo en base a la variable tiempo.



Foto N°13 : Vista cepa Puente Mercado



Foto N° 14: Vista general Puente Huaquén

4.1.2 Edificios de la Región Metropolitana

El edificio del Internado Nacional Barros Arana es de data anterior al objeto que nos ocupa; sin embargo, la construcción de los servicios sanitarios se realizó con posterioridad, y estuvo a cargo de la misma compañía, ya mencionada, que introdujo en Chile la técnica de construcción con hormigón armado. Del Internado Nacional Barros Arana, nos interesa específicamente el servicio sanitario, construido aproximadamente en el año 1910.

La edificación de los servicios sanitarios del I. N. B. A. marcó un importante hito para la historia del uso de este material en Chile, sobre todo desde el punto de vista de la confianza que el público comenzó a mostrar hacia el hormigón armado a partir de las nuevas experiencias exitosas, entre las que se cuenta esta edificación. Para el objeto específico de esta memoria, además, reviste importancia la proximidad de la construcción con una fuente de contaminación de cloruros.

El edificio destinado al funcionamiento del poder judicial, fue construido entre los años 1905 y 1930 por la inspección de arquitectura del ministerio de industrias y obras públicas. El proyecto fue realizado por el arquitecto francés Emilio Doyère, asistido por su alumno Schade. La construcción se realizó en dos etapas. La primera que comprende el sector poniente del edificio e ingreso principal, fue una de las primeras obras fiscales construidas en hormigón armado; para la obra gruesa se contrató a la compañía holandesa, especialista en este tipo de trabajos los que fueron terminados en 1911. La segunda etapa, sector oriente, se inició en 1928; para realizarla se demolió el antiguo edificio del consulado construido en 1807. Las terminaciones estuvieron a cargo de varios contratistas y proveedores: José Ceppi ejecutó las balaustradas de mármol del vestíbulo central, Regulus Prajoux las puertas, ventanas y otras obras de carpintería, los estucos fueron realizados por Bernasconi y Domenichetti, el parquet lo instaló la firma Lisci y Milani, Juan Lumadon instala la calefacción, y Francisco provee la ferretería. Las cariátides son del escultor Antonio Coll y Pi. De estilo neoclásico con claras influencias francesas, el volumen del palacio, de tres pisos, domina la plaza Montt-Varas.

Su fachada principal de mesurada ornamentación marcada por la severidad del sello oficialista, ocupa toda la longitud de la manzana. Este volumen es simétrico con respecto al pórtico de ingreso, ligeramente saliente del plomo del edificio. Este pórtico, formado por dos gruesas y cortas columnas centrales y dos y medias columnas laterales, sostiene un balcón. De los Tribunales de Justicia interesa en particular la oficina de Títulos y grados, que corresponde a la parte inaugurada en el año 1911.

El año 1922, el Presidente de la República don Arturo Alessandri Palma, padre de un entonces joven ingeniero y profesor de esta Escuela y que luego también sería Presidente de la República - don Jorge Alessandri Rodríguez-, inauguró el Edificio de la Escuela de la Universidad de Chile: un edificio construido y financiado íntegramente por el Estado, ubicado en el sector más elegante del Santiago de entonces, y que estaba destinado a la formación gratuita de los ingenieros que requería el país para su desarrollo técnico y científico. Se trató de una gran inversión pública, realizada por un país pobre que entendía que su desarrollo era dependiente de la existencia de universidades de calidad. Fue una política de Estado del Chile republicano de comienzos de siglo, y cuyos resultados son las obras de ingeniería con que nuestros egresados han mejorado la calidad de vida de la población.

En el año ya señalado la Facultad se trasladó al nuevo edificio construido especialmente para ella, ubicado en la calle Benavente 850, actual calle Beauchef. La inauguración oficial tuvo lugar el 8 de abril del mismo año. En esa ocasión, el Instituto de Ingenieros obsequió a la Escuela de Ingeniería la estatua que hasta hoy está en el vestíbulo del edificio.

La Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, fue inaugurada el año 1922, aunque las primeras construcciones son realizadas a partir del año 1912. Aquí las mediciones fueron realizadas en la losa de la sala 18 sur.

Finalmente, se estudió el edificio de la Escuela de Derecho de la Universidad de Chile, que es considerado hoy por hoy una de las joyas arquitectónicas de la ciudad de Santiago. Fue diseñado por el arquitecto Juan Martínez Gutiérrez, y su gran característica es que ha conjugado magistralmente el diseño clásico y la funcionalidad que requerían los propósitos para los que fue construido. El concurso público fue ganado por Martínez en 1934, y generó una fuerte polémica que se divulgó a través de la prensa de la época. Numerosas son las innovaciones que introdujo Martínez tanto en el diseño como en el uso de técnicas de construcción, entre las que se destaca el uso de columnas absolutamente lisas de hormigón, detalle arquitectónico que sólo Walter Gropius lograría emular quince años más tarde cuando diseñó el Centro de Graduaciones de la Universidad de Harvard.

Fue inaugurado en 1938 bajo la segunda presidencia de Arturo Alessandri Palma; las mediciones fueron realizadas a muestras sacadas de las fundaciones y de un sifón que pasaba debajo del edificio.

4.2 Presentación resultados ensayo de carbonatación

Barros Arana

Testigo N°	Profundidad de Carbonatación (cm)		Espesor de recubrimiento (cm)	Altura testigo (cm)
	Profundidad Promedio	Profundidad Máxima		
1	7,7	8,5	2	11,9
2	9,1	10	2	11,2
3	9,8	9,8	2	9,8
4	9,8	9,8	2	9,8
5	2,9	3,5	2	8,5
6	6	6	2	6

Tabla N° 5: Resultados obtenidos en terreno del Internado Nacional Barros Arana

Observaciones:

Fecha de ensayo: 16 de Diciembre de 2005

Testigo N° 4 pertenece a una viga, testigos 1,2,3,5 y 6 pertenecientes a columna.

Testigo N° 6 se rompió al sacarlo.

Áridos son rodados.

Tamaño máximo del árido 40 mm.

Porosidad alta.

Testigo N° 4 tiene 3 incrustaciones de fierro.

Testigo N° 5 con corrosión.

Fierro transversal en el sentido de la carga.

Diámetro Testigos 10,1 cm.

Diámetro de fierro 8 mm

Peso sumergido = 352 gramos

Peso saturado superficialmente seco = 615 gramos

Densidad = $\text{Peso sss} / (\text{Peso sss} - \text{peso sumergido}) = 2,338 \text{ kg} / \text{m}^3$

Resistencia Martillo Schmidt = $300,58 \text{ kgf} / \text{cm}^2$

Escuela de Ingeniería Universidad de Chile

Testigo N°	Profundidad máxima de Carbonatación		Prof.de carb.promedio		Altura testigo (cm)
	Cara Superior (cm)	Cara Inferior (cm)	superior	inferior	
1	4,2	2,8	4,0	2,6	10,5
2	3,8	-	3,8	-	4
3	5,5	5,5	5,5	5,5	11
4	5,5	5,5	5,3	5,5	12
5	5,0	3,6	3,5	5,0	11,2

Tabla N° 6: Resultados obtenidos en terreno de la Escuela de Ingeniería

Observaciones:

Fecha de ensayo: 16 de Diciembre de 2005

Todos los testigos pertenecen a la losa de la sala 18 Sur.
 El diámetro de los testigos es de 10 cm.
 Peso sumergido = 500 gramos
 Peso saturado superficialmente seco = 853 gramos
 $Densidad = \text{Peso sss} / (\text{Peso sss} - \text{peso sumergido}) = 2,416 \text{ kg} / \text{m}^3$
 Mortero o sobrelosa 6,0 cm. Esta presentaba agrietamiento completo.
 Hormigón celular (con esferas de polipropileno).
 Testigos con enfierradura en buen estado, sin corrosión.
 Porosidad media.

Tribunales de Justicia

Observaciones:

Fecha de ensayo: 4 de Mayo de 2006
 Se midió la losa de la oficina de Títulos y Grados.
 No se pudieron extraer testigos, por lo que se aplicó el primer método recomendado por la norma RILEM CPC-18. Se picó con un cincel, y se roció con fenolftaleína. El espesor de la losa es de 8,5 cm y resultó con carbonatación total.
 El tamaño máximo del árido es 25 cm.
 Los fierros se encontraban en buenas condiciones y sus diámetros eran 10 mm, 10 mm, 8.5 mm.

Puente Quillota

Testigo N°	Carbonatación (cm)		Altura testigo (cm)
	Profundidad Promedio	Profundidad Máxima	
1	0,5	0,5	15
2			Se rompió en terreno
3	4,5	6,5	Se rompió en hendimiento
4	2	2	15
5	0	0	15
6	2,6	3,0	15

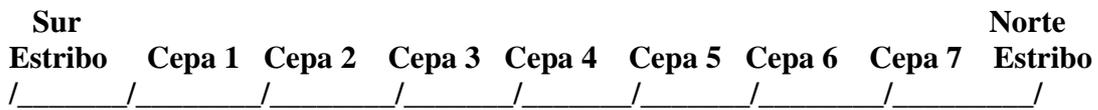
Tabla N° 7: Resultados obtenidos en terreno del Puente Quillota

Observaciones:

Fecha de ensayo: 15 de Mayo de 2006
 T3 tiene fierro corroído. T6 elegido para medir penetración de iones cloruros
 Resistencia Martillo Schmidt: Cepa 1: 355,62 kgf / cm², Cepa 3: 355,62 kgf / cm², Cepa 4: 463,98 kgf / cm²
 Altura de testigos a nivel del suelo:
 T1: 1,70 m
 T2: 1,10 m
 T3: 2,10 m
 T4: 1,55 m
 T5: 1,90 m
 T6: 1,30 m



Figura N° 5 : Plano Viña del Mar



Testigos T1 y T6 sacados de Cepa 2, orientación sur

Testigo T2 sacado de Cepa 3, orientación sur

Testigo T3 sacado de Cepa 4, orientación sur

Testigos T4 y T5 sacados de Cepa 4, orientación norte

Largo total del Puente Quillota es 90 metros y la distancia al mar es de 1.41 KM

Puente Libertad

Testigo N°	Profundidad de Carbonatación (cm)		Altura testigo (cm)
	Profundidad Promedio	Profundidad Máxima	
1	0,0	0,0	9,5
2	0,0	0,0	9,0
3	0,0	0,0	17,0

Tabla N° 8: Resultados obtenidos en terreno del Puente Libertad

Observaciones:

Fecha de ensayo: 11 de Diciembre de 2006

Diámetros de testigos 10,3 cm. Fierro de 16 mm de diámetro en buen estado.

Testigos tienen un espesor de recubrimiento 5 cm. Tamaño máximo del árido 40 mm

T3 elegido para medir penetración de iones cloruros y fue usado para medir la resistencia a la compresión.

Altura de testigos a nivel del suelo:

T1: 1,35 m

T2: 1,25 m

T3: 1,30 m

Porosidad del hormigón baja.

Psss = 2388 Psum = 1409

Resistencia Martillo Schmidt: Cepa 1: 678,98 kgf / cm², Cepa 2: 338,42 kgf / cm²

Densidad = 2,439 kg / m³

Testigo T1 rotura de hendimiento = 0,933 Mpa

Ensayo de compresión a Testigo T3 = 359 kN

Sur			Norte
Estribo	Cepa 1	Cepa 2	Estribo
/	/	/	/

Testigos T1 y T2 sacados de Cepa 1.

Testigo T1 orientación norte

Testigo T2 orientación sur

Testigo T3 sacado de Cepa 2, orientación norte

Largo total del Puente Libertad 90 metros y su distancia al mar es de 1.11 KM

Puente Mercado

Testigo Nº	Carbonatación (cm)		Altura testigo (cm)
	Profundidad Promedio	Profundidad Máxima	
1	2,0	3,0	8,0
2	2,0	3,0	11,0
3	4,0	4,5	8,0

Tabla Nº 9: Resultados obtenidos en terreno del Puente Mercado

Observaciones:

Fecha de ensayo: 11 de Diciembre de 2006

Diámetros de testigos 10,3 cm. Fierro de 26 mm de diámetro en buen estado.

Tamaño máximo del árido 40 mm.

Testigo T1 tiene un espesor de recubrimiento 6 cm. Testigo T2 espesor de recubrimiento de 4 cm.

Testigo T3 tiene un espesor de recubrimiento 6 cm.

T2 elegido para medir penetración de iones cloruros y fue usado para medir la resistencia a la compresión.

Porosidad del hormigón baja.

$P_{ss} = 2038$ $P_{sum} = 1177$ Densidad = $2,367 \text{ kg / m}^3$

Resistencia Martillo Schmidt: Cepa 1: $630,82 \text{ kgf / cm}^2$, Cepa 2: $517,3 \text{ kgf / cm}^2$

Testigo T1 rotura de hendimiento = $0,683 \text{ Mpa}$

Testigo T3 rotura de hendimiento = $0,575 \text{ Mpa}$

Ensayo de compresión a Testigo T2 = 356 kN

Altura de testigos a nivel del suelo:

T1: $1,35 \text{ m}$

T2: $1,25 \text{ m}$

T3: $1,35 \text{ m}$



Testigos T1 y T2 sacados de Cepa 1.

Testigo T1 orientación sur

Testigo T2 orientación norte

Testigo T3 sacado de Cepa 2, orientación sur

Largo total del Puente Mercado 90 metros y su distancia al mar es de 1.68 KM

Puente Huaquén

Ubicación: Km 172, Ruta 5 Norte, V Región.

Fecha de Ensayo: 20 de Julio de 2006

Testigo N°	Fecha de Perforación	Fecha de Confección	Elemento	Ubicación
T1	18 de julio 2006	Año 1952	Cepa	Cepa norte, aguas abajo
T2	18 de julio 2006	Año 1952	Cepa	Cepa norte, aguas abajo

Determinación de la profundidad de carbonatación		
Testigo N°	Profundidad (cm)	
	Promedio	Máxima
T1	0	0
T2	1,9	3

Tabla N° 10: Resultados obtenidos en terreno del Puente Huaquén

4.3 Presentación resultados ensayo de penetración de ion cloruro

Los 3 Puentes de la Ciudad de Viña del Mar fueron elegidos para estudiar el ataque de ion cloruro, debido principalmente a su cercanía al mar, y a que presentan valores muy bajos de profundidad de carbonatación.

Puente Quillota:

Normalidad $Hg(NO_3)_2 = 0,02384$

Alícuota (ml) = 100

muestra blanco (ml) = 0,15

densidad hormigón (kg/m^3) = 2400

Cloruros	masa	Cloruros	Cloruros			
SAG	Identificación	Gasto (ml)	(mg/l)	muestra	($kg,Cl/m^3$)	($kg,Cl/kg.$ Horm.)
651-1	T-6-1	3,95	32,12	20,0248	1,925	0,0008019
651-2	T-6-2	7,2	59,59	20,0083	3,574	0,001489
651-3	T-6-3	4,75	38,88	20,0202	2,33	0,000971

Tabla N° 11: Resultados penetración de ion cloruro Puente Quillota

Puente Libertad:

Normalidad $Hg(NO_3)_2 = 0,023701$

Alícuota (ml) = 100

muestra blanco (ml) = 0,10

densidad hormigón (kg/m^3) = 2400

Cloruros	masa	Cloruros	Cloruros			
SAG	Identificación	Gasto (ml)	(mg/l)	muestra	($kg,Cl/m^3$)	($kg,Cl/kg.$ Horm.)
1338-4	T-3-1	0,00	-0,84	20,0040	-0,050	-0,0000210
1338-5	T-3-2	0,50	3,36	10,0030	0,403	0,0001680
1338-6	T-3-3	0,45	2,94	10,0033	0,353	0,0001470

Tabla N° 12: Resultados penetración de ion cloruro Puente Libertad

La muestra T-3-1 no pudo ser ensayada pues el sulfuro precipitó. Debido a lo anterior, no se puede determinar la cantidad de ion cloruro.

Puente Mercado:

Normalidad $Hg(NO_3)_2 = 0,023701$

Alícuota (ml) = 100

muestra blanco (ml) = 0,10

densidad hormigón (kg/m^3) = 2400

Cloruros	masa	Cloruros	Cloruros			
SAG	Identificación	Gasto (ml)	(mg/l)	muestra	(kg,Cl/m ³)	(kg,Cl/kg. Horm.)
1338-1	T-2-1	5,10	42,01	20,0050	2,520	0,0010501
1338-2	T-2-2	4,00	32,77	10,0080	3,929	0,0016372
1338-3	T-2-3	1,15	8,82	10,0109	1,058	0,0004407

Tabla N° 13: Resultados penetración de ion cloruro Puente Mercado

CAPÍTULO V
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 Introducción

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de las estructuras ensayadas con la metodología descrita en el capítulo III.

Principalmente se comparará la profundidad del frente de carbonatación obtenida luego de realizar los diferentes ensayos, con la profundidad obtenida de la fórmula de Hamada, pues es la más usada hoy en día. Para cumplir con dicho propósito se calculó el valor de la constante K para cemento tipo Portland, porque en la época en que fueron construidas las obras estudiadas era el único usado en el país. Se consideró además para este cálculo los valores de ajuste R.

Para aplicar la fórmula de Hamada es necesario conocer previamente la relación agua/cemento. Debido a que no existe un registro del valor exacto utilizado en aquellos tiempos se asumió una relación agua /cemento de 0.6. En la época en que se construyeron la mayoría de las estructuras analizadas no existía una norma chilena. La primera norma chilena data del año 1912. Ni siquiera la norma chilena de hormigones del año 1928 contemplaba un control de la cantidad de agua agregada al hormigón, solo contemplaba una cantidad mínima de cemento de 290 kg/m^3 , y exigía una cantidad de agua suficiente para obtener una buena compactación con un pisón manual (Cono promedio de 9 cm).

5.2 Cálculo de la profundidad de carbonatación teórica

Como ya hemos mencionado, basaremos nuestros cálculos en la fórmula de Hamada, puesto que es la más reconocida internacionalmente en la actualidad. Para el cálculo de la constante K, consideramos hormigones confeccionados con cemento Portland y una relación agua-cemento de 0.6. Esto da un valor de $K = 0.372$ como muestran los cálculos siguientes:

$$R = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$$

$$k = \frac{0,3(1,15 + 3 \cdot 0,6)}{(0,6 - 0,25)^2} = 7,22 \text{ (años / cm}^2\text{)}$$

$$K = \sqrt{\frac{R^2}{k}} = 0,37 \text{ (cm / raíz años)}$$

Con este valor de K, que es el mismo para todas nuestras obras estudiadas, y aplicando la fórmula de Hamada, tenemos las profundidades de carbonatación siguientes:

Puente Quillota: 3,7 cm
Internado Nacional Barros Arana: 3,3 cm
Escuela de Ingeniería: 3,4 cm
Escuela de Derecho: 3,1 cm
Tribunales de Justicia: 3,6 cm
Puente Huaquén: 2,7 cm
Puente Libertad: 2,8cm
Puente Mercado: 2,5 cm

5.3 Análisis de los resultados

Con las profundidades de carbonatación teóricas calculados con la fórmula de Hamada, pasamos a compararlas con las obtenidas en terreno.

5.3.1 Puente Quillota

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada		
Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
0,5	0,5	98	392	0,05	0,37	3,66
		98				0,00
4,5	6,5	98	4,84	0,45	0,37	3,66
2	2	98	24,50	0,20	0,37	3,66
0	0	98				0,00
2,6	3	98	14,50	0,26	0,37	3,66

Tabla N° 14: Resumen carbonatación Puente Quillota.

En la tabla N° 14 podemos ver claramente que las profundidades de carbonatación medidas en terreno son inferiores a la predicha por Hamada, salvo en el testigo N° 3.

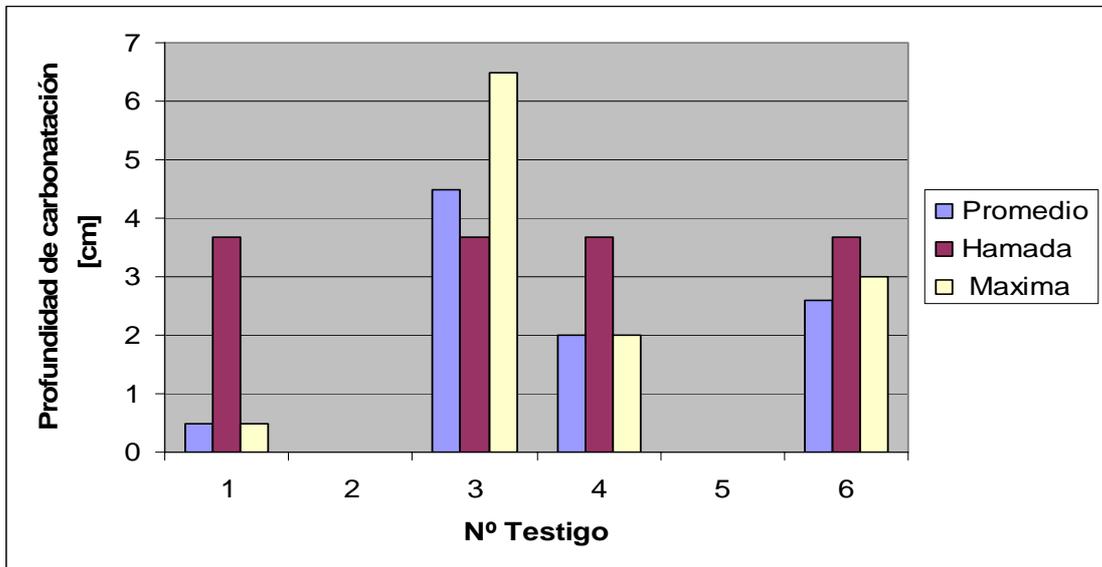


Fig.N°6: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Quillota

5.3.2 Internado Nacional Barros Arana

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada			
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	0,5	0,5	98	392	0,05	0,37	3,66
2			98				0,00
3	4,5	6,5	98	4,84	0,45	0,37	3,66
4	2	2	98	24,50	0,20	0,37	3,66
5	0	0	98				0,00
6	2,6	3	98	14,50	0,26	0,37	3,66

Tabla N° 15: Resumen carbonatación Internado Nacional Barros Arana .

Aquí podemos apreciar que con excepción del testigo N° 5, todas la profundidades de carbonatación medidas en terreno superan ampliamente las predichas por Hamada.

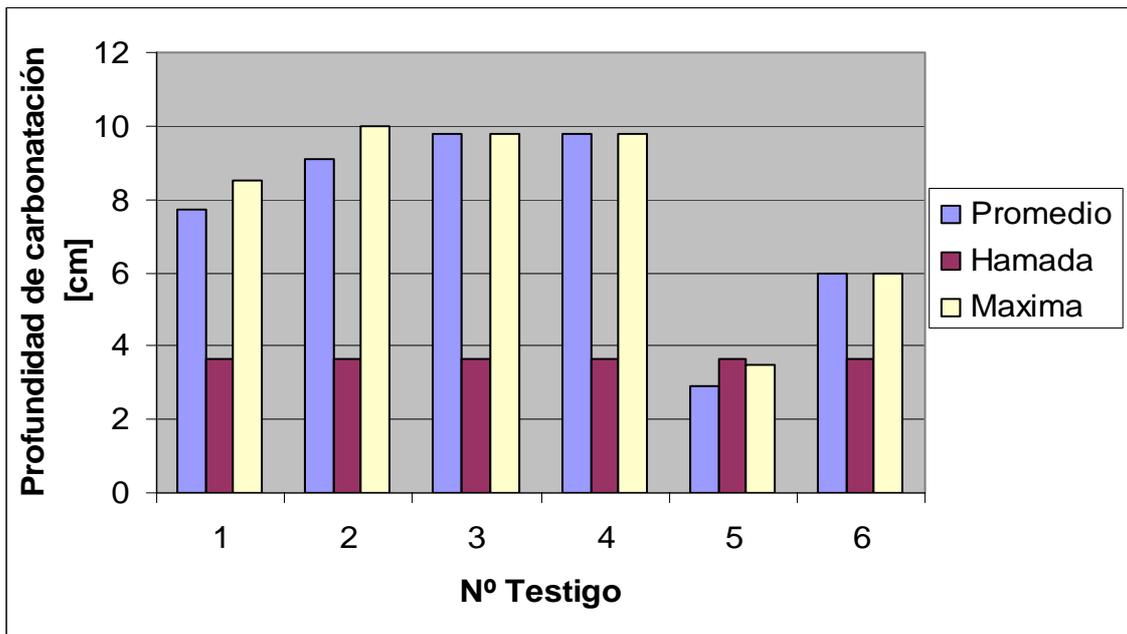


Fig.N°7: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra I.N.B.A.

5.3.3 Escuela de Ingeniería

En la Escuela de Ingeniería, por tratarse de una losa el elemento ensayado, hay dos frentes de carbonatación, y es necesario graficar ambos frentes como si fueran independientes.

Nº Testigo	Prof. carbonatación			Fórmula de Hamada			
	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	4	4,2	84	5,25	0,44	0,37	3,39
2	3,8	3,8	84	5,82	0,41	0,37	3,39
3	5,5	5,5	84	2,78	0,60	0,37	3,39
4	5,5	5,5	84	2,78	0,60	0,37	3,39
5	5	5	84	3,36	0,55	0,37	3,39

Tabla N°16: Resumen carbonatación cara superior losa sala 18 sur Escuela de Ingeniería.

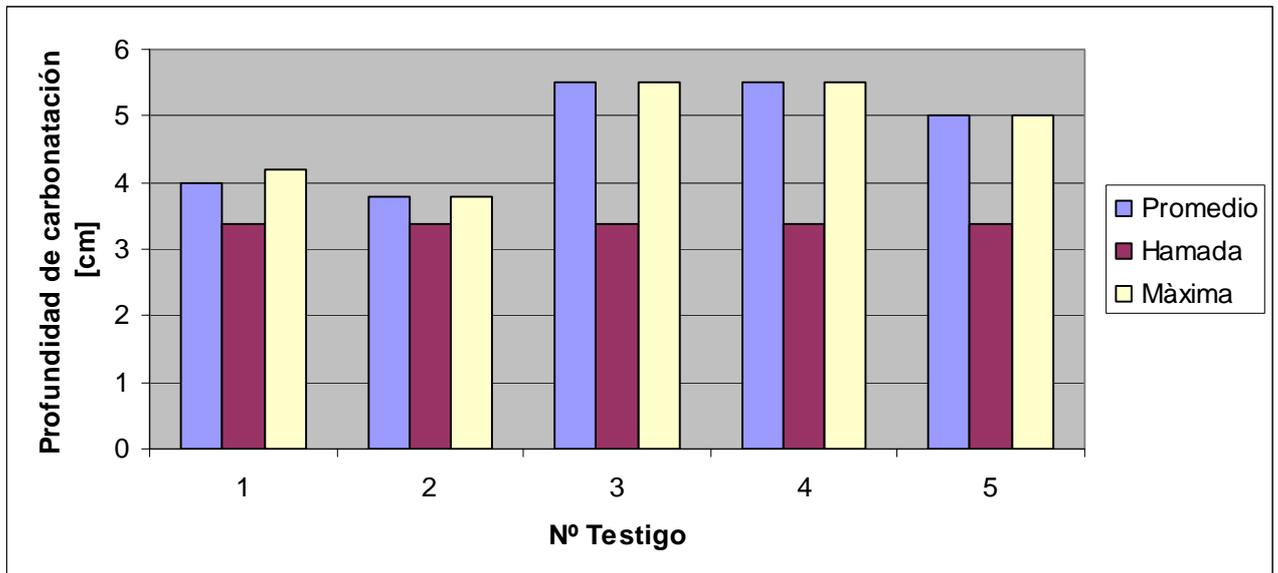


Fig.N°8: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Escuela de Ingeniería (cara superior losa sala 18 sur)

Al traspasar los frentes de carbonatación la mitad del espesor de la losa, se produce una exagerada profundidad de carbonatación en el testigo N°3 que claramente no refleja la realidad. Por ello, suponemos que se reparte por igual entre los dos frentes. Con esta suposición, podemos apreciar que las profundidades de carbonatación, tanto teóricas como las medidas en terreno son bastantes similares.

Prof. carbonatación			Fórmula de Hamada				
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	2,6	2,8	84	12,43	0,28	0,37	3,39
2	-	-	84	-	-	0,37	3,39
3	5,5	5,5	84	2,78	0,60	0,37	3,39
4	5,3	5,5	84	2,99	0,58	0,37	3,39
5	5	5	84	3,36	0,55	0,37	3,39

Tabla N° 17: Resumen carbonatación cara superior losa sala 18 sur Escuela de Ingeniería.

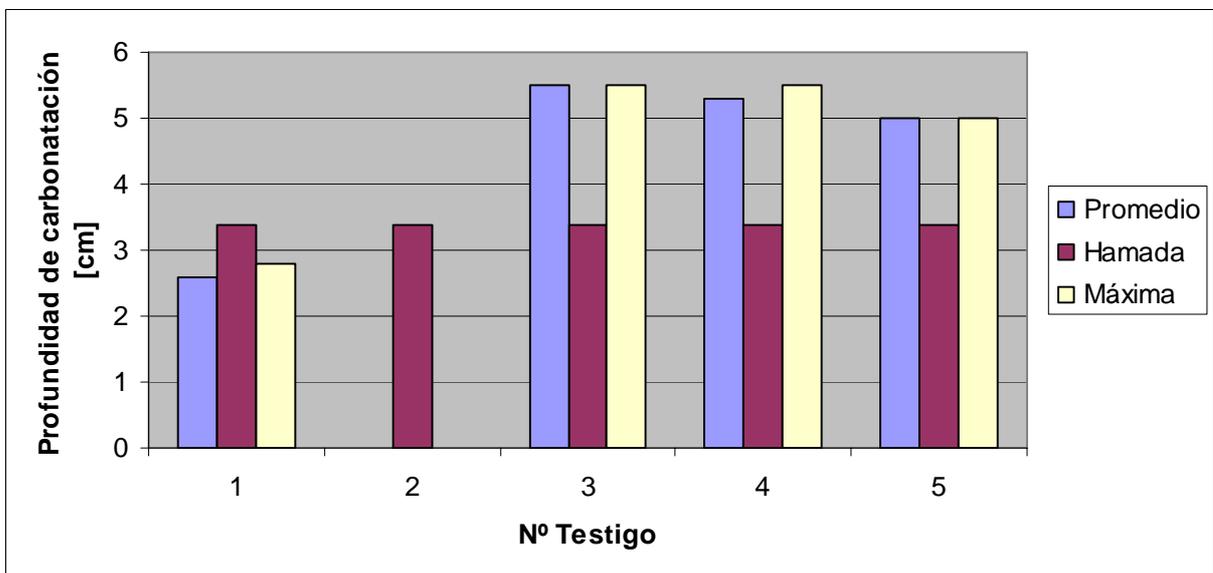


Fig.N°9: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Escuela de Ingeniería (cara inferior losa sala 18 sur)

Lo mismo sucede en la cara inferior de esta losa, las profundidades de carbonatación medidas en terrenos son muy similares a las predichas por Hamada.

5.3.4. Tribunales de Justicia

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada			
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	8	8	95	1,48	0,82	0,37	3,61

Tabla N°18: Resumen carbonatación Tribunales de Justicia

También es una losa, y por lo tanto hay dos frentes de carbonatación. Sin embargo, al ser más delgado el espesor de la losa que el espesor de la Escuela de Ingeniería, no alcanzamos a tener dos frentes visibles, produciéndose una carbonatación total de la losa.

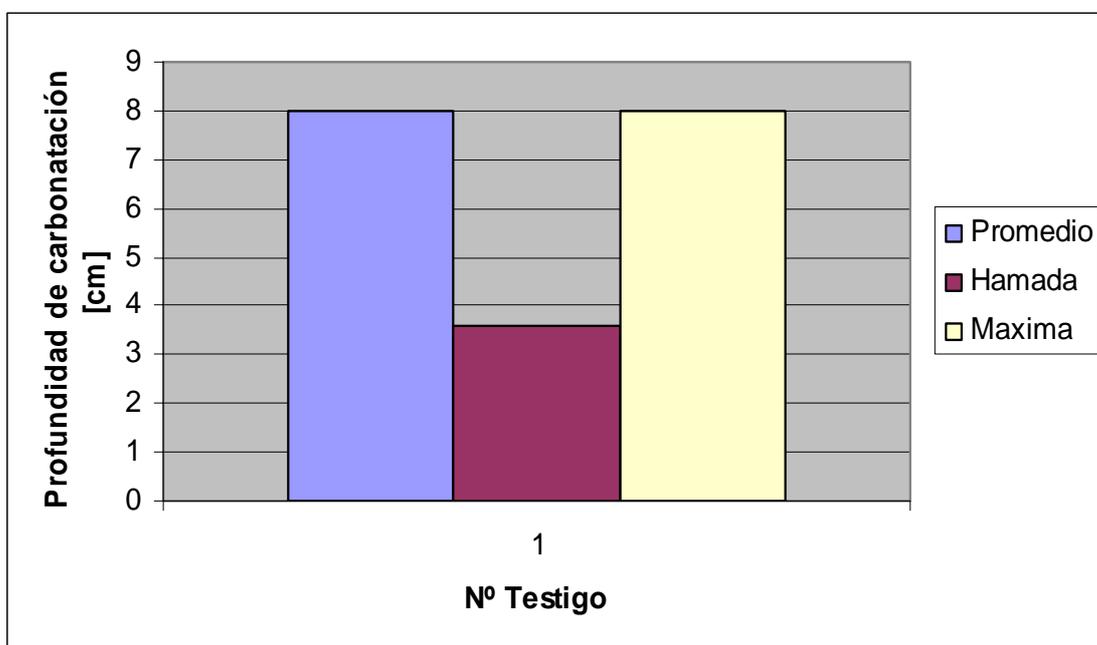


Fig.N°10: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Tribunales de Justicia

5.3.5 Puente Huaquén

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada			
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
2	1,9	3	54	14,96	0,26	0,37	2,72

Tabla N°19: Resumen carbonatación Puente Huaquén

La profundidad de carbonatación medida en terreno es levemente inferior a la predicha por Hamada, pero muestran una tendencia interesante, pues las cuatro estructuras que se encuentran en zona costera, en este caso de la V Región, presentan profundidades de carbonatación menores a las predichas por Hamada.

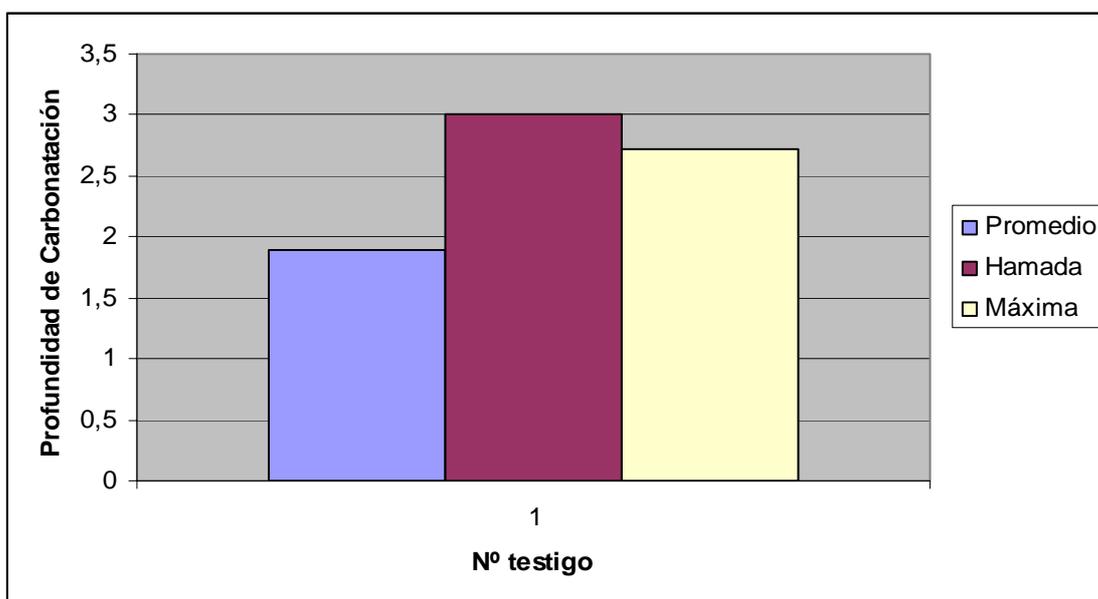


Fig. N°11: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Huaquén.

5.3.6 Escuela de Derecho

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada			
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	0	0	72			0,37	3,14
2	0,3	0,5	72	800,00	0,04	0,37	3,14
3	0,3	0,5	72	800,00	0,04	0,37	3,14
4	0	0	72			0,37	3,14
5	0,8	1	72	112,50	0,09	0,37	3,14

Tabla N°20: Resumen carbonatación Escuela de Derecho

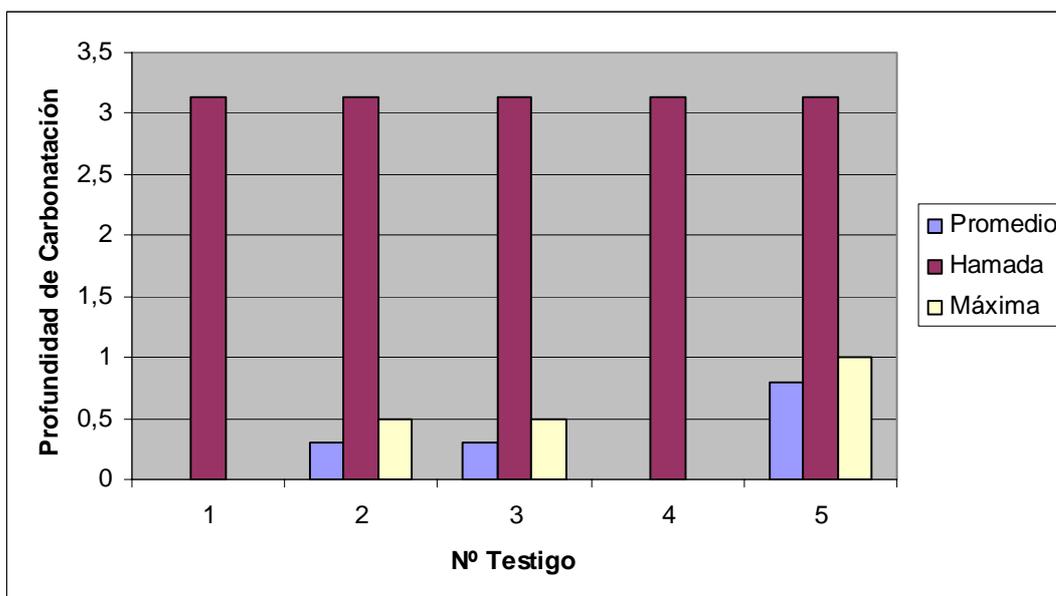


Fig.N°12: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Escuela de Derecho.

En la Escuela de Derecho de la Universidad de Chile, las muestras estaban bajo tierra, lo que hace inaplicable la fórmula de Hamada. Sin embargo, no deja de ser interesante el hecho de compararlas, pues se trata de la única de las obras estudiadas en Santiago que presenta valores de carbonatación muy por debajo de lo que se obtendría aplicando la fórmula de Hamada. Al encontrarse bajo tierra, la estructura está menos expuesta a la entrada de dióxido de carbono.

5.3.7 Puente Libertad

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada			
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	0	0	56	-----	-----	0,37	2,77
2	0	0	56	-----	-----	0,37	2,77
3	0	0	56	-----	-----	0,37	2,77

Tabla N°21: Resumen carbonatación Puente Libertad

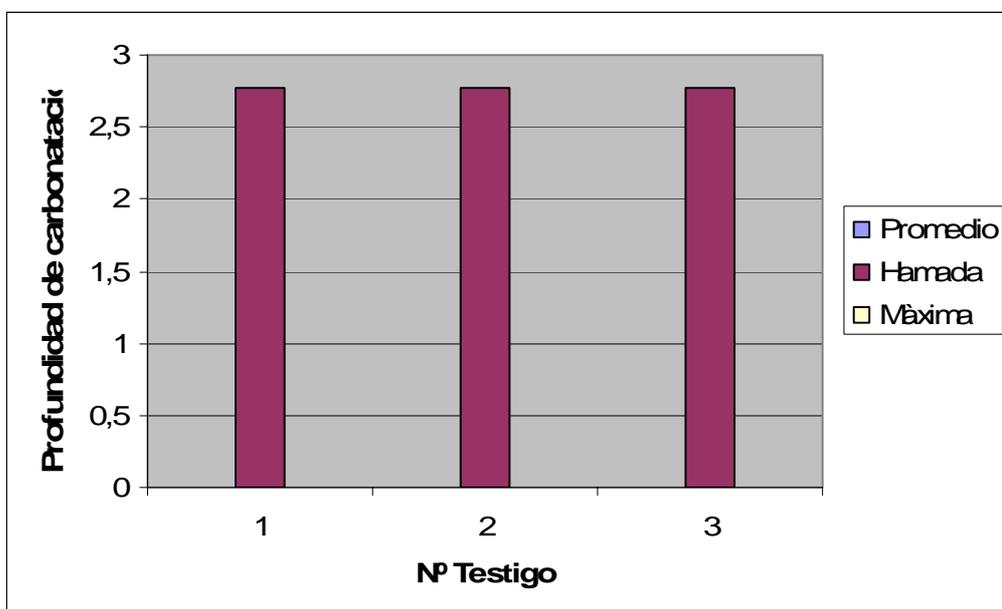


Fig.N°13: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Libertad.

El Puente Libertad que data del año 1950, es la tercera obra estudiada del litoral de la V región y no presenta profundidad de carbonatación alguna. Esto viene a ratificar la tesis de que en la zona costera de la V región la carbonatación sería menor a la encontrada en Santiago.

5.3.8 Puente Mercado

Prof. carbonatación				Fórmula de Hamada			
Nº Testigo	Promedio [cm]	Máxima [cm]	Edad [años]	$k=T/x^2$ [años/cm ²]	$K=k^{-1/2}$ [cm/raiz(años)]	K [cm/raiz(años)]	Profundidad [cm]
1	2	3	44	11,00	0,30	0,37	2,45
2	2	3	44	11,00	0,30	0,37	2,45
3	4	4,5	44	2,75	0,60	0,37	2,45

Tabla N°22: Resumen carbonatación Puente Mercado

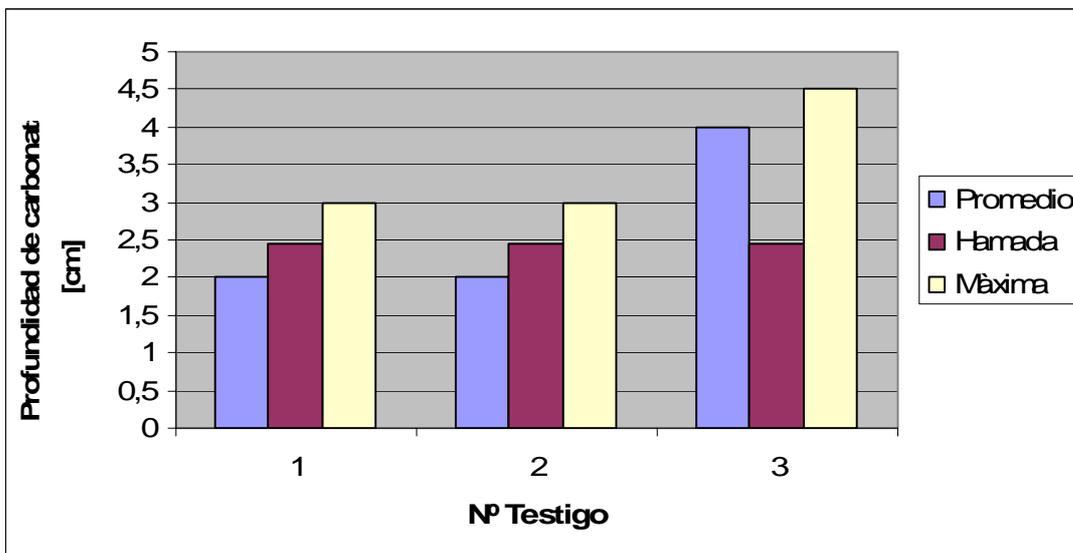


Fig.N°14: Profundidades de carbonatación reales y teóricas obra Puente Mercado

Finalmente se analizó el Puente Mercado, que data del año 1962, constituyéndose en la estructura estudiada más nueva. Se ubica en la Ciudad de Viña de Mar, más alejada del mar que los Puentes Libertad y Quillota, y presenta valores de carbonatación muy similares a los calculados con la fórmula de Hamada.

CAPÍTULO VI CONCLUSIONES

1. Pese a la antigüedad de las estructuras estudiadas, no existen graves deterioros que pongan en peligro el correcto funcionamiento de dichas obras. Este hecho es de la mayor relevancia, si tenemos en cuenta que muchas obras de gran importancia para el país cumplirán edades similares en poco tiempo.
2. De las estructuras estudiadas, la principal anomalía se manifiesta en la corrosión incipiente de las barras de refuerzo (Internado Nacional Barros Arana en los antiguos servicios sanitarios, Puente Quillota algunas cepas y Facultad de Ingeniería losa de la sala 18 sur). También se observó agrietamiento del hormigón en algunas zonas estudiadas como son; Losa sala 18 sur, vigas Internado Nacional Barros Arana correspondientes a la zona de la piscina, y Puente Quillota leves grietas en algunas cepas.
3. En Santiago, las estructuras estudiadas arrojaron profundidades de carbonatación mayores de lo esperado teóricamente (fórmula de Hamada). A su vez, en las estructuras analizadas en la zona costera de la V Región (Puente Quillota y Puente Huaquén), las profundidades de carbonatación son menores a la predicha por Hamada. Este resultado se debe a que la carbonatación tiene su máximo para humedades relativas cercanas al 50% y, la humedad relativa de Santiago se encuentra mucho más cerca de ese valor que la humedad relativa de la zona costera de la V Región.
4. Otro factor que explica esta diferencia, es que en Santiago, la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera es mayor que la existe en la zona costera de la V Región.
5. Otro variable que explica las diferencias de profundidades de carbonatación es la diferencia de las oscilaciones estacionales de la humedad relativa entre Santiago y la zona costera de la V Región. Específicamente en la ciudad de Viña del Mar la humedad relativa es 70% enero y 78% julio, lo que da un promedio anual de 74% y la humedad relativa de Santiago es 52% en enero y 79% en julio.
6. La concentraciones de ion cloruro para distintas profundidades examinadas en testigos del Puente Quillota están por encima de lo especificado en la norma chilena Nch 1498. Of. 1982, que establece una tolerancia de $1,2 \text{ kg Cl}^- / \text{m}^3$ de hormigón. Sin embargo, el valor establecido por la norma chilena tiene que ver con el máximo valor permitido al hormigón al momento de su fabricación, y el encontrado en este estudio incluye la componente proveniente de la penetración de ion cloruro a lo largo de los años. En este sentido, se han encontrado estructuras con valores mucho mayores que los obtenidos en el Puente Quillota y no presentan problemas de funcionamiento.
7. Es interesante notar que cuanto más lejos del litoral se hallan los puentes analizados, mayor es la carbonatación medida.

8. Si tenemos en cuenta que existe corrosión de las barras de refuerzo, tanto en estructuras estudiadas en Santiago como en la zona costera de la V Región, y que la carbonatación actúa como agente importante para las estructuras estudiadas en Santiago, pero no para las estructuras estudiadas ubicadas en la zona costera de la V Región, y que realizando el estudio de penetración de ion cloruro en testigos del Puente Quillota encontramos un valor de la concentración de este ion importante, podemos establecer que la causa principal de corrosión en la zona costera V Región es el ataque de cloruros en la atmósfera y que para estructuras estudiadas en Santiago la carbonatación es el principal causante.

9. Debido a que en nuestro país no se tiene real conciencia del problema de la durabilidad del hormigón armado, pues se piensa que éste es eterno, trabajos como éste ayudan a considerar el asunto en su real dimensión. Para ello se propone un estudio en la misma línea investigativa, una especie de catastro, que abarque estructuras de diferentes períodos. Además, se sugiere que la norma chilena contemple variables tales como la relación A/C y las condiciones climáticas de la zona donde se desea construir en el cálculo del espesor de recubrimiento.

CAPÍTULO VII
BIBLIOGRAFÍA

- 1) ACI 222R (1996) **Corrosion of Metals in Concrete.**
- 2) ACI 228.1 R (1995) **In-place Methods to estimate Concrete Strength.**
- 3) CALLEJA, A. (1966). **Corrosión de Armaduras en los Hormigones Armados y pretensados.**
- 4) CEB **Diagnosis and Assesments of Concrete Structures.** Bulletin D'information N° 192.
- 5) CLAISSE, P., EL-SAYAD, H. Y SHAABAN, I. (1999). **Permeability and Poor Volume of carbonated Concrete.** ACI Materials Journal.
- 6) CORTÉS, M. P. (1997) **Penetración de cloruros en el hormigón. Influencia de la composición del cemento y de la pasta aglomerante.** Memoria de título de ingeniero civil, depto. De ingeniería civil, Universidad de Chile, Stgo. Chile
- 7) CRANK, J. (1956). **The Mathematics of Diffusion.**
- 8) CZERNIN, W. (1980). **Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers**, 2nd edition.
- 9) DEL CAMPO VIGAR, M. TERESA. (1986). **Influencia de la Corrosión de Barras de Armadura en la Adherencia Acero- Hormigón.** Memoria de Título de Ingeniera civil, Departamento de Ingeniería Civil, U de Chile, Stgo de Chile.
- 10) DELFIN, F. Y RUIZ-TAGLE, L.A. (1994). **Estudio sobre la influencia del tipo de cemento en la susceptibilidad a la carbonatación del hormigón.** X Jornadas Chilenas del Hormigón, Vol. II, 25-38
- 11) HAMADA; M. (1968). **Neutralization (Carbonation) of Concrete and Corrosion of reinforcing Steel.** Proceedings of the fifth international symposium of the chemistry of cement (Tokio), vol. III, 343-369.
- 12) HAQUE Y KAWAMURA (1992). **Carbonation and Corrosion in Fly Ash.** ACI Materials journal vol. 89 N°1, 41-48.
- 13) INSTITUTO EDUARDO TORROJA-CSIC: <http://www.ietcc.csic.es>
- 14) KEIL, F. (1973). **Cemento, fabricación, propiedades y aplicaciones.**
- 15) LAMANA, A. (1982). **Corrosión del acero en obras de hormigón armado.** Jornadas de la Construcción II Región. 1,2 y 3 de diciembre 1982, Antofagasta.
- 16) LAMANA, A. (1995). **Origen y Evolución de la Tecnología del hormigón.** X Jornadas Chilenas del Hormigón.
- 17) LEA, F. M. (1970). **The Chemistry of Cement and Concrete**, third edition.
- 18) MEYER, A. (1968). **Investigations on the Carbonation of Concrete.** Proceedings of the Fifth International Symposium of Chemistry of Cement, Vol. III, 394-401.

- 19) MONTEGU, J. (1987). **Aportes Técnicos N° 1; Técnicas de Reparación y Refuerzo de Estructuras de Hormigón Armado y Albañilería.** Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, Stgo.
- 20) NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1926). **Internacional Critical tables of Numerical Data.** Vol. 3, 260.
- 21) NEVILLE, A. M. (1996). **Properties of Concrete.** Fourth edition.
- 22) NORMA CHILENA 170 OFICIAL 85. **Hormigón- Requisitos Generales.**
- 23) PAPADAKIS, M. Y VÉNUAT, M. (1968). **Fabricación, Características y Aplicaciones de los diversos tipos de Cemento.**
- 24) PERICH, T. A. (1998). **Efecto de las Condiciones de Curado y de Tratamientos de Protección sobre la Permeabilidad de los Cloruros al Hormigón.** Memoria de Título de Ingeniero civil, Dpto de Ingeniería Civil, U de Chile, Stgo de Chile.
- 25) PETRUCCI, R. (1986). **Química General.**
- 26) QUEZADA, A. (1999). **Medición de carbonatación en el hormigón de estructuras reales: metodología y ensayos.** Memoria de Título de Ingeniero civil, Depto de Ingeniería Civil, U de Chile, Stgo de Chile.
- 27) RILEM Concrete permanent Committee CPC 18 (1984). **Measurement of hardened Concrete Carbonation Depth.** Materiaux et Construction Vol. 17 N° 102, 435-440.
- 28) RITTER, H. (1956). **Introducción a la Química.**
- 29) RODRÍGUEZ, G. (1973). **Zonificación Climático Habitacional para Chile.** Revista del IDIEM Vol. 12 N°3
- 30) SCHIESSL, P. (1987). **Influence of the Composition of Concrete on the Corrosion Protection of the Reinforcement.** ACI SP 100, 1633-1650.
- 31) SLATER, JOHN. (1983). **Corrosion of Metals in Association with Concrete.**
- 32) UHLIG, H. REVIE, W. (1985). **Corrosion and Corrosion Control.** Third Edition.
- 33) WRIGHT, P. (1998). **Concrete Durability.** South Bank University, London.

ANEXO A
FOTOGRAFÍAS DE LAS OBRAS ESTUDIADAS

Fotos Internado Nacional Barros Arana



Foto N° 15: Viga con corrosión avanzada



Foto N°16 : Viga con corrosión avanzada



Foto N° 17: Viga con corrosión avanzada

Fotos Puente Quillota



Foto N° 18: Placa recordatoria



Foto N° 19: Cepa ensayada en dos puntos y posteriormente reparada



Foto N° 20: Reparación del daño producido a la cepa, con mortero de buena calidad



Foto N° 21: Proceso de extracción de testigo



Foto N°22 : Proceso de extracción de testigo



Foto N° 23: Proceso de extracción de testigo



Foto N° 24: Montaje del equipo para la extracción de testigos



Foto N° 25: Montaje del equipo para la extracción de testigos



Foto N°26 : Montaje del equipo para la extracción de testigos



Foto N° 27: Montaje del equipo para la extracción de testigos



Foto N°28 : Marcación de los puntos para la extracción de testigos



Foto N° 29: Marcación de los puntos para la extracción de testigos



Foto N°30 : Vista vigas y cepa



Foto N°31 : Vista viga agrietada



Foto N°32 : Vista viga corroída



Foto N°33 : Vista cepa corroída en forma incipiente

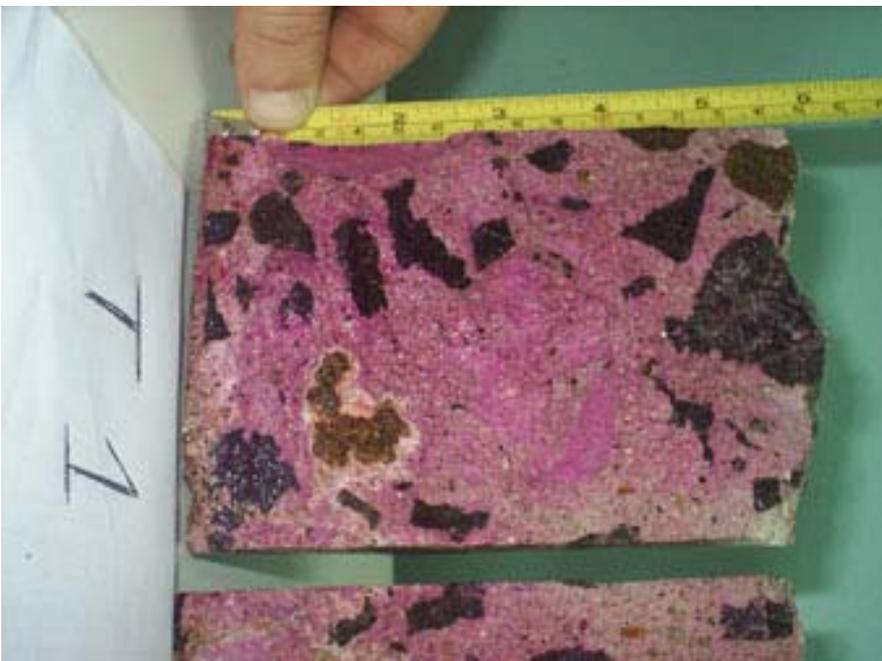


Foto N°34 : Muestras después del ensayo de hendimiento



Foto N° 35: Muestras después del ensayo de hendimiento

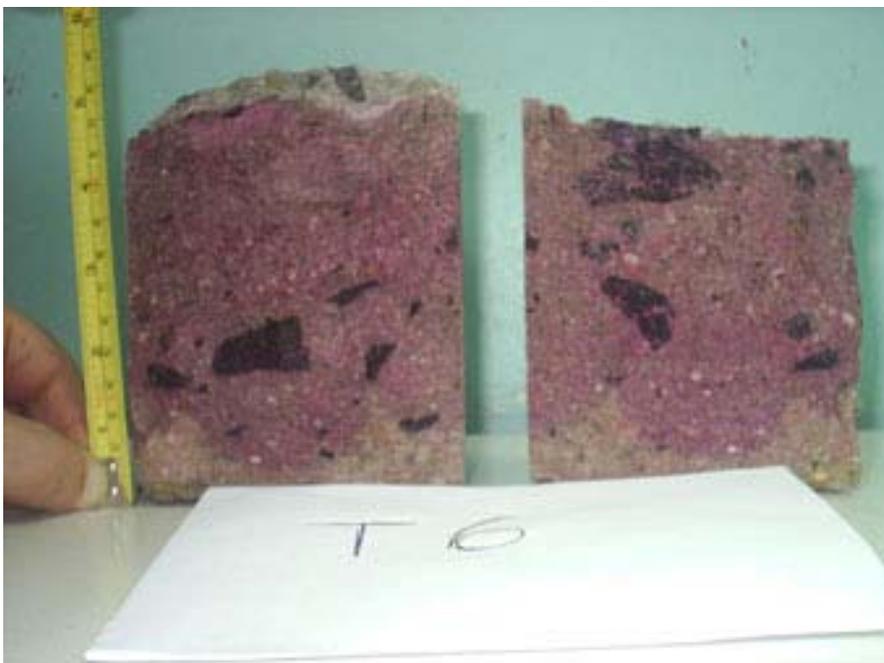


Foto N°36 : Muestras después del ensayo de hendimiento



Foto N°37 : Muestras después del ensayo de hendimiento



Foto N° 38: Muestras después del ensayo de hendimiento

Fotos Testigos Escuela de Derecho.



Foto N° 39: Muestras sin carbonatación



Foto N°40 : Muestras sin carbonatación



Foto N°41 : Muestras sin carbonatación

Fotos Barros Arana extracción de Testigos



Foto N° 42: Proceso de extracción de testigos



Foto N° 43: Todas las muestras debidamente identificadas



Foto N° 44: Proceso de extracción de testigos



Foto N°45 : Proceso de extracción de testigos



Foto N°46 : Proceso de extracción de testigos



Foto N° 47: Proceso de extracción de testigos



Foto N°48 : Marcación de los puntos para la extracción de testigos



Foto N°49 : Vista general muro



Foto N°50 : Testigo sacado de viga con fierro corroído



Foto N°51 : Proceso de extracción de testigos



Foto N°52 : Proceso de extracción de testigos



Foto N° 53: Proceso de extracción de testigos



Foto N°54 : Proceso de extracción de testigos



Foto N°55 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°56 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°57 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°58 : Ensayo de hendimiento



Foto N°59 : Ensayo de hendimiento



Foto N°60 : Ensayo de hendimiento



Foto N° 61: Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N° 62: Determinación de la profundidad de carbonatación

Fotos Escuela Ingeniería Medición de Carbonatación.



Foto N°63 : Determinación de la profundidad de carbonatación. No existe carbonatación en el centro del testigo



Foto N°64 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N° 65: Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°66 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°67 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°68 : Determinación de la profundidad de carbonatación

Fotos Escuela Ingeniería



Foto N°69 : Determinación de la profundidad de carbonatación



Foto N°70 : Vista losa sala 18-sur



Foto N°71 : Losa sala 18-sur con grietas



Foto N°72 : Losa sala 18-sur con grietas



Foto N°73 : Reparación daños losa sala 18-sur



Foto N° 74: Losa sala 3-sur con barras corroídas



Foto N°75 : Losa sala 3-sur con barras corroídas

Fotos Tribunales de Justicia



Foto N°76: Reparación daños losa sala de Títulos y Grados



Foto N°77 : Vista losa sala de Títulos y Grados. Fierros con corrosión.

Fotos Puente Huaquén



Foto N° 78: Testigo sin carbonatación



Foto N° 79: Medición profundidad de carbonatación

Fotos Puente Libertad



Foto N°80 : Medición profundidad de carbonatación



Foto N° 81: Medición profundidad de carbonatación



Foto N°82 : Extracción de testigo



Foto N°83 : Medición profundidad de carbonatación en terreno

Fotos Puente Mercado



Foto N°84 : Extracción de testigos



Foto N°85 : Medición profundidad de carbonatación en terreno. Posteriormente se realizó ensayo de hendimiento.



Foto N°86 : Se pesa el testigo para determinar densidad



Foto N°87 : Refrentado del testigo para ensayarlo a compresión



Foto N°88 : Ensayo de compresión



Foto N°89 : Medición de profundidad de carbonatación después del ensayo de hendimiento

ANEXO B
ANTECEDENTES CLIMÁTICOS

Antecedentes climáticos Quinta Normal (Santiago).

Región Metropolitana

Latitud 33° 26' Sur

Longitud 070° 41' Oeste

Elevación 520 m.

Humedad Relativa (%)			
Mes	08 Hrs	14 Hrs	20 Hrs
ENERO	61	35	48
FEBRERO	66	34	49
MARZO	82	40	52
ABRIL	92	49	68
MAYO	93	52	76
JUNIO	89	54	77
JULIO	93	54	79
AGOSTO	94	58	80
SEPTIEMBRE	88	46	65
OCTUBRE	79	42	62
NOVIEMBRE	64	36	48
DICIEMBRE	62	35	46
Anual	80	44	62

Tabla N° 23: Humedad Relativa Región Metropolitana

Antecedentes Climáticos Ciudad de Viña del Mar

En la zona costera e insular de la Ciudad de Viña del Mar el clima es templado, con temperaturas gratas, con estrechas variaciones diarias y estacionales y con una alta humedad relativa, causante de los días cubiertos y de las neblinas matinales. La temperatura media anual en verano es 17,9° C y en invierno es de 11,9° C, con una amplitud térmica de 6° C.

La humedad relativa es 70% enero y 78% julio, lo que da un promedio anual de 74%.