



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

PERMEABILIDAD A CLORUROS EN HORMIGONES MARÍTIMOS
EVALUACIÓN COMPARATIVA DE MÉTODOS NORDTEST NT BUILD 492 Y ASTM C 1202

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TOMÁS PEDRO VEGA KLEIN

PROFESOR GUÍA

FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

HUGO BAESLER CORREA

MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ TALEP

SANTIAGO DE CHILE

NOVIEMBRE 2015

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR

AL TITULO DE: Ingeniero Civil

POR: Tomás Vega Klein

FECHA: 04-11-2015

PROFESOR GUIA: Federico Delfín A.

El objetivo principal del presente Trabajo de Título es estudiar la efectividad de un ensayo de medición de la resistencia del hormigón a la penetración de ión cloruro, el método Nordtest NT Build 492, comparándola con la del método ASTM C 1202, a través de ensayos a hormigones con dosificaciones típicas de las correspondientes a hormigón marino y teniendo como referencia un hormigón convencional para uso estructural. Se contempla además investigar la influencia de la incorporación de fibras sintéticas de PP (macrofibras) en el comportamiento de estos hormigones bajo ambos métodos de ensayo.

Las variables principales del estudio son la incorporación de microsilíce para mejorar el comportamiento del hormigón frente a la penetración de ión cloruro y especialmente su efectividad para controlar la mayor permeabilidad asociada a la inclusión de fibras sintéticas en el hormigón; por otro lado, el nivel de microfisuración inducido en las probetas, previo a los ensayos de penetración de cloruros, variable implementada mediante la aplicación de dos niveles de carga, 20% y 40% de la carga de rotura en compresión. Esto último, a fin de verificar la influencia de la fisuración en el proceso de difusión de cloruros para los distintos hormigones ensayados.

De los resultados de los ensayos comparativos realizados se deduce, por una parte, la existencia de una correlación aceptable entre ambos ensayos que hace posible asociar niveles de coeficientes de difusión correspondientes a las distintas clases de permeabilidad a cloruros de hormigones que establece la ASTM C 1202. Por otro lado, se verifica que la inclusión de microsilíce resulta decisiva para la obtención de hormigones de calidad aceptable para obras expuestas a ambiente marino, cuando las especificaciones contemplan la incorporación de macro fibras sintéticas como medida de control de la fisuración de la estructura.

Finalmente, se recomienda investigar para distintos tipos y contenidos de fibra sintética el comportamiento frente a la penetración de cloruros de hormigones marinos, variando la composición de la matriz cementicia del hormigón.

Dedicatoria

A mi familia, por estar siempre a mi lado y ser los responsables, en gran medida, de la persona que soy. A los que están, y a los que me hubiese gustado que estuvieran aún.

A los amigos y compañeros de trabajo que me ayudaron a terminar esta tarea.

A la Universidad y a sus profesores, que me entregaron las herramientas para poder empezar una nueva etapa.

Agradecimientos

Agradezco a todos los que hicieron posible que, al fin, cerrara este proceso.

A mi familia, por preocuparse y ayudarme cuando lo necesité. Mención especial a mi tío Álvaro Sepúlveda, por ayudarme, de manera totalmente desinteresada, en la construcción de los instrumentos que usé en mi investigación.

A mi polola y compañera, Mitzi, por preocuparse de hacerme trabajar y hacer que me concentrara, entregándome su apoyo y cariño, a pesar de que la dejara de lado en los momentos de mayor trabajo.

A mis profesores de comisión, por recibirme cuando tenía dudas, y ayudarme a completar mi trabajo, corrigiéndome borradores terminados siempre a última hora. A Don Federico, gracias por estar siempre disponible.

A la gente del laboratorio Control Cementos de IDIEM, por ser excelentes compañeros de trabajo. Al jefe Bastián, por dejarme trabajar y cubrirme mientras lo hacía, y por tratar de obligarme a avanzar, a pesar de que no le hacía caso.

A los miembros del laboratorio Químico del Cemento, en especial a Daniel y Ricardo, por dejarme usar su laboratorio, facilitarme los reactivos y dejarme trabajar en su reducido espacio.

A Karla Elorza, por facilitarme la información de sus ensayos, y ayudarme en el desarrollo de las primeras fases del trabajo.

Al equipo de constructora K&P, a Carlos Newman, por permitirme faltar algunos días a la pega para poder terminar las últimas etapas de este trabajo.

Y a todos aquellos que olvidé mencionar, pero que formaron parte de los cimientos de mi trabajo.

Tabla de Contenido

Resumen	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos	IV
Tabla de Contenido	V
Índice de tablas	VII
Índice de Ilustraciones.....	IX
1. Introducción	10
1.1. Introducción General.....	10
1.2. Planteamiento del problema	11
1.3. Objetivos.....	12
1.3.1. Objetivo general	12
1.3.2. Objetivos específicos.....	12
1.4. Etapas del desarrollo de la investigación.....	13
2. Antecedentes.....	14
2.1. Hormigones Marítimos	14
2.2. Durabilidad de hormigones marítimos.....	14
2.3. Mecanismos de transporte de ión Cloruro	14
2.4. Difusión del ión cloruro en hormigones.	15
2.5. Factores que inciden en la tasa de penetración de cloruros en el hormigón.	16
2.6. Ensayo ASTM C1202.....	17
2.7. Ensayo Nordtest NT Build 492.....	18
3. Planteamiento de la investigación.....	19
3.1. Tipos de hormigones a confeccionar	19
3.1.1. Identificación de los hormigones	20
3.2. Variables a considerar en elaboración de hormigones	20
3.2.1. Cemento.....	20
3.2.2. Áridos.....	21
3.2.3. Adiciones.....	23
3.2.3.1. Macrofibra de polipropileno	23
3.2.3.2. Microsílice	24
3.2.3.3. Aditivo Súper-plastificante.....	25
3.3. Variables a considerar en preparación de probetas	25
3.3.1. Aplicación de carga axial a probetas de hormigón	25
3.3.2. Forma de curado y conservación de probetas.....	26
3.4. Dosificación de los hormigones a estudiar	26
3.4.1. Confección de las probetas de prueba	26
3.5. Elaboración de series de ensayo	28
3.5.1. Ensayos a compresión probetas hormigón	31
3.6. Ensayo ASTM C1202.....	35
3.6.1. Preparación para el ensayo de penetración de ion cloruro (ASTM C1202)	35
3.7. Ensayo Nordtest NT Build 492.....	37
4. Análisis de Resultados	41

4.1.	ASTM C 1202	41
4.2.	Nordtest NT Build 492.....	42
4.3.	Comparación ASTM C 1202 versus Nordtest NT Build 492.....	48
5.	Discusión y Conclusiones.....	51
5.1.	Discusión de Resultados	51
5.2.	Conclusiones	52
6.	Bibliografía	54
7.	Anexo	56
7.1.	Mediciones ensayo Nordtest NT Build 492	56

Índice de tablas

TABLA 1: NOMENCLATURA PARA DIFERENTES TIPOS DE HORMIGÓN.....	20
TABLA 2: RESULTADOS CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DEL CEMENTO.....	21
TABLA 3: GRANULOMETRÍA DE ÁRIDOS UTILIZADOS	22
TABLA 4: HUMEDAD ÁRIDOS HC.....	23
TABLA 5: HUMEDAD ÁRIDOS HM	23
TABLA 6: HUMEDAD ÁRIDOS HCF.....	23
TABLA 7: HUMEDAD ÁRIDOS HMF	23
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS MACROFIBRA DE POLIPROPILENO.....	24
TABLA 9: MICROSÍLICE, ESPECIFICACIÓN DEL FABRICANTE	24
TABLA 10: CARACTERÍSTICAS ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE NORMET	25
TABLA 11: DOSIFICACIÓN HORMIGONES A ESTUDIAR.....	26
TABLA 12: CONO OBTENIDO EN CONFECCIÓN DE PROBETAS	29
TABLA 13: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HC, PROBETAS CÚBICAS DE ARISTA 15 CM.....	31
TABLA 14: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HCF, PROBETAS CÚBICAS DE ARISTA 15 CM.....	31
TABLA 15: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HM, PROBETAS CÚBICAS DE ARISTA 15 CM	31
TABLA 16: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HMF, PROBETAS CÚBICAS DE ARISTA 15 CM	32
TABLA 17: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HC, PROBETAS CILÍNDRICAS.....	32
TABLA 18: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HCF, PROBETAS CILÍNDRICAS	32
TABLA 19: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HM, PROBETAS CILÍNDRICAS	33
TABLA 20: RESISTENCIA A COMPRESIÓN HMF, PROBETAS CILÍNDRICAS	33
TABLA 21: RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE LOS HORMIGONES ESTUDIADOS.....	33
TABLA 22: CARGAS PARA PREPARACIÓN DE PROBETAS.....	34
TABLA 23: CORRECCIÓN DE VOLTAJE DE ACUERDO A CORRIENTE INICIAL (NT BUILD 492)	39
TABLA 24: DATOS OBTENIDOS SEGÚN ENSAYO ASTM C 1202.....	41
TABLA 25: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HM-0%.....	44
TABLA 26: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HM-20%.....	44
TABLA 27: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HM-40%.....	44
TABLA 28: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HMF-0%	44
TABLA 29: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HMF-20%	44
TABLA 30: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HMF-40%	45
TABLA 31: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HC-0%.....	45
TABLA 32: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HC-20%.....	45
TABLA 33: VALORES DE PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETAS HC-40%.....	45
TABLA 34: COEFICIENTES DE MIGRACIÓN DE HORMIGONES ESTUDIADOS.....	46
TABLA 35: RESULTADOS DE ENSAYOS NORDTEST Y ASTM.....	48
TABLA 36: CORRELACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS BAJO AMBAS NORMAS	50
TABLA 37: DETALLE ENSAYO HM-0%	56
TABLA 38: DETALLE ENSAYO HM-20%	56
TABLA 39: DETALLE ENSAYO HM-40%	56
TABLA 40: DETALLE ENSAYO HMF-0%	57
TABLA 41: DETALLE ENSAYO HMF-20%	57
TABLA 42: DETALLE ENSAYO HMF-40%	57
TABLA 43: DETALLE ENSAYO HCF-0%.....	58
TABLA 44: DETALLE ENSAYO HCF-20%.....	58
TABLA 45: DETALLE ENSAYO HCF-40%.....	58
TABLA 46 ENSAYO PROBETA HC 0% DAÑO	61

TABLA 47 ENSAYO PROBETA HC 20% DAÑO.....	62
TABLA 48 ENSAYO PROBETA HC 40% DAÑO.....	62
TABLA 49 ENSAYO PROBETA HC 0% DAÑO.....	63
TABLA 50 ENSAYO PROBETA HC 20% DAÑO.....	63
TABLA 51 ENSAYO PROBETA HC 40% DAÑO.....	64
TABLA 52 ENSAYO PROBETA HM 0% DAÑO.....	64
TABLA 53 ENSAYO PROBETA HM 20% DAÑO	65
TABLA 54 ENSAYO PROBETA HM 40% DAÑO	65
TABLA 55 ENSAYO PROBETA HM 0% DAÑO	66
TABLA 56 ENSAYO PROBETA HM 20% DAÑO	66
TABLA 57 ENSAYO PROBETA HM 40% DAÑO	67
TABLA 58 ENSAYO PROBETA HCF 0% DAÑO	67
TABLA 59 ENSAYO PROBETA HCF 20% DAÑO	68
TABLA 60 ENSAYO PROBETA HCF 40% DAÑO	68
TABLA 61 ENSAYO PROBETA HCF 0% DAÑO	69
TABLA 62 ENSAYO PROBETA HCF 20% DAÑO	69
TABLA 63 ENSAYO PROBETA HCF 40% DAÑO	70
TABLA 64 ENSAYO PROBETA HMF 0% DAÑO	70
TABLA 65 ENSAYO PROBETA HMF 20% DAÑO	71
TABLA 66 ENSAYO PROBETA HMF 40% DAÑO	71
TABLA 67 ENSAYO PROBETA HMF 0% DAÑO	72
TABLA 68 ENSAYO PROBETA HMF 20% DAÑO	72
TABLA 69 ENSAYO PROBETA HMF 40% DAÑO	73

Índice de Ilustraciones

FIGURA 1: CELDAS DE APLICACIÓN DE CARGA	17
FIGURA 2: MUESTRA LISTA PARA ENSAYAR	18
FIGURA 3: ESQUEMA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.	18
FIGURA 4: INSTALACIÓN EXPERIMENTAL ENSAYOS DE PRUEBA.....	19
FIGURA 5: GRANULOMETRÍA DE LOS ÁRIDOS UTILIZADOS.....	22
FIGURA 6: SERIE DE PROBETAS CONFECCIONADAS POR COLADA	27
FIGURA 7: MEDICIÓN DEL CONO.....	29
FIGURA 8: DISPOSICIÓN DE ASERRADO DE PROBETAS	30
FIGURA 9: PROBETA CILÍNDRICA, LISTA PARA ENSAYO	30
FIGURA 10: CURVA DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN HORMIGONES CONFECCIONADOS	34
FIGURA 11: ESQUEMA ENSAYO ASTM C 1012.....	35
FIGURA 12: MONTAJE EXPERIMENTAL ASTM C 1202.....	36
FIGURA 13: ESQUEMA MONTAJE PROBETAS ENSAYO NORDTEST NT BUILD 492	38
FIGURA 14: MONTAJE EXPERIMENTAL ENSAYO NORDTEST NT BUILD 492 (SIN ÁNODOS).....	38
FIGURA 15: ESQUEMA MEDICIÓN DE PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	40
FIGURA 16: PROBETAS HENDIDAS, ROCIADAS CON SOLUCIÓN DE NITRATO DE PLATA. SE DEBE ESPERAR DE 20 A 30 MINUTOS PARA QUE SE TINTURE LA ZONA DONDE PENETRA EL CLORURO.....	42
FIGURA 17: PENETRACIÓN DE CLORUROS EN PROBETA, VISIBLE DESPUÉS DE ROCIARSE CON SOLUCIÓN DE NITRATO DE PLATA (BLANCO).....	43
FIGURA 18: IMAGEN CON CONTRASTE MODIFICADO, SE OBSERVA Y REMARCA LA ZONA DONDE HUBO PENETRACIÓN DE CLORUROS.....	43
FIGURA 19: COEFICIENTE DE MIGRACIÓN HORMIGONES MARÍTIMOS.....	46
FIGURA 20: COEFICIENTE DE MIGRACIÓN HORMIGONES CON FIBRA.....	47
FIGURA 21: COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DE HORMIGONES POR NIVEL DE CARGA.....	47
FIGURA 22: COMPARACIÓN DE VALORES DE ENSAYOS NORDTEST Y ASTM	49
FIGURA 23: ZONA REACCIÓN CATÓDICA. SE OBSERVA BURBUJAS PROVOCADAS POR REACCIÓN ELECTROQUÍMICA.	59
FIGURA 24: ZONA DE REACCIÓN CATÓDICA, DESPUÉS DEL ENSAYO. SE OBSERVA ACUMULACIÓN DE PARTÍCULAS SOBRE PROBETA Y ELECTRODO	59
FIGURA 25: ACUMULACIÓN DE PARTÍCULAS SOBRE ELECTRODO	60
FIGURA 26: ACUMULACIÓN DE PARTÍCULAS SOBRE PROBETA DE HORMIGÓN UNA VEZ FINALIZADO EL ENSAYO.....	60
FIGURA 27: SOPORTE INCLINADO PARA PROBETAS. EVITA ACUMULACIÓN DE BURBUJAS DE AIRE EN ZONA DE INTERFAZ PROBETA-ÁNODO	61

1. Introducción

1.1. Introducción General

La vida útil de las estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes marinos depende en gran medida de la calidad del hormigón de recubrimiento, principalmente por su resistencia a la fisuración y a la penetración de cloruros, ya que este fenómeno va estrechamente ligado a la corrosión de la armadura de la estructura. Es por esta razón que se busca contar con diferentes metodologías que permitan determinar el comportamiento del hormigón frente a la penetración de ión cloruro, tanto para fines de investigación como para el control durante la construcción.

Un método de ensayo para calificar el grado de resistencia a la penetración de cloruros muy fiable, y además muy utilizado, es el método AASHTO T 259, basado en la determinación del gradiente de cloruros en el espesor de recubrimiento de una probeta sometida a soluciones salinas en una de sus caras, por un tiempo de 90 días. Este método, por su larga duración, no resulta adecuado para utilizarlo de una manera directa en el control de calidad en la construcción de una obra. Debido a esto surge la necesidad de contar con metodologías de ensayos acelerados, para obtener índices confiables de la calidad del hormigón en cuanto a la resistencia a la penetración de cloruros, en un lapso de tiempo compatible al desarrollo de una obra. Estos métodos acelerados están diseñados para ser realizados en muestras obtenidas en obra, o en probetas confeccionadas en laboratorio.

Un método acelerado comúnmente utilizado es el ASTM C1202, que consiste en inducir la migración de una solución de cloruro de sodio mediante un campo eléctrico a través de la probeta de hormigón, que ha sido colocada en un circuito y expuesta a soluciones salinas. La carga eléctrica, registrada en Coulombs, representa la conductividad de la probeta, y aumenta a medida que los distintos iones, en especial el ión cloruro, van penetrando y se movilizan a través de ella.

Surge así otro problema, ya que al confeccionar un hormigón, el agua utilizada contiene muchos iones disueltos, provenientes de los áridos o los demás agentes que se involucran en el proceso. Esto genera errores en la obtención de los resultados utilizando el método ASTM C1202, ya que la presencia de otros iones genera variaciones en la carga eléctrica registrada, que distorsionan los valores medidos, y por consiguiente, obteniéndose un valor menos preciso de la resistencia a penetración de cloruros en la muestra.

Debido a esto, surgió la necesidad de desarrollar otro método acelerado de mayor precisión para determinar la permeabilidad a cloruros del hormigón, que no se viera afectado por la presencia de otros iones presentes en el hormigón.

El método noruego, Nordest NT Build 492, fue diseñado para medir de forma específica la penetración del ión cloruro en una probeta, sin verse afectado el resultado final por la

presencia de otros iones, ya que su metodología se centra en analizar específicamente la permeabilidad al ión cloruro.

Para definir los hormigones a utilizar en esta investigación, se optó por diseñar un hormigón convencional tipo H30 de la norma chilena NCh 170, y un hormigón típico para obras marinas. Este último corresponde a un hormigón que cumple con la categoría C de la norma ACI 318-14.

Se consideró en la confección de los hormigones marítimos a ensayar, la agregación de un porcentaje de microsílíce a la mezcla, para mejorar el desempeño del material ante condiciones adversas. De acuerdo a estudios, la utilización de este material disminuye notoriamente la penetración de ión cloruro al hormigón, por lo que se analizará su efectividad al trabajar en conjunto con la fibra de polipropileno, utilizada para el control de la fisuración del hormigón durante la etapa inicial de fraguado.

Otro factor a considerar en la durabilidad de una estructura de hormigón armado, es la utilización de fibras en el hormigón. Esto se usa para mejorar la durabilidad del concreto, ya que las fibras distribuyen de forma homogénea las fisuras que se producen en el hormigón, disminuyendo el tamaño de estas, y disminuyendo el riesgo de corrosión de las armaduras. Sin embargo, no se conoce cómo afectaría la presencia de estas a hormigón sometido a ambientes salinos, ni el comportamiento que se observará en el proceso de migración del ión cloruro, por la posible facilitación del transporte de cloruros a través de las discontinuidades generadas en la matriz de poros por la inclusión de fibra.

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente en Chile se utiliza el ensayo ASTM C 1012 cuando es necesario obtener una estimación de la calidad de un hormigón que se va a someter a condiciones adversas. Este ensayo entrega un índice de resistencia a la penetración del ión cloruro, pero no se deriva directamente de él una propiedad del material como el coeficiente de difusión de cloruros, por lo que no es posible realizar un procesamiento de la información y obtener información acerca de la vida útil que poseerá la estructura. Surge así la necesidad de implementar una nueva metodología de ensayo, que permita determinar un coeficiente de difusión de cloruros de forma cuantitativa.

Además, contar con métodos más variados para determinar un coeficiente de migración de cloruros es necesario para obtener una forma rápida de evaluación de la durabilidad potencial de una estructura expuesta a ambientes agresivos. Un buen diseño del hormigón a utilizarse en una obra marítima se traduce en menos costos de mantención al alargarse la vida útil de la estructura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Poner a punto el ensayo Nordtest NT Build 492 en el laboratorio de cementos del IDIEM para medir la permeabilidad a cloruros en hormigones conforme a las especificaciones de esa norma y estudiar en forma comparativa su precisión, comparando sus resultados con los obtenidos al utilizar el ensayo ASTM C 1202.

1.3.2. Objetivos específicos

Analizar el comportamiento frente a la penetración de ión Cl^- en hormigones, a través de Nordtest NT Build 492, cuya dosificación incluye fibra, y compararlo con el respectivo hormigón patrón sin fibras.

Medir la permeabilidad a cloruros en hormigones marítimos con metodología ASTM C 1202 (con y sin fibra adicionada)

Comparar los resultados obtenidos por los 2 métodos acelerados y verificar su correlación.

Estudiar la confiabilidad de las mediciones, a través de parámetros estadísticos y análisis de errores.

Verificar la efectividad de la utilización de microsílíce en dosificaciones de hormigones marítimos, y analizar su comportamiento en presencia de fibra de polipropileno.

1.4. Etapas del desarrollo de la investigación

El desarrollo de este trabajo de título contempla las siguientes etapas:

Estudio de antecedentes e investigaciones realizadas que utilicen los ensayos Nordtest NT Build 492 y ASTM C 1202 para medir la permeabilidad a cloruros en hormigones marítimos.

Planteamiento del problema a investigar, con la definición de variables y de dosificaciones a estudiar.

Construcción de los dispositivos necesarios para la realización de los ensayos a estudiar.

Elaborar los hormigones de prueba que se utilizarán en el estudio. Se contempla dos tipos de hormigones, un hormigón normal y de un hormigón dosificado para obras marítimas. Además, se estudiará el efecto de la incorporación de una macrofibra de polipropileno para ambos casos. Estas probetas se confeccionarán en el Laboratorio de Hormigones de Prueba, en IDIEM.

Las probetas serán sometidas a compresión a la edad de 28 días, para simular las fisuras a las que se encuentra expuesto el hormigón en obra.

Obtener un coeficiente de penetración de cloruros en las probetas de hormigón mediante la utilización de los métodos de ensayo ASTM C 1202, y el método Nordtest NT Build 492. Se ensayarán las probetas a una edad de 60-70 días.

2. Antecedentes

2.1. Hormigones Marítimos

La necesidad de introducir prácticas constructivas que aseguren la obtención de estructuras de hormigón armado que tengan un buen comportamiento en ambientes adversos es y ha sido una de las mayores problemáticas en el mundo de la construcción. Hacia el año 1756, cuando John Smeaton construyó el faro de Eddystone Rock, en Inglaterra, fue la primera vez que se desarrolló un tipo especial de cemento para un ambiente marino adverso (Lea F.M, 1970). Cuando la estructura se tuvo que demoler debido a la severa erosión de la roca bajo el faro, la estructura aún mantenía su integridad estructural.

Esta experiencia sirvió como base para que investigadores e instituciones alrededor del mundo comenzaran a desarrollar soluciones para mejorar la calidad de los cementos utilizados en obras marítimas.

2.2. Durabilidad de hormigones marítimos

Los hormigones sometidos a ambientes marinos deben soportar los procesos de deterioro como ataques químicos, reacción álcali-áridos, a ciclos de hielo y deshielo, a erosión por mareas, etc. Frente a estos ataques es que la integridad de la matriz cementícea del hormigón se ve comprometida y se va destruyendo a medida que pasa el tiempo. Sin embargo, está ampliamente demostrado que la desintegración del hormigón en sí no es la principal causa de la pérdida de durabilidad y resistencia en una construcción de hormigón armado, sino que es la corrosión electroquímica del acero de su armadura (Gjørnv, 2013). Cuando el acero se ve afectado por la corrosión, el elemento estructural pierde la capacidad de soportar cargas de flexotracción, generándose fallas frágiles para las cargas normales de uso. Una estructura de hormigón armado que pierde su armadura, pierde su funcionalidad estructural, y no es apta para soportar las condiciones de uso para las que fue diseñada. El año 2001, solo en los Estados Unidos, el costo de reparación de puentes debido a la corrosión de sus armaduras fue estimado en unos US\$ 8.3 billones (Gjørnv, 2009), lo que ejemplifica la gran problemática generada por este proceso.

La principal causa de corrosión de la armadura en los hormigones marítimos es la penetración del ión cloruro, presente en el agua de mar, hasta el nivel de la armadura.

2.3. Mecanismos de transporte de ión Cloruro

Los mecanismos en que los iones de cloruro pueden penetrar en el hormigón son la absorción capilar, presión hidrostática y difusión.

El método mecanismo más eficiente es la penetración por difusión, en que los iones de cloruro se mueven bajo un gradiente de concentración. Para esto es necesario que el hormigón posea una fase acuosa continua, con un gradiente de concentración de iones en ella.

Un segundo mecanismo es el ingreso de iones al hormigón mediante permeación, generada por gradientes de presión hidráulica. Si se aplica una presión hidráulica en la superficie del hormigón, y hay iones de cloruros disueltos en el líquido, entonces los iones penetrarán dentro del elemento.

Otra forma en que exista transporte de iones al interior del concreto es el mecanismo de absorción. Esto se produce cuando una estructura está sometida a ciclos de humedad y secado debido a las condiciones ambientales. Si una solución que contiene iones se pone en contacto con una superficie de hormigón seca, se producirá la penetración de los iones al ser absorbidos, debido a una succión capilar. Si bien este mecanismo es muy común, los iones solo penetrarán superficialmente en el hormigón, y no afectará de forma directa en el proceso de corrosión. Sin embargo, este mecanismo genera una disminución en la distancia que tienen que recorrer los iones por difusión para alcanzar la armadura (Thomas, et al., 1995).

2.4. Difusión del ión cloruro en hormigones.

La difusión del ión cloruro en el hormigón, al igual que cualquier proceso de difusión, se produce de acuerdo a la Primera Ley de Fick. Esta ley nos dice que un flujo difusivo que atraviesa una superficie es directamente proporcional al gradiente de concentración. Para una situación unidimensional, esta Ley se puede expresar como

$$J = -D_{\text{eff}} \frac{dC}{dx}$$

Ecuación 1: Ley de Fick caso unidimensional

Donde J es el flujo de los iones de cloruro, D_{eff} es el coeficiente de difusión efectivo, C es la concentración de ión cloruro y x es la variable de posición del frente de avance. Cada sustancia posee un coeficiente de difusión, por lo que la interacción del coeficiente de la solución y del hormigón determina un coeficiente de difusión efectivo. Esta ecuación es válida para condiciones estacionarias, es decir, cuando no hay cambios en la concentración de ión cloruro en el tiempo. Sin embargo, esto puede utilizarse para obtener la ecuación para condiciones no estacionarias, que se expresa como la Segunda Ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{eff}} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Ecuación 2: Ley de Fick para flujo bidimensional no estacionario

Esta ecuación incluye los efectos de los cambios de concentración en el tiempo. Puede ser resuelta usando las condiciones de borde de que para un tiempo cero o inicial, se tiene una concentración inicial C_0 en la superficie, y una concentración $C = 0$ en el hormigón, y que para un tiempo infinito o lo bastante grande como para que no se observen cambios aparentes, la concentración en el hormigón siempre será 0 a una distancia suficientemente alejada de la superficie.

De esta forma, es posible modelar el comportamiento de un hormigón en contacto con ambientes agresivos, con alto contenido de cloruros. Es necesario destacar que existen muchos factores que afectan la tasa de difusión de cloruros en un hormigón, y que se ven reflejados de forma implícita en la determinación del coeficiente D_{eff} .

2.5. Factores que inciden en la tasa de penetración de cloruros en el hormigón.

La tasa de penetración de cloruros dentro del hormigón depende de su estructura de poros, que se ve afectada por los materiales usados en la elaboración de la pasta, las prácticas constructivas, la edad de la muestra, relación agua cemento, etc. De acuerdo a estudios, los hormigones fabricados con cementos adicionados con escoria o ceniza, poseen una permeabilidad mucho menor que aquellos en que se usa cemento portland puro (Yildirim , et al., 2011). En general, se tiene una muy fuerte relación entre resistividad eléctrica y la permeabilidad a cloruros del hormigón. Por otro lado, la relación agua/cemento utilizada en la elaboración de la pasta de hormigón es uno de los factores determinantes de su comportamiento ante ambientes expuestos a cloruros. Mientras menor sea la cantidad de agua utilizada, menor será la permeabilidad a cloruros. Es más, para una menor relación agua/cemento, aumenta la efectividad de las adiciones como cenizas o escoria en el proceso de otorgarle mayor resistencia a la penetración de cloruros al hormigón. Esto se debe a que la estructura de poros del hormigón se hace más fina y discontinua.

Se ha demostrado que, para un hormigón basado en cemento portland sin adiciones, la disminución de la relación agua cemento de 0,5 a 0,4 se traduce en una disminución del coeficiente de difusión de cloruros en el concreto en un factor 2 a 3, mientras que la incorporación de materiales cementíceos a la dosificación, tales como escoria de alto horno, ceniza volante o microsílíce, para una misma relación agua cemento, se traduce en una disminución de la difusibilidad a cloruros en un factor hasta 20 (Thomas, et al., 2011).

Otro factor que afecta el comportamiento de un hormigón es la temperatura de curado. Para edades tempranas, un espécimen curado a altas temperaturas poseerá una mayor resistencia a la penetración de cloruros que un espécimen similar pero

curado a temperatura ambiente. Sin embargo, a edades tardías, en que el proceso de hidratación se ha desarrollado de manera más completa, un hormigón curado a temperatura ambiente poseerá un menor coeficiente de difusión que otro curado a alta temperatura (Detwiler, et al., 1991; Cao and Detwiler, 1996). Esto se debe a que el curado a alta temperatura produce una mayor cantidad de microfisuras en la matriz del concreto, por lo que aumenta su permeabilidad.

A modo de resumen, cualquier factor que afecte la estructura de poros de la matriz del hormigón, afectará de forma directa su permeabilidad al ión cloruro.

2.6. Ensayo ASTM C1202

Este ensayo, también conocido como RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), desarrollado por Whiting en 1981, determina un índice para caracterizar la penetrabilidad que posee el ion cloruro de un hormigón, mediante un ensayo acelerado de permeabilidad a cloruros mediante la aplicación de un campo eléctrico.

El ensayo consiste en posicionar un espécimen previamente condicionado y saturado en agua, de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, en una celda que contiene, por un extremo, una reserva con una solución al 3% de NaCl y por otro una reserva con una solución 0,3M NaOH.

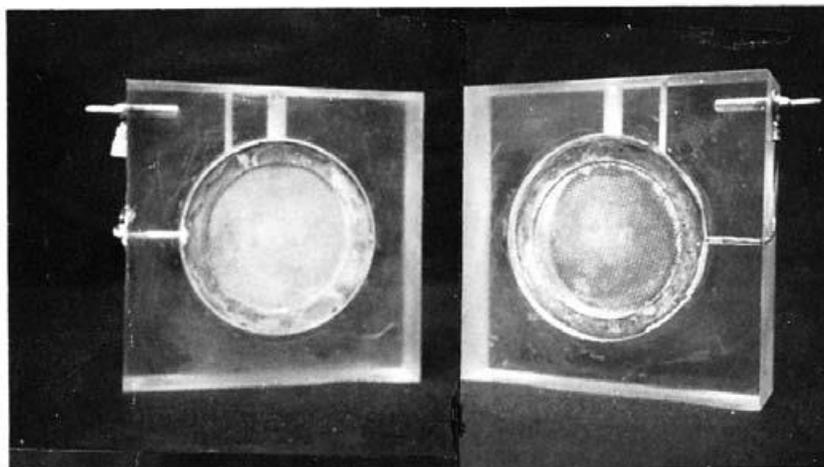


Figura 1: Celdas de aplicación de carga

Se conecta una fuente de poder entre las celdas y se aplica un diferencial de potencial de 60 V DC, en el que la terminal negativa es conectada en la reserva con NaCl y la terminal positiva en la reserva con NaOH. Los iones cloruro migran hacia la terminal positiva, forzados por la diferencia de potencial generada por la fuente. La cantidad de carga que circula a través del espécimen ensayado se relaciona con la permeabilidad al ión cloruro que posee.

Durante seis horas se registra la cantidad de carga eléctrica que pasa, en Coulombs, y el resultado se asocia a la penetrabilidad del ión cloruro en la muestra.

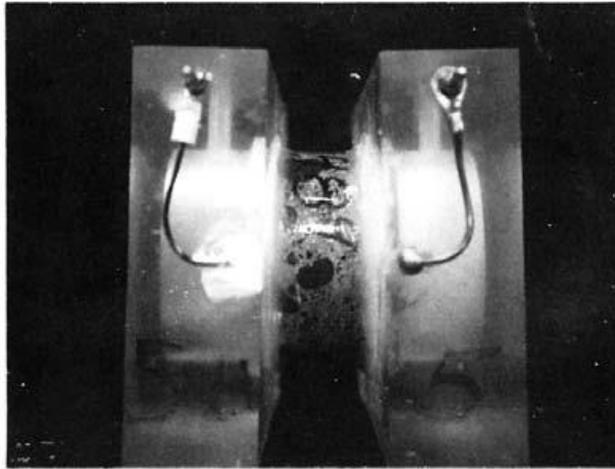


Figura 2: Muestra lista para ensayar

De acuerdo al criterio de la Norma ASTM C 1202, la cantidad de carga total que pasa por el cilindro permite clasificar el hormigón de acuerdo a una tabla de rangos de permeabilidad.

2.7. Ensayo Nordtest NT Build 492

Este método de ensayo es aplicable a hormigones obtenidos tanto en laboratorios como extraídos de estructuras en terreno. El coeficiente de migración de cloruros obtenido en este ensayo es una medida de la resistencia del material a la penetración de ión cloruro. Este es un método de ensayo bajo condiciones no estacionarias, por lo que el coeficiente de migración obtenido no puede compararse directamente con otros métodos de ensayo de carácter estacionario.

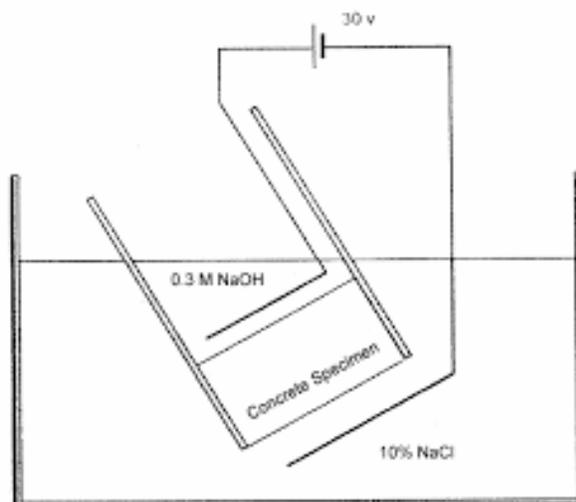


Figura 3: Esquema instalación experimental.

El ensayo consiste en someter a una probeta cilíndrica de hormigón a un potencial eléctrico aplicado axialmente a través de ella, forzando a que los iones de cloruro, presentes en las soluciones externas, migren hacia el interior del espécimen. Una vez transcurrido el tiempo de ensayo de la muestra, la probeta se parte axialmente, y la sección de fractura se rocía con una solución de nitrato de plata. La penetración de cloruros en la muestra se puede medir a partir del precipitado blanco que resulta de la reacción del nitrato de plata con los iones de cloruro que penetraron en el hormigón. Una vez medida la distancia de penetración, se puede calcular el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario (D_{nssm} ; non steady state migration).



Figura 4: Instalación experimental ensayos de prueba

3. Planteamiento de la investigación

3.1. Tipos de hormigones a confeccionar

Para la realización de este estudio, se utilizaron cuatro hormigones, dos pertenecientes a la clase de hormigón convencional, correspondientes a un hormigón H30 según la Norma Chilena NCh 170, y dos hormigones para uso marítimo, que se clasifican como clase C según la norma ACI 138-14.

La gran diferencia entre estos tipos de hormigones radica en su relación agua-cemento, y en la utilización de adiciones de microsílice en los hormigones marítimos, lo que se traduce en mayores resistencias mecánicas y mejor desempeño ante ambientes agresivos.

Además, se tomó una colada de cada tipo de hormigón, y se les adicionó fibra de polipropileno, contando de esta forma con cuatro clases diferentes de hormigón. La dosificación de los hormigones a estudiar se indica en el punto 3.4 del presente informe.

3.1.1. Identificación de los hormigones

Para el posterior tratamiento de los datos, se le asigna a cada hormigón la siguiente nomenclatura, la que será utilizada en el desarrollo del presente informe:

Tabla 1: Nomenclatura para diferentes tipos de hormigón

Hormigón	Nomenclatura
Hormigón convencional sin fibras (colada 1)	HC
Hormigón marítimo sin fibras (colada 2)	HM
Hormigón convencional con fibras (colada 3)	HCF
Hormigón marítimo con fibras (colada 4)	HMF

Junto a la nomenclatura de cada hormigón, se puede agregar “0%”, “20%” ó “40%”, que indica el nivel de carga al que fue sometido la muestra antes de la exposición. Por ejemplo, HMF-20% representa una muestra de hormigón marítimo con adición de fibra, que fue sometida, antes de ser ensayada, a una carga de compresión equivalente al 20 % de su carga máxima de rotura.

3.2. Variables a considerar en elaboración de hormigones

Para la elaboración de los hormigones a estudiar, las siguientes variables fueron consideradas:

3.2.1. Cemento

El cemento fue almacenado hasta su uso en un ambiente libre de humedad, con el fin de evitar que se humedeciera y se hidratara. Para todas las coladas de hormigón se utilizó cemento Melón Extra. Este es un cemento clase Portland Puzolánico, grado Alta Resistencia, utilizado principalmente en proyectos industriales o de obras públicas.

La caracterización de este cemento se realizó en el laboratorio de Control de Cementos de IDIEM, donde se determinaron todos los parámetros básicos que se indican en la norma de cementos NCh 148.Of.1968.

Tabla 2: Resultados caracterización físico química del cemento.

Característica	Valor	Unidad
Peso Específico	3.05	g/ml
Superficie Específica	5150	cm ² /g
Consistencia Normal	30.75	%
Tiempo de Fraguado Inicial	1:20	hh:mm
Tiempo de Fraguado Final	2:20	hh:mm
Expansión en Autoclave	0.02	%
Flexión a 7 días	73	kgf/cm ²
Flexión a 28 días	83	kgf/cm ²
Compresión a 7 días	494	kgf/cm ²
Compresión a 28 días	602	kgf/cm ²
Pérdida por Calcinación	1.58	%
SO₃	3.16	%
Residuo Insoluble	9.25	%

El cemento cumple con todos los requisitos exigidos por la Norma chilena NCh148.Of.68.

3.2.2. Áridos

Para la preparación del hormigón se utilizó arena gruesa y gravilla de tamaño máximo nominal de veinte milímetros. La granulometría utilizada en este trabajo se registra para contribuir a la repetibilidad de los ensayos en futuras investigaciones. El tamizado de los áridos arrojó la granulometría que se indica a continuación.

Tabla 3: Granulometría de áridos utilizados

Tamaño [mm]	Porcentaje que pasa (%)		
	Gravilla	Arena Gruesa	Árido Combinado (*)
	19 mm	4 mm	
25	100	100	100
19	98	100	99
12,5	72	100	84
9,5	41	100	66
4,8	6	86	40
2,36	1	64	27
1,18	0	46	19
0,6	0	31	13
0,315	0	16	7
0,15	0	6	3
Módulo de Finura	6,54	3,1	3,66

(*) Corresponde a la suma ponderada de una mezcla que consta de un 58% de Gravilla y un 42% de Arena Gruesa

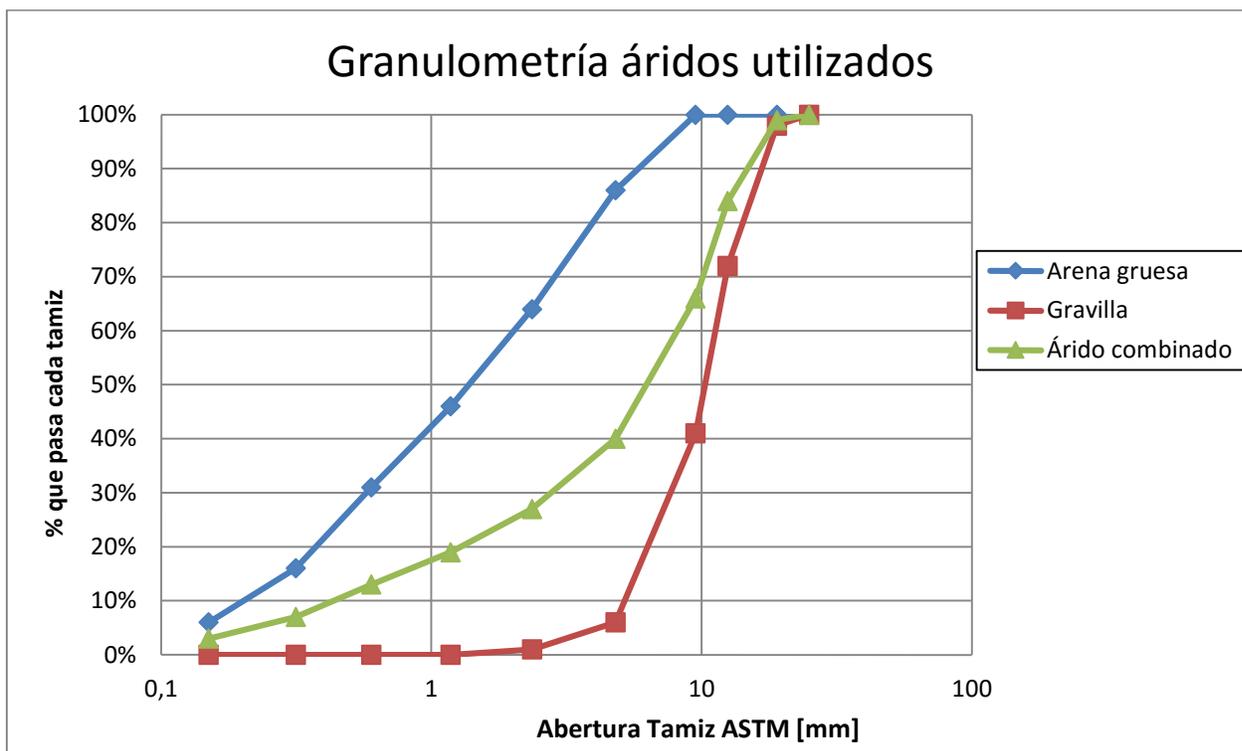


Figura 5: Granulometría de los áridos utilizados

Se calcularon los valores de humedad y absorción de los áridos, para realizar las correcciones de agua en la dosificación.

La caracterización de los áridos utilizados para cada colada de hormigón, proporcionada por personal de la Unidad de Física y Mecánica de Áridos, se indica a continuación.

Tabla 4: Humedad áridos HC

HC		
Tipo de árido	Absorción (%)	Humedad (%)
Gravilla	0,92	1,3
Arena	1,37	3,4

Tabla 5: Humedad áridos HM

HM		
Tipo de árido	Absorción (%)	Humedad (%)
Gravilla	0,92	1,3
Arena	1,37	4,2

Tabla 6: Humedad áridos HCF

HCF		
Tipo de árido	Absorción (%)	Humedad (%)
Gravilla	0,92	1,7
Arena	1,37	1,06

Tabla 7: Humedad áridos HMF

HMF		
Tipo de árido	Absorción (%)	Humedad (%)
Gravilla	1,03	1,7
Arena	1,37	1,06

Con estos valores, se realiza una corrección en las dosificaciones, para mantener la cantidad de agua libre definida en la dosificación teórica.

3.2.3. Adiciones

3.2.3.1. Macrofibra de polipropileno

Se utilizó para el estudio macro fibra TUF-STRAND SF, Fibras sintéticas estructurales. La fibra se agrega a una colada de hormigón convencional y a otro de hormigón marítimo. Se observa que al adicionarse fibra en el hormigón fresco, este pierde una gran parte de su

docilidad, lo que se traduce en una clara disminución en su fluidez. Los datos técnicos de la fibra se presentan a continuación

Tabla 8: Características Macrofibra de Polipropileno

Gravedad Específica	:	0.92
Resistencia a Tensión [MPa]	:	600-650
Módulo de elasticidad [GPa]	:	9.5
Punto de llama (ASTM D-1929) [°C]	:	330
Longitud de fibra [mm]	:	50
Aspect Ratio	:	74
Color	:	Blanco
Absorción de agua	:	Despreciable
Resistencia a álcalis	:	Excelente
Resistencia a ácidos	:	Excelente
Resistencia a moho – hongos	:	Excelente

3.2.3.2. Microsílice

Para la fabricación de las series de hormigones marítimos se consideró agregar microsílíce a la dosificación, con el fin mejorar el comportamiento de este ante la penetración de cloruros. Este material, obtenido como subproducto de la elaboración de aleaciones de silicio de alta pureza o ferrosilicio, es un polvo muy fino, con alto contenido de SiO₂ amorfo, que actúa en la pasta de hormigón disminuyendo la porosidad de este, ya que sus partículas micrométricas van ocupando los espacios vacíos en la estructura de poros del hormigón, a partir de reacciones químicas con la cal liberada en la reacción de hidratación del cemento. Esto genera una disminución en la porosidad y en la cantidad de canales capilares que se forman en la estructura interna del hormigón, otorgándole mayor resistencia a la penetración de sustancias en la estructura mediante los mecanismos de transporte antes mencionados. A continuación se presentan las características del aditivo a base de microsílíce SikaFume de SIKA.

Tabla 9: Microsílice, Especificación del fabricante

Peso específico relativo	2,2
SiO₂	>85%
Cl:	0,30%
CaO libre:	1%
Pérdida por calcinación:	<6%
Superficie específica:	>150000 cm ² /g
Índice de actividad puzolánica:	>105
Retenido en malla de 45 micrones:	<10%

3.2.3.3. Aditivo Súper-plastificante

Para lograr hormigones con adición de microsilíce con un cono de 15 +/- 1 centímetros, fue necesaria la utilización de un aditivo plastificante, en el caso de las coladas de hormigón marítimo, ya que la adición de este material genera que la pasta demande de una mayor cantidad de agua, y disminuya la fluidez de esta. Por otra parte, al agregarle macrofibra de polipropileno, el cono de la mezcla se veía disminuido casi a cero, por lo que se debió utilizar una mayor cantidad de aditivo en este hormigón. Las características del producto “Hiperplastificante de Alto Desempeño TamCem 65B, marca NORMET”, entregadas por el fabricante, se muestran a continuación.

Tabla 10: Características Aditivo Superplastificante Normet

Forma y aspecto del líquido	Ámbar
Densidad aproximada [kg/l]	1,08
pH	7
Cloruros [%] en peso	<0,1%

3.3. Variables a considerar en preparación de probetas

3.3.1. Aplicación de carga axial a probetas de hormigón

Durante la confección de las probetas, se confeccionaron probetas cúbicas de 200 milímetros de arista, con el fin de ensayarlos a compresión y obtener las cargas de rotura de cada hormigón. Se ensayaron además tres probetas cilíndricas de cada colada, para tener datos más fidedignos acerca del comportamiento mecánico de los hormigones, y a la vez determinar si hubo problemas en la confección y vibrado de las probetas.

Con el fin de simular las condiciones de servicio a la que son sometidas las estructuras de hormigón armado, se consideró un cierto nivel de fisura en las probetas, antes de ser ensayadas.

Se tomó un tercio de las probetas de cada colada, y se dejaron sin carga; otro tercio fue sometido a cargas equivalentes al veinte por ciento de su carga de rotura; y el tercio restante fue sometido a cargas equivalentes al cuarenta por ciento de su carga de rotura.

De esta manera, se obtuvieron tres series de probetas para cada una de las coladas de hormigón.

3.3.2. Forma de curado y conservación de probetas

Las probetas para el ensayo efectuado en paralelo, para ensayarse de acuerdo a la norma ASTM C 1012, fueron guardadas de manera separada. La mitad de las probetas, una vez desmoldadas, se conservaron sumergidas bajo agua, mientras que la otra mitad fue trasladada a una cámara húmeda. Esto debido a que el trabajo desarrollado por la memorista Karla Elorza, considera como variable el tipo de curado al que se sometió a las probetas.

Para el ensayo utilizando la Norma Nordtest NT 492, la totalidad de las probetas fue curada bajo agua hasta la edad de sesenta días, y luego fueron trasladadas a una cámara húmeda hasta que fueron ensayadas. No se considera esta variable en la realización de los experimentos bajo la Norma noruega.

3.4. Dosificación de los hormigones a estudiar

Para la realización de los ensayos de las normas Nordtest NT Build 492 y ASTM C 1012, se confeccionaron cuatro coladas de hormigón, de cada una de las cuales se fabricaron doce probetas cilíndricas de cien milímetros de diámetro y ciento noventa milímetros de altura.

En cada colada se hizo con una dosificación teórica diferente, como se indica a continuación:

Tabla 11: Dosificación hormigones a estudiar

Mezcla	Cemento (kg)/m ³	Agua (l)/m ³	Gravilla (kg)/m ³	Arena (kg)/m ³	Microsílice (kg)/m ³	Aditivo (kg)/m ³	Macrofibra (kg)/m ³	A/C
HC	384	211	1000	729	0	0	0	0,55
HM	381,8	168,8	1055	764	20,1	1	0	0,42
HCF	384	211	1000	729	0	0,7	3	0,55
HMF	381,8	168,8	1055	764	20,1	2,1	3	0,42

3.4.1. Confección de las probetas de prueba

Para la fabricación de las probetas se utilizaron moldes de PVC de 190 milímetros de alto y 110 milímetros de diámetro exterior, con una tapa en uno de

sus extremos. Se hizo un corte axial a los moldes de PVC, con el fin de que fuera más fácil el desmolde de las probetas. Para facilitar este proceso, se utilizó desmoldante en la superficie interior de los moldes antes de cada uso.



Figura 6: Serie de probetas confeccionadas por colada

Se confeccionó una colada de prueba con un hormigón convencional sin fibra, para analizar el comportamiento de los moldes y para definir el método de vibrado a utilizar. Se observó que el vibrado mecánico arrojaba mejores resultados que el vibrado manual, ya que la muestra de hormigón quedaba sin oquedades visibles, en el caso de los hormigones convencionales.

Luego se realizó una colada de prueba de un hormigón marítimo con fibra, para analizar el comportamiento de esta mezcla. La primera muestra se vibró mecánicamente en la máquina de vibrado, y resultó en probetas mal compactadas y con oquedades, que no sirvieron para los análisis posteriores.

Debido a esto, se cambió el método de fabricación y compactación de las probetas. Primero se compactaron de forma manual, mediante el apisonado de la mezcla aplicando veinte golpes en dos capas de hormigón. Luego, la probeta se sometía al vibrado mecánico, teniendo el cuidado de aplicar presión en la parte superior de la probeta. De este modo, se consiguió lograr probetas de hormigón con fibra sin la presencia de oquedades significativas.

En todo el proceso de confección de probetas, se utilizó agua potable proveniente de la red de consumo local de Santiago.

La confección de las coladas de prueba, y de las coladas definitivas, se desarrolló en las dependencias del Laboratorio de Hormigones de Prueba del IDIEM de la Universidad de Chile.

3.5. Elaboración de series de ensayo

Para la fabricación de las coladas de hormigón y sus respectivas probetas, para cada serie de ensayo, se procedió de la siguiente forma:

- Se pesan previamente las cantidades a utilizar, para la fabricación de 70 litros de colada.
- Se vierte la arena gruesa en una betonera de trompo, y se acciona el mecanismo, revolviéndose el material durante 30 segundos, para homogeneizarlo.
- Se agregan la gravilla, y se revuelve por otros treinta segundos.

- Se adiciona el cemento y la microsíllice, previamente mezclados de forma manual, y se revuelve por sesenta segundos más, dejando el material seco lo más homogéneo posible.

- Se adiciona gradualmente el agua de amasado y se revuelve hasta tener una pasta homogénea. Se va midiendo el asentamiento del cono de la mezcla, hasta obtener la consistencia esperada.

- Se agrega la fibra, en caso de la confección de HCF y HMF, y se revuelve por sesenta segundos más.

- Se agrega el aditivo plastificante gradualmente a la pasta, mientras se observa la docilidad que va adquiriendo la pasta. Se va midiendo el cono cada vez que se agrega un poco de aditivo, hasta que se alcanza el valor deseado de 15 +/- 1 centímetro.

- Una vez alcanzado el cono deseado, se procede a medir la densidad del hormigón resultante, para lo que se utilizan cubos de arista 15 centímetros, que son llenados, enrasados y vibrados, y luego pesados.

- Se rellenan las probetas con la pasta. Esto se hace en dos capas, que se compactan con un pisón, y luego se vibran en una mesa vibradora por 30 segundos.

Los conos obtenidos para cada una de las coladas se muestran a continuación.

Tabla 12: Cono obtenido en confección de probetas

Hormigón	Asentamiento de cono (cm)	Densidad fresca (gr/ml)
HC	14,0	2,4
HM	14,0	2,4
HCF	14,0	2,4
HMF	15,0	2,5



Figura 7: Medición del cono

Una vez fabricadas las probetas de hormigón, para las cuatro series, éstas son almacenadas en ambientes de laboratorio, con humedad mayor al 50% y temperatura controlada de 23 ± 2 °C, hasta que son desmoldadas al día siguiente. Una vez desmoldadas, se guardan sumergidas en agua hasta que cumplen 60 días de curado. Transcurrido ese tiempo, las probetas son cargadas axialmente con una carga del veinte o cuarenta por ciento de su carga máxima de rotura, según corresponda. Luego son aserradas, para obtener discos de cincuenta milímetros de altura, que son extraídos de la parte central de los cilindros de hormigón, de tal manera de que los extremos de la probeta son descartados, con el fin de descartar el factor de segregación de áridos debido a fallas locales de vibrado.

En el siguiente esquema se aprecia el método de aserrado de las probetas. Se utilizan los dos discos centrales, y se desechan los extremos. El centro de las probetas es el que posee menos irregularidades, ya que no presenta signos de segregación de áridos ni burbujas de aire.

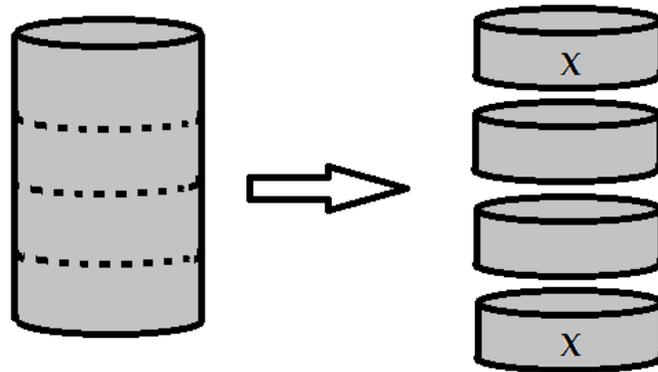


Figura 8: Disposición de aserrado de probetas

Luego, los discos son limpiados, marcados y almacenados en una cámara húmeda, con condiciones ambientales de humedad de un 90% y temperatura de 23 ± 2 °C, hasta que son usadas en los ensayos de permeabilidad a cloruros. Las probetas cúbicas, confeccionadas para determinar las resistencias a compresión de los hormigones, son almacenadas bajo agua hasta que se ensayan, a las edades de siete y veintiocho días.



Figura 9: Probeta cilíndrica, lista para ensayo

3.5.1. Ensayos a compresión probetas hormigón

De cada una de las coladas de hormigón, se tomaron cuatro muestras en probetas cúbicas de arista veinte centímetros, con el fin de determinar al comportamiento mecánico de los hormigones fabricados, y así verificar que las características obtenidas para cada hormigón se ajustaran a las esperadas al momento de hacerse la dosificación teórica.

De cada una de las series de ensayo, se ensayó una probeta a la edad de siete días y tres probetas a la edad de veintiocho días.

También se ensayaron tres probetas cilíndricas por colada, a la edad de veintiocho días, con el fin de obtener una caracterización más confiable del comportamiento de los hormigones al ser sometidos a cargas de compresión. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 13: Resistencia a compresión HC, probetas cúbicas de arista 15 cm

Edad [días]	Peso [kg]	Densidad [kg/m ³]	Carga [kgf]	Área [cm ²]	Resistencia [MPa]	Promedio [MPa]
7	8,07	2,39	69.340	225	30,22	38,40
28	8,07	2,39	83.106	225	36,22	
28	8,08	2,39	87.796	225	38,27	
28	8,17	2,42	93.405	225	40,71	

Tabla 14: Resistencia a compresión HCF, probetas cúbicas de arista 15 cm

Edad [días]	Peso [kg]	Densidad [kg/m ³]	Carga [kgf]	Área [cm ²]	Resistencia [MPa]	Promedio [MPa]
7	8	2,37	78.415	225	34,18	42,21
28	8	2,37	97.279	225	42,40	
28	7,99	2,37	96.260	225	41,96	
28	7,98	2,36	96.973	225	42,27	

Tabla 15: Resistencia a compresión HM, probetas cúbicas de arista 15 cm

Edad [días]	Peso [kg]	Densidad [kg/m ³]	Carga [kgf]	Área [cm ²]	Resistencia [MPa]	Promedio [MPa]
7	8,06	2,39	95.546	225	41,64	50,39
28	8,165	2,42	121.140	225	52,80	
28	8,11	2,40	113.289	225	49,38	
28	8,143	2,41	112.371	225	48,98	

Tabla 16: Resistencia a compresión HMF, probetas cúbicas de arista 15 cm

Edad [días]	Peso [kg]	Densidad [kg/m ³]	Carga [kgf]	Área [cm ²]	Resistencia [MPa]	Promedio [MPa]
7	8,098	2,37	101.766	225	44,36	44,36
28	8,1	2,40	134.600	225	58,67	58,25
28	8,12	2,41	133.989	225	58,40	
28	8,13	2,41	132.357	225	57,69	

Tabla 17: Resistencia a compresión HC, probetas cilíndricas

HC	Altura [h]	Diámetro [cm]	Esbeltez [h/d]	Resistencia a Compresión [kgf/cm ²]			Promedio c [MPa]
				a	b	c	
Carga [kgf]							
28.420	17,3	10,4	1,7	334,55	325,6	375,6	37,8
28.590	17,5	10,4	1,7	336,56	328,0	378,0	
28.840	17,2	10,4	1,7	339,50	330,2	380,2	

- (a) Resistencia de la probeta a la edad de ensayo, expresada como tensión de rotura.
 (b) Resistencia corregida por esbeltez, expresada en cilindro normal de diámetro 15 cm y altura 30 cm.
 (c) Resistencia transformada a cubo normal de arista 15 cm.

Tabla 18: Resistencia a compresión HCF, probetas cilíndricas

HCF	Altura [h]	Diámetro [cm]	Esbeltez [h/d]	Resistencia a Compresión [kgf/cm ²]			Promedio c [MPa]
				a	b	c	
Carga [kgf]							
31.860	18,2	10,4	1,8	375,05	367,5	417,5	41,5
31.400	18,7	10,4	1,8	369,64	363,5	413,5	
31.640	18,1	10,4	1,7	372,46	364,7	414,7	

- (a) Resistencia de la probeta a la edad de ensayo, expresada como tensión de rotura.
 (b) Resistencia corregida por esbeltez, expresada en cilindro normal de diámetro 15 cm y altura 30 cm.
 (c) Resistencia transformada a cubo normal de arista 15 cm.

Tabla 19: Resistencia a compresión HM, probetas cilíndricas

HM	Altura [h]	Diámetro [cm]	Esbeltez [h/d]	RESISTENCIA A COMPRESIÓN [kgf/cm ²]			Promedio c [MPa]
				a	b	c	
37160	18,6	10,4	1,8	437,44	429,9	479,9	48,5
38270	17,8	10,4	1,7	450,51	440,1	490,1	
37950	17,2	10,4	1,7	446,74	434,4	484,4	

- (a) Resistencia de la probeta a la edad de ensayo, expresada como tensión de rotura.
 (b) Resistencia corregida por esbeltez, expresada en cilindro normal de diámetro 15 cm y altura 30 cm.
 (c) Resistencia transformada a cubo normal de arista 15 cm.

Tabla 20: Resistencia a compresión HMF, probetas cilíndricas

HMF	Altura [h]	Diámetro [cm]	Esbeltez [h/d]	Resistencia a Compresión [kgf/cm ²]			Promedio c [MPa]
				a	b	c	
42.510	17,7	10,4	1,7	500,42	488,5	538,5	53,9
42.730	18,1	10,4	1,7	503,01	492,5	542,5	
42.120	17,9	10,4	1,7	495,83	484,7	534,7	

- (a) Resistencia de la probeta a la edad de ensayo, expresada como tensión de rotura.
 (b) Resistencia corregida por esbeltez, expresada en cilindro normal de diámetro 15 cm y altura 30 cm.
 (c) Resistencia transformada a cubo normal de arista 15 cm.

Se obtuvo que los valores de resistencia obtenidos al ensayar probetas cúbicas no difiere en más de un 5% con los valores al ensayar a compresión probetas cilíndricas.

Al no existir grandes diferencias, se utilizan los valores obtenidos en las probetas cúbicas para el cálculo de las cargas a aplicarse a las probetas de cada colada.

Tabla 21: Resistencia a compresión de los hormigones estudiados

Tipo de hormigón	Resistencia a compresión a 28 días (MPa)
HC	38,4
HM	50,4
HCF	42,2
HMF	58,3

Los resultados se grafican a continuación, considerándose los promedios de resistencia obtenidos a los 7 y 28 días.

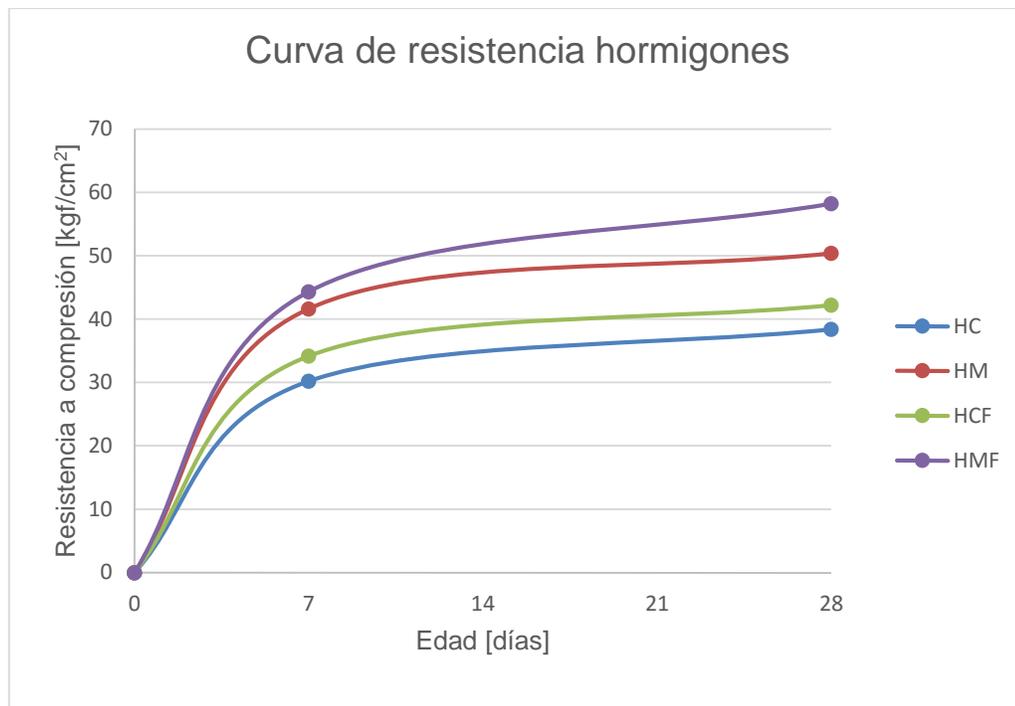


Figura 10: Curva de resistencia a compresión en hormigones confeccionados

De aquí se calcularon los valores de carga a los que se sometieron las probetas para posteriormente ser ensayadas.

Tabla 22: Cargas para preparación de probetas

Tipo de hormigón	20% carga máxima de rotura [MPa]	40% carga máxima de rotura [MPa]
HC	7,68	15,36
HM	10,08	20,16
HCF	8,44	16,88
HMF	11,66	23,32

Para que la carga de compresión fuese aplicada de manera homogénea, se verificó que las caras planas de los cilindros fueran paralelas. Para esto, se realizó un refrentado de las probetas.

3.6. Ensayo ASTM C1202

Este ensayo fue realizado por Karla Elorza, quien desarrolló un trabajo de forma paralela, y utilizando las mismas coladas de hormigón, con el fin de poder obtener resultados comparables para caracterizar de manera más confiable el comportamiento de los hormigones a utilizar. A continuación se coloca una referencia directa a su memoria y a las metodologías utilizadas en el desarrollo de su investigación.

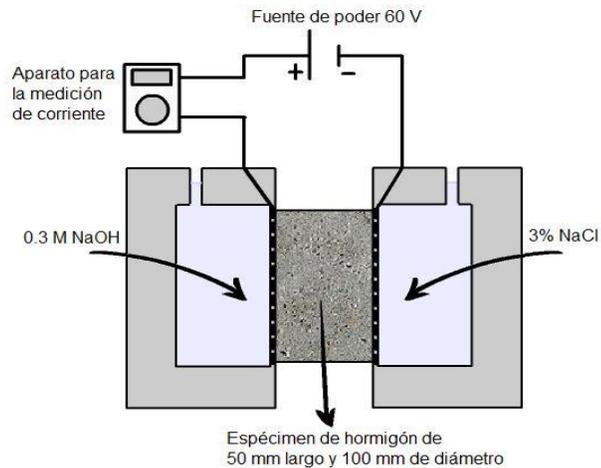


Figura 11: Esquema ensayo ASTM C 1012

3.6.1. Preparación para el ensayo de penetración de ion cloruro (ASTM C1202)

Los discos fueron retirados del lugar de curado, y cubiertos en el manto con resina epóxica SIKADUR -32 GEL, para asegurar que el flujo de la solución dentro de la probeta no aflore por el manto.

Las caras se rasparon con escobilla metálica y se sometieron a un proceso de vacío mediante cámara de secado, a una presión de 50 mm de Hg. Pasadas tres horas, se agregó agua destilada a la cámara de secado, cubriendo la totalidad de las probetas, continuando el vacío durante 1 hora.

Terminado este proceso, las probetas se mantuvieron en la misma agua durante 18±2 horas, y posteriormente fueron montadas en las celdas de carga, donde la unión entre celda y disco se selló con silicona.



Figura 12: Montaje experimental ASTM C 1202

3.6.2. Ensayo ASTM C1202

El ensayo consiste en medir durante 6 horas el paso de la corriente a través de la probeta, tomando medidas cada treinta minutos, controlando caída de voltaje y temperatura, velando por que la fuente de poder esté en el rango 60+-1 V.

Finalmente la cantidad de Coulombs que atraviesa el disco se obtiene mediante el área bajo la curva de la resistencia y la entrega del voltaje. El resultado de permeabilidad se obtiene de acuerdo a la cantidad de carga que circula por cada probeta durante el ensayo.

La determinación de la penetración al ión cloruro en el hormigón se realizó según los requerimientos del método estandarizado ASTM C1202, siguiendo al pie de la letra la metodología que ahí aparece. En la figura se muestra el esquema y equipos necesarios para saturar las probetas en vacío.

La saturación en vacío consiste en lo siguiente:

- Se sella el manto de los discos con resina epóxica, para evitar que las soluciones viajen a través del manto del disco. Se esperan 24 horas para la siguiente etapa.
- Se someten los discos a un vacío de 50 milímetros de mercurio durante tres horas, y luego, manteniendo la presión, se vierte agua destilada sobre la probeta y se deja en vacío una hora. Se deja en la misma agua las probetas durante 18+-2 horas y se pasa a la siguiente etapa.

Finalizado el proceso de saturación en vacío, se monta el disco en la celda de difusión y se sella con silicona la unión entre el disco y la celda. Se agrega a las celdas las soluciones iónicas, una solución al 3% de NaCl, y otra con 0.3N de NaOH.

Se conectan las terminales a la fuente de poder, se acciona el equipo (fuente de poder) y se registra temperatura y amperaje, asegurando que se mantenga una diferencia de potencial de 60 V, con variaciones menores a 0,1 V. Si la temperatura de las soluciones, durante el desarrollo del ensayo, supera los 95°C, el ensayo se detiene inmediatamente y se da por terminado. Se realizan las mediciones de voltaje, amperaje y temperatura cada 30 minutos y durante 6 horas.

La carga que pasa a través de la probeta se calcula con el método o regla de integración del trapecio como:

$$Q = 900 * (I_0 + 2 * I_{30} + \dots + 2 * I_{330} + I_{360})$$

Ecuación 3: Determinación carga total que circula a través de una probeta

Donde I_0 es la corriente obtenida al momento de conectar el diferencial de potencial e I_t es la corriente medida a los t minutos de conectado el diferencial. Con la carga registrada cada 30 minutos, se obtiene la carga total que circuló a través de la probeta durante el ensayo, y se clasifica el hormigón de acuerdo a su nivel de carga. A mayores niveles de carga, más permeable será el hormigón a la penetración de iones externos.

3.7. Ensayo Nordtest NT Build 492

Este procedimiento se utiliza para la determinación del coeficiente de migración de cloruros en hormigón a partir de experimentos de migración en estado no estacionario, por lo que los resultados no pueden ser directamente comparados con otros métodos que utilizan experimentos en estado estacionario.

Se procede de la siguiente manera:

Tres discos previamente cortados y preparados, de la misma colada, y con el mismo nivel de carga de compresión, se sacan de la cámara húmeda en que se almacenaban y se colocan en un desecador de vacío, dejando las caras planas en contacto con el aire. Se hace funcionar la bomba de vacío conectada al desecador, y se genera un vacío relativo de 1 a 5 kPa, que se mantiene por tres horas. Luego, con la bomba todavía funcionando, se agrega una solución de agua destilada saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y se mantiene el vacío por una hora más. Se deja entrar el aire a la cámara, y las probetas deben permanecer sumergidas durante 18 +/- 2 horas.

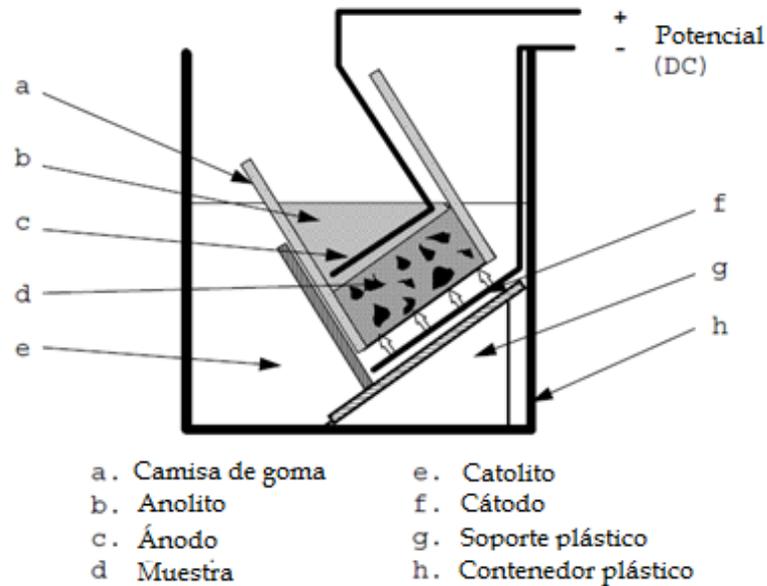


Figura 13: Esquema montaje probetas ensayo Nordtest NT Build 492



Figura 14: Montaje experimental ensayo Nordtest NT Build 492 (sin ánodos)

Se utiliza un contenedor armado siguiendo el esquema de la figura 1, donde se prepara una solución de agua con cloruro de sodio (NaCl) al 10%. Una vez pasado el tiempo de reposo, las probetas son sacadas de la solución saturada de Ca(OH)_2 y se les coloca una camisa de goma alrededor, que se sujeta con abrazaderas de acero inoxidable. Se sellan además las zonas de contacto goma-hormigón con silicona, para evitar que se produzcan filtraciones. Se depositan luego las probetas en el estanque con solución catódica, asegurándose que no entre solución al interior de la camisa de goma.

Luego se colocan los electrodos, uno dentro de la camisa, en contacto con la cara superior de la probeta, y otro por fuera de la camisa, bajo la probeta, a una distancia de uno a dos centímetros de su cara inferior. Una vez montadas las probetas, se procede a llenar la camisa de goma con una solución de 0,3 N NaOH, de tal manera que el extremo superior de cada disco quede cubierto por esta solución anódica, y el extremo inferior se mantenga en contacto con la solución catódica. El montaje queda como se indica en la ilustración 4.

Se realizan mediciones de la temperatura de ambas soluciones, y se conecta una fuente de poder a los electrodos, para generar un diferencial de potencial de 30 V DC entre los electrodos. Se mide la cantidad de corriente (mA) que circulan a través de las probetas, y se ajusta el voltaje de acuerdo a la corriente que está pasando.

Tabla 23: Corrección de voltaje de acuerdo a corriente inicial (NT Build 492)

Corriente inicial I_{30V} (con 30 V) (mA)	Voltaje aplicado U (Ajustado) (V)	Posible nueva corriente inicial I_0 (mA)	Duración del test t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 \leq I_0 < 10$	60	$10 \leq I_0 < 20$	48
$10 \leq I_0 < 15$	60	$20 \leq I_0 < 30$	24
$15 \leq I_0 < 20$	50	$25 \leq I_0 < 35$	24
$20 \leq I_0 < 30$	40	$25 \leq I_0 < 40$	24
$30 \leq I_0 < 40$	35	$35 \leq I_0 < 50$	24
$40 \leq I_0 < 60$	30	$40 \leq I_0 < 60$	24
$60 \leq I_0 < 90$	25	$50 \leq I_0 < 75$	24
$90 \leq I_0 < 120$	20	$60 \leq I_0 < 80$	24
$120 \leq I_0 < 180$	15	$60 \leq I_0 < 90$	24
$180 \leq I_0 < 360$	10	$60 \leq I_0 < 120$	24
$I_0 \geq 360$	10	$I_0 \geq 120$	6

Se deja el experimento funcionando por la cantidad de horas correspondientes a la corriente inicial aplicada, teniendo en cuenta que la temperatura de las soluciones debe mantenerse entre los 20 y 25 °C.

Una vez pasado el tiempo de duración del test, se mide la temperatura final de las soluciones catódicas y anódicas, además de la carga que está circulando por las probetas. Las probetas son sacadas del contenedor, se limpian y son partidas mediante hendimiento de los discos, utilizando una máquina de compresión en el laboratorio Control Cementos de IDIEM.

Se selecciona la mitad de disco que presente el corte más perpendicular las caras planas, y/o la que contenga menos singularidades, y se rocía con una solución 0,1 M de Nitrato de plata ($AgNO_3$). Esta solución reacciona con los cloruros presentes en el espécimen, formando un decantado color blanco.

Se deja reposar la probeta por unos 30 minutos, y luego se realizan mediciones del avance de los cloruros en la muestra, que se puede apreciar por el teñido de la muestra.

Las mediciones se realizan con un pie de metro, cada 1 cm de distancia, como se muestra en la figura.

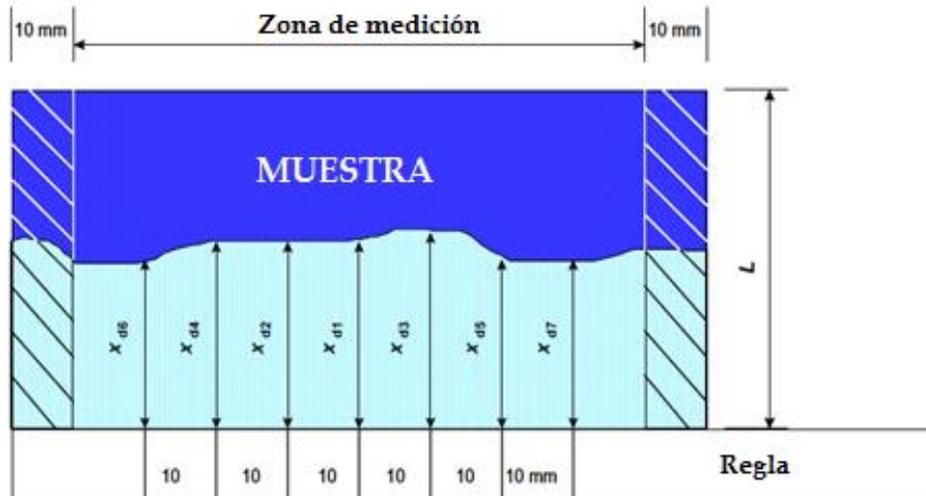


Figura 15: Esquema medición de penetración de cloruros

Los valores medidos en los puntos indicados son promediados, y junto con los valores de temperatura inicial y final de cada experimento, conforman los datos de entrada para el cálculo del coeficiente de migración de cloruros de cada hormigón, mediante la fórmula entregada por la Norma:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right)$$

Ecuación 4: Determinación de coeficiente de migración

Dónde:

- D_{nssm} : Coeficiente de migración de estado no estacionario, $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;
- U : Valor absoluto del voltaje aplicado, V;
- T : Valor promedio de la temperatura inicial y final en la solución anódica;
- L : Grosor de la probeta, mm;
- x_d : Valor de la penetración promedio, mm;
- t : duración del test, horas.

4. Análisis de Resultados

4.1. ASTM C 1202

Los resultados obtenidos al realizar las series de ensayos según la norma ASTM C1202, fueron proporcionados por Karla Elorza, quien realizó una investigación paralela a este trabajo, con probetas obtenidas de las mismas coladas de hormigón.

Durante el desarrollo de su investigación, obtuvo los siguientes resultados para dos series de ensayos para cada colada.

Tabla 24: Datos obtenidos según ensayo ASTM C 1202

Identificación probeta	Carga eléctrica [Coulombs]	Nivel de carga según ASTM C1202
HC-0%	1651	Baja
HC-20%	1921	Baja
HC-40%	2364	Moderada
HCF-0%	2079	Moderada
HCF-20%	2262	Moderada
HCF-40%	2663	Moderada
HM-0%	611	Muy baja
HM-20%	728	Muy baja
HM-40%	1071	Baja
HMF-0%	532	Muy baja
HMF-20%	587	Muy baja
HMF-40%	638	Muy baja

4.2. Nordtest NT Build 492

Se realizó el ensayo a tres de las coladas fabricadas, en las que se analizó principalmente los hormigones marítimos, y se hizo un ensayo al hormigón corriente con fibra, que fue confeccionado de acuerdo a una dosificación real usada en la construcción del puerto de San Antonio, Región de Valparaíso. Las temperaturas registradas en la solución catódica en cada ensayo se utilizan en el cálculo del coeficiente de migración. Esta información, junto a los valores promedios de penetración de cloruros en el hormigón, se muestran a continuación.



Figura 16: Probetas hendidas, rociadas con solución de nitrato de plata. Se debe esperar de 20 a 30 minutos para que se tinte la zona donde penetra el cloruro



Figura 17: Penetración de cloruros en probeta, visible después de rociarse con solución de nitrato de plata (blanco)

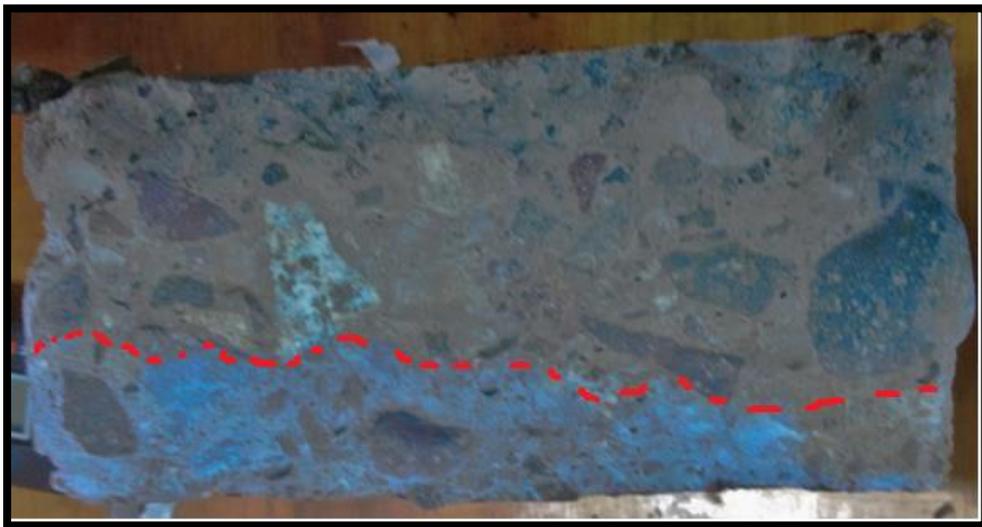


Figura 18: Imagen con contraste modificado, se observa y remarca la zona donde hubo penetración de cloruros

Tabla 25: Valores de penetración de cloruros en probetas HM-0%

HM-0%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	11,85	22,5
P2	12,38	22,5
P3	8,50	22,5
Promedio	10,91	

Tabla 26: Valores de penetración de cloruros en probetas HM-20%

HM-20%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	13,49	21
P2	13,57	21
P3	10,81	21
Promedio	12,62	

Tabla 27: Valores de penetración de cloruros en probetas HM-40%

HM-40%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	14,72	23
P2	14,36	23
P3	11,73	23
Promedio	13,60	

Tabla 28: Valores de penetración de cloruros en probetas HMF-0%

HMF-0%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	0,60	21,5
P2	1,24	21,5
P3	0,91	21,5
Promedio	0,92	

Tabla 29: Valores de penetración de cloruros en probetas HMF-20%

HMF-20%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	1,09	21,5
P2	1,31	21,5
P3	1,22	21,5
Promedio	1,21	

Tabla 30: Valores de penetración de cloruros en probetas HMF-40%

HMF-40%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	1,41	23
P2	1,99	23
P3	1,69	23
Promedio	1,70	

Tabla 31: Valores de penetración de cloruros en probetas HC-0%

HC-0%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	18,17	21,5
P2	18,13	21,5
P3	18,78	21,5
Promedio	18,36	

Tabla 32: Valores de penetración de cloruros en probetas HC-20%

HC-20%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	21,34	21,5
P2	21,71	21,5
P3	20,25	21,5
Promedio	21,10	

Tabla 33: Valores de penetración de cloruros en probetas HC-40%

HC-40%		
Probeta	Xprom (mm)	Tprom (°C)
P1	24,58	22,5
P2	25,43	22,5
P3	24,22	22,5
Promedio	24,74	

Una vez procesados los datos obtenidos, se calcula el coeficiente de migración para cada hormigón mediante el uso de la ecuación 4, obteniéndose los siguientes valores para el coeficiente de migración.

Tabla 34: Coeficientes de migración de hormigones estudiados

Hormigón	Coeficiente de migración D_{nssm} [$\times 10^{-12}$ m ² /s]
HCF-0%	6,975
HCF-20%	8,092
HCF-40%	9,651
HM-0%	3,470
HM-20%	3,993
HM-40%	4,442
HMF-0%	0,091
HMF-20%	0,150
HMF-40%	0,271

El caso más desfavorable, como era esperable, se observa en el hormigón HCF, que además de poseer una relación agua/cemento mayor que el hormigón HM, no incluye microsílíce.

Además, en todas las muestras se observa una relación entre el nivel de carga y el coeficiente de migración obtenido. Mientras más intensa sea la fisuración del hormigón, mayor resulta su coeficiente de migración de cloruros.

Para el hormigón marítimo, que contiene aditivo en base a microsílíce, se tiene que al agregar fibra, su desempeño ante la penetración de cloruros presenta una gran mejora, al contrario que el caso del hormigón corriente, que aumenta significativamente su permeabilidad. Esto se aprecia de igual manera en los resultados del ensayo ASTM. Este resultado no es lo que corresponde según lo esperado, por lo que será analizado.

A continuación se muestra en los gráficos la totalidad de las probetas ensayadas.

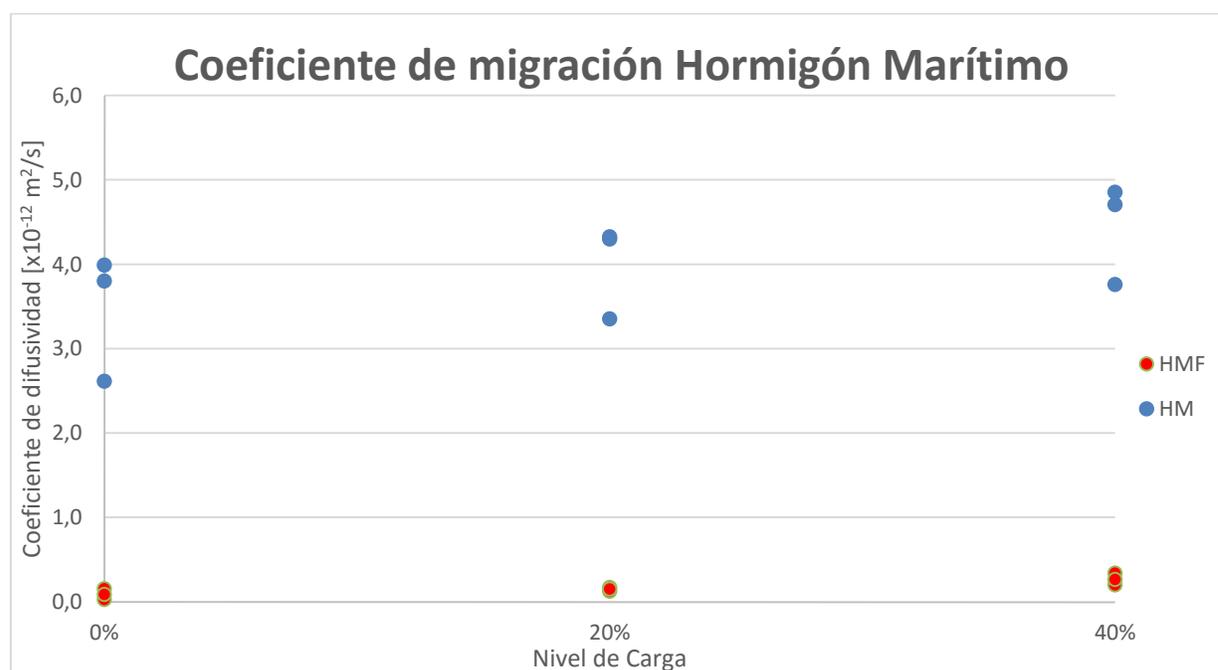


Figura 19: Coeficiente de migración Hormigones marítimos

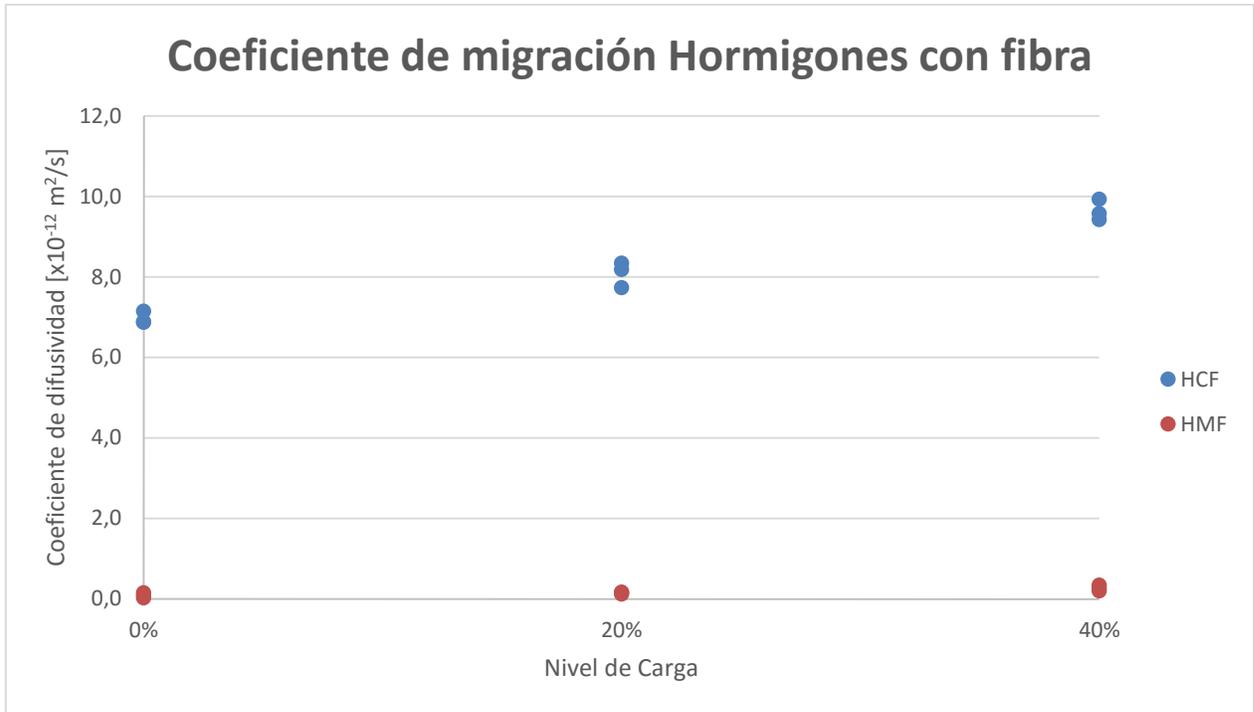


Figura 20: Coeficiente de migración hormigones con fibra

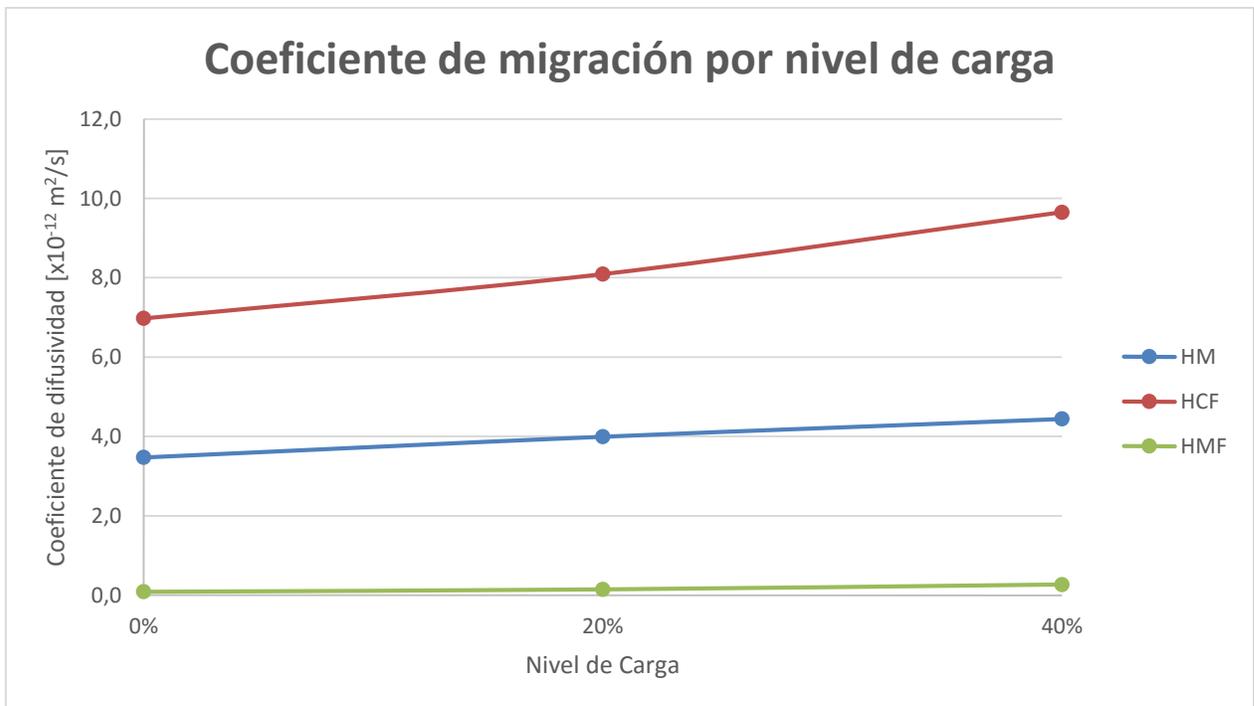


Figura 21: Coeficiente de migración de hormigones por nivel de carga

Se observa una amplia diferencia entre los valores del coeficiente de migración de cloruros entre los hormigones marítimos y convencionales.

Además, en el caso de los hormigones marítimos, la utilización de fibra, en conjunto con microsílíce, provoca una reducción en la permeabilidad a cloruros de manera notable, hasta un factor de 20 en algunas probetas.

Por otro lado, si consideramos el grado de fisuración de los hormigones, todas las muestras siguen el mismo patrón, en que la permeabilidad de un hormigón va estrechamente ligado con el grado de fisuración que posea.

4.3. Comparación ASTM C 1202 versus Nordtest NT Build 492

Comparando los valores obtenidos en los ensayos, se puede establecer una relación entre los resultados obtenidos, y darle un valor más cuantitativo a los resultados del ensayo ASTM.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para ambos ensayos, considerando las tres coladas ensayados según la Norma Nordtest NT Build 492.

Tabla 35: Resultados de ensayos Nordtest y ASTM

Nordtest NT Build 492		ASTM C 1202	
Hormigón	Coficiente de Migración	Carga [Coulombs]	Permeabilidad
HCF-0%	6,975	2491	Moderada
HCF-20%	8,092	2711	Moderada
HCF-40%	9,651	3192	Moderada
HM-0%	3,470	715	Muy baja
HM-20%	3,993	873	Muy baja
HM-40%	4,442	1284	Baja
HMF-0%	0,091	637	Muy baja
HMF-20%	0,150	704	Muy baja
HMF-40%	0,271	765	Muy baja

Se construye un gráfico a fin de comparar los datos obtenidos y poder visualizar si existe alguna correlación entre los valores obtenidos para el coeficiente de migración obtenido al realizar el ensayo noruego, y el índice de permeabilidad entregado según los ensayos ASTM.

Se comparan los valores del coeficiente de migración con los obtenidos por la norma ASTM, y se calcula una línea de tendencia que permita representar una relación numérica entre los resultados obtenidos.

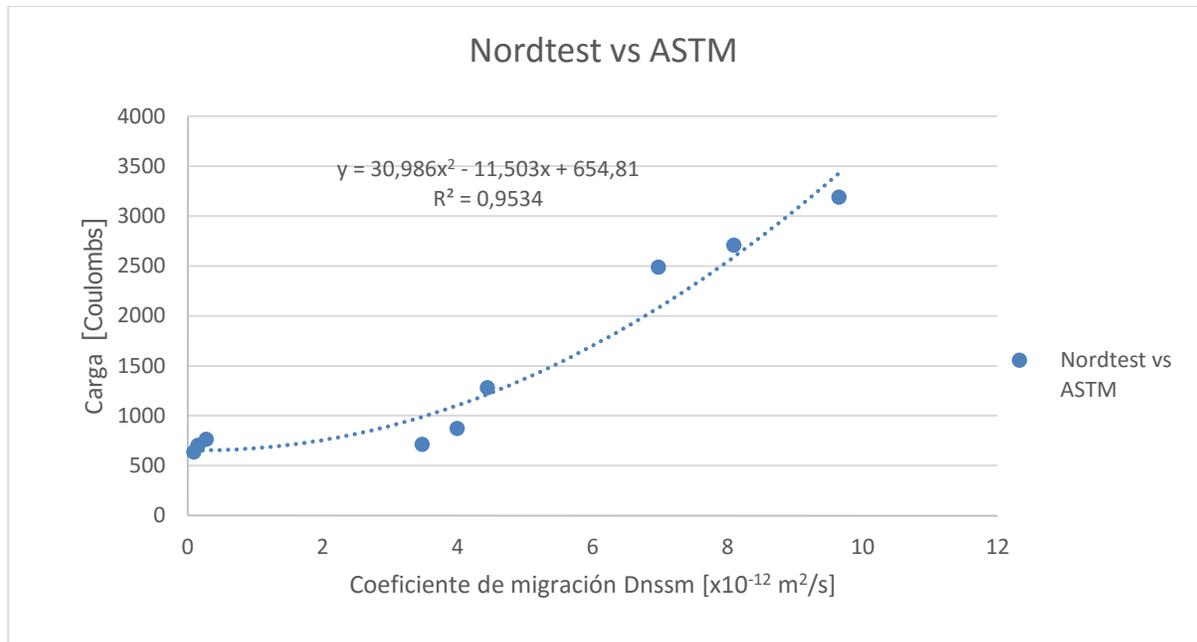


Figura 22: Comparación de valores de ensayos Nordtest y ASTM

Esto representa una forma de comparar ambos métodos, pero es necesario realizar un mayor número de ensayos para llegar a una relación más confiable, ya que se obtuvo un muestreo con muchos valores intermedios faltantes.

Se establece una relación entre las mismas coladas, dándosele un rango de valores de un posible coeficiente de migración de cloruros a un valor cualitativo. Para esto, se utiliza la relación extraída del análisis de los gráficos.

Este método presenta problemas de precisión, principalmente en los valores extremos, debido a la poca cantidad de datos utilizados para el cálculo de las relaciones numéricas entre resultados, pero se puede extraer una relación aproximada acerca de cómo se comparan los datos obtenidos en ambos experimentos.

Los resultados de esta comparación se detallan a continuación.

Tabla 36: Correlación de resultados obtenidos bajo ambas normas

ASTM	NORDTEST
Permeabilidad al ión cloruro	D_{nssm} (x10⁻¹² m²/s)
Muy Baja	entre 0 y 3.5
Baja	entre 3.5 y 6.75
Moderada	entre 6.75 y 10.5

Al trabajar con hormigones hechos con cemento puzolánico, que mejora el desempeño de los hormigones en cuanto a sus resistencia a la penetración de cloruros, el estudio no presenta muestras que posean una alta permeabilidad a este ion, sino que se mueve en un rango de permeabilidad a cloruros de moderada a baja. No se obtuvieron resultados que permitan calificar el desempeño de los métodos utilizados con hormigones altamente permeables.

Para aumentar el rango de esta comparación, se recomienda repetir la experiencia, usando también hormigones hechos a base de cemento portland puro, y/o cementos resistentes al ataque de sulfatos. De esta forma, se pueden obtener datos de hormigones, que de acuerdo a la teoría, poseen una alta tasa de permeabilidad a cloruros, y se puede comparar la efectividad de los métodos de ensayo utilizados para muestras en todos los rangos de permeabilidad.

5. Discusión y Conclusiones.

5.1. Discusión de Resultados

En el desarrollo de los ensayos se presentaron problemas que influyeron en los valores finales obtenidos en los ensayos. Estos problemas corresponden principalmente a diferencias entre los materiales recomendados para la elaboración de los ensayos, y los utilizados en las experiencias prácticas, a fallas en el almacenaje y marcaje de probetas, o a errores generados por la modificación de las variables que rodeaban cada ensayo.

Durante la confección de las primeras coladas, se produjo un error en el marcaje de las probetas, mezclándose probetas HC con HM. Este error generó que los dos primeros ensayos tuvieran errores debido a que se utilizaron probetas con diferentes características en un mismo ensayo. Debido a esto, se tuvo que eliminar los resultados de las probetas HC obtenidos mediante el ensayo Nordtest NT Build 492, y no se pudiera hacer el análisis de este hormigón en el tratamiento final de los datos.

Además, las condiciones del laboratorio en que se confeccionaron los hormigones no fueron similares en la construcción de todas las coladas, por lo que se introdujeron factores tales como la temperatura y humedad en la confección de coladas sucesivas. Esto genera que la comparación de los resultados finales pierda confiabilidad, y que sea difícil repetir el experimento en las mismas condiciones.

Se debe considerar, para el desarrollo de trabajos futuros, la elaboración de un mayor volumen de hormigón para cada colada diferente, para así contar con un mayor número de probetas fabricadas bajo las mismas condiciones ambientales, y que permitan realizar un mayor número de repeticiones para cada serie de ensayo.

La utilización de implementos diferentes a los recomendados generó pérdidas de probetas, debido a errores de montaje de los experimentos. No se contaba con camisas de silicona para cubrir las probetas en los ensayos, sino que se utilizaron mangas de goma. Este material es más rígido que la silicona, lo que generó que se produjera un intercambio de fluidos entre la solución catódica y anódica en los primeros ensayos. Esto se solucionó en ensayos posteriores mediante el sellado con silicona líquida del interfaz probeta/camisa, pero se provocó que el primer ensayo de hormigón HC tuviera que ser anulado. Esto, sumado a la falla de marcaje en los primeros experimentos, provocó que se perdiera una de las coladas inicialmente consideradas en el análisis.

Los valores del coeficiente de migración obtenidos en las probetas HMF se escaparon de todas las expectativas. Se esperaba que la fibra provocara un aumento en el coeficiente de migración con respecto al hormigón HM, ya que la adición de fibras en la colada afecta negativamente la estructura de poros del hormigón, abriéndose capilares por los que circula con mayor facilidad una solución cargada de iones. Esto

se puede apreciar claramente en los resultados obtenidos para hormigones HC y HCF, en que se detectó un gran aumento en la permeabilidad al agregarse fibras.

Debido a que el mismo fenómeno se detectó en los ensayos ASTM, se puede afirmar que no corresponde a un error puntual de ensayo, sino que otro factor incide en este comportamiento inesperado.

Este factor corresponde a la adición de microsílíce, que provoca que las alteraciones generadas por las macrofibras de polipropileno en la estructura interna del hormigón se “sellan” de alguna manera, y no se permita la circulación de agua ni de iones. Es recomendable que esta experiencia se repita considerando una mayor cantidad de probetas y ensayos, ya que de comprobarse este comportamiento, podemos afirmar que se encontró una dosificación de hormigón idónea para la construcción de estructuras en ambientes marítimos agresivos, en que se logró obtener valores muy bajos de penetrabilidad de cloruros. La variación de las cantidades de microsílíce y fibra dosificadas debe ser variada, hasta encontrar el mejor comportamiento ante ambientes adversos. Se recomienda también analizar el comportamiento de estas adiciones en contacto con otros cementos y áridos, con el fin de comprobar si el comportamiento observado en esta investigación se replica al cambiar un mayor número de variables en las dosificaciones del hormigón a estudiarse.

5.2. Conclusiones

Se observó que la utilización de macrofibras de polipropileno en la confección de un hormigón, le otorga una mejora de desempeño en cuanto a su resistencia mecánica y a su resistencia a la fisuración en las etapas tempranas de fraguado del hormigón armado, pero que genera un aumento en su permeabilidad a cloruros, debido a que se agregan capilares y ductos que favorecen el transporte de soluciones a través del hormigón.

Si bien el control de fisuras que otorga la fibra es recomendable para evitar la exposición prematura de la armadura en una estructura de hormigón armado, los efectos a nivel microscópico, en especial en el área de contacto entre la pasta de hormigón y la fibra, facilitan el transporte iónico al generarse canales capilares que facilitan este proceso, y generan una mayor permeabilidad a agentes externos en los hormigones convencionales.

Los resultados obtenidos en el desarrollo de los ensayos se ajustan a lo esperado de acuerdo a la teoría. La adición de fibra genera un aumento de permeabilidad al ser colocada en hormigones convencionales, sin embargo, si la dosificación a la que se agrega fibras posee microsílíce, se obtiene una mejora importante con respecto a su permeabilidad y a los valores de su coeficiente de migración, resultando en un hormigón de muy buenas prestaciones bajo ambientes agresivos. Sin embargo, la mejor resistencia a la migración de Cl^- estaría asociada en mayor medida a la reducción de la relación A/C obtenida en los hormigones con fibra, debido a la incorporación de una mayor cantidad de aditivo superplastificante, requerido para mejorar la docilidad de la colada de HMF.

Es muy probable que la interacción entre macrofibras y microsílíce, a nivel de estructura de poros del hormigón, provoque que los espacios se rellenen y se forme una pasta muy densa que no permita la circulación de flúidos ni el transporte de iones de cualquier tipo. Esto debido al tamaño microscópico de los cristales de microsílíce, que penetran en las discontinuidades que provoca la macrofibra al interior de la estructura interna del hormigón, y que reaccionan con la cal liberada durante la reacción del cemento, relleno los canales que se forman en la zona de contacto de ambos materiales.

Si se requiere la utilización de fibras en una estructura de hormigón armado, se debe considerar la agregación de microsílíce en su dosificación, además de considerar una disminución en su relación A/C, ya que se observó una mejora notable del desempeño en cuanto a la permeabilidad a cloruros en hormigones que mezclan ambas adiciones, no así como en los hormigones que sólo utilizan macrofibras, en que se observó una caída en su resistencia a la penetración de cloruros, lo que se traduce en un bajo desempeño ante ambientes marinos agresivos.

En cuanto al análisis de hormigones fisurados, se concluye que el método Nordtest NT Build 492 no es idóneo para determinar si un hormigón se encuentra fisurado o no al momento de ensayarse. Los valores obtenidos para el coeficiente de migración no varían significativamente en una serie de hormigones de la misma colada, a pesar de que algunas probetas hayan presentado fisuras provocadas por cargas de compresión iguales al 20 y 40% de su capacidad máxima de rotura, y otras no se hayan cargado. Esto se explica por la metodología de ensayo utilizada, en que el coeficiente de migración se determina mediante medidas discretas del avance del cloruro a través de la probeta. Si se produjo una penetración mayor a lo largo de una fisura, esto no se ve reflejado al momento del cálculo del coeficiente de migración, ya que no se realizan mediciones en puntos singulares, como lo es una fisura. Se recomienda analizar las probetas ensayadas y buscar alguna fisura, romper la probeta nuevamente a lo largo de ese plano de falla, y realizar las mediciones de penetración de cloruros en dicha superficie. De esta forma, se puede analizar el avance del ión cloruro a lo largo de las fisuras del hormigón.

Los resultados obtenidos, para hormigones pertenecientes a las mismas coladas, fueron similares para las dos metodologías empleadas, por lo que se pudo generar una correlación entre los resultados de ambos experimentos, con un rango de error aceptable para una experiencia en que se trabajó con muestras reducidas de hormigón. Esta correlación se mueve en un rango de valores muy pequeño, con información de hormigones de permeabilidad moderada a baja, por lo que se recomienda realizar nuevos experimentos utilizando otro tipo de hormigones.

Si se sigue una metodología similar, en que se usen ambos ensayos en hormigones similares, pero con un universo de muestras mayor, es posible llegar a una relación mucho más precisa entre los índices de permeabilidad del hormigón, obtenidos mediante la metodología ASTM, y el coeficiente de migración de dicho hormigón, obtenido mediante la metodología Nordtest. Esto permitiría caracterizar de manera mucho más precisa una muestra de hormigón, con la posibilidad de hacerlo con cualquiera de las dos metodologías.

6. Bibliografía

- “Guide for the Use of Silica Fume in Concrete”, Reported by ACI Committee 234, ACI 234R-96, 1996.
- “*Nordtest Method: Accelerated Chloride Penetration into Hardened Concrete*, Nordtest, Espoo, Finland, Proj. 1388-98, 1999.
- “*Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration*”, (T259-80), American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., 1980.
- “*Standard Test Method for Electrical Indication of Chloride’s Ability to Resist Chloride*” (ASTM C1202-94) 1994 Annual Book of ASTM Standards V 04.02, ASTM, Philadelphia, pg. 620-5, 1994.
- **Andrade, C. and Sanjuan, M.A.** “Experimental Procedure for the Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Migration Tests”, *Advances in Cement Research*, Vol. 6, No. 23, pg. 127-134, 1994.
- **Cao, Y., and Detwiler, R.J.** “Backscatter Electron Imaging of Cement Pastes Cured at Elevated Temperatures”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 627-638, 1995.
- **Detwiler, R.J., Kjellsen, K.O., and Gjorv, O.E.** “Resistance to Chloride Intrusion of Concrete Cured at Different Temperatures”, *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, pp. 19-24, 1991.
- **Elorza, Karla.** “Estudio del efecto de la incorporación de macrofibras de polipropileno en la resistencia a la penetración de ión cloruro en hormigones marítimos”, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Física y Matemáticas, Dpartamento de Ingeniería Civil, Santiago, Chile, 2015.
- **Hasan Yildirim, Tolga Ilica, Ozkan Sengul.** “Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration”, *Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Istanbul, Turkey, at Construction and Building Materials Magazine* 25, 2011.

- **K.D. Stanish, R.D. Hooton and M.D.A. Thomas.** “Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review”, University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto, Canada, 1997.
- **Lea, F.M.** “The Chemistry of Cement and Concrete”, Edward Arnold, London, 1970.
- **Odd E. Gjrv.** “Durability design and quality assurance of major concrete infrastructure”, Norwegian University of Science and Technology - NTNU, Trondheim, Norway, 2013.
- **Odd E. Gjrv.** “*Durability design of concrete structures in severe environments*”, Taylor & Francis, New York, USA, 2009.
- **Thomas, M.D.A., Pantazopoulou, S.J., and Martin-Perez, B.** “Service Life Modelling of Reinforced Concrete Structures Exposed to Chlorides-A Literature Review”, prepared for the Ministry of Transportation, Ontario, at the University of Toronto, 1995.

7. Anexo

7.1. Mediciones ensayo Nordtest NT Build 492

Tabla 37: Detalle ensayo HM-0%

HM-0%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	10,96	10,77	8,63	15,33	7,32	18,1	-	11,85
P2	13,02	13,79	10,91	14,47	9,7	12,39	-	12,38
P3	8,01	6,92	7,68	8,49	8,05	10,49	9,87	8,50

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	3,803
P2	3,993
P3	2,614
Promedio	3,470

Tabla 38: Detalle ensayo HM-20%

HM-20%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	14,82	-	17,25	11,39	13,42	10,58	-	13,49
P2	12,76	14,45	9,84	17,94	11,51	12,94	15,57	13,57
P3	11,27	10,63	10,33	10,94	10,4	13,57	8,5	10,81

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	4,299
P2	4,327
P3	3,353
Promedio	3,993

Tabla 39: Detalle ensayo HM-40%

HM-40%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	15,93	14,68	15,49	14,26	17,02	10,92	-	14,72
P2	11,32	10,26	20,23	12,08	15,88	8,96	21,8	14,36
P3	13,17	10,59	12,18	11,46	12,31	12,29	10,11	11,73

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	4,854
P2	4,708
P3	3,763
Promedio	4,442

Tabla 40: Detalle ensayo HMF-0%

HMF-0%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	0	0,55	1,11	0,84	0,45	1,22	0	0,60
P2	0,41	0,22	-	1,02	1,52	4,27	0	1,24
P3	0,38	0,17	1,05	1,31	1,18	2,04	0,26	0,91

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	0,030
P2	0,159
P3	0,090
Promedio	0,093

Tabla 41: Detalle ensayo HMF-20%

HMF-20%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	1,18	0,74	1,5	1,09	0,92	1,16	1,06	1,09
P2	0	1,43	1,24	0,93	1,95	1,28	2,35	1,31
P3	1,04	0,87	1,53	0,95	1,48	1,03	1,66	1,22

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	0,111
P2	0,150
P3	0,134
Promedio	0,132

Tabla 42: Detalle ensayo HMF-40%

HMF-40%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	2,05	1,35	1,46	2,62	0	1,44	0,97	1,41
P2	2,35	1,3	2,14	2,38	2,5	1,3	1,96	1,99
P3	1,98	1,46	1,71	2,24	1,54	1,51	1,38	1,69

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	0,166
P2	0,276
P3	0,218
Promedio	0,220

Tabla 43: Detalle ensayo HCF-0%

HCF-0%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	18,51	23,14	14,93	19,68	13,35	23,02	14,53	18,17
P2	15,24	21,56	14,93	21,17	13,35	24,7	15,94	18,13
P3	16,57	26,37	14,93	22,44	13,35	25,19	12,63	18,78

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	6,895
P2	6,879
P3	7,151
Promedio	6,975

Tabla 44: Detalle ensayo HCF-20%

HCF-20%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	18,4	18,19	22,2	16,99	31,28	19,83	22,49	21,34
P2	17,8	18,52	25,71	17,06	29,57	23,47	19,82	21,71
P3	16,94	15,43	22,2	14,51	31,28	18,87	22,49	20,25

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	8,192
P2	8,345
P3	7,738
Promedio	8,092

Tabla 45: Detalle ensayo HCF-40%

HCF-40%								
	Penetración de cloruros [mm]							
Probeta	Xd1	Xd2	Xd3	Xd4	Xd5	Xd6	Xd7	Xprom
P1	23,57	19,96	23,31	25,01	22,96	25,78	31,45	24,58
P2	17,26	18,47	26,32	28,34	27,93	29,1	30,59	25,43
P3	25,2	20,64	29,24	28,06	23,16	22,4	20,85	24,22

Probeta	Dnssm (x 10-12 m2/s)
P1	9,581
P2	9,938
P3	9,432
Promedio	9,651

7.2. Fotos ensayos Nordtest NT Build 492



Figura 23: Zona reacción catódica. Se observa burbujas provocadas por reacción electroquímica.



Figura 24: Zona de reacción catódica, después del ensayo. Se observa acumulación de partículas sobre probeta y electrodo

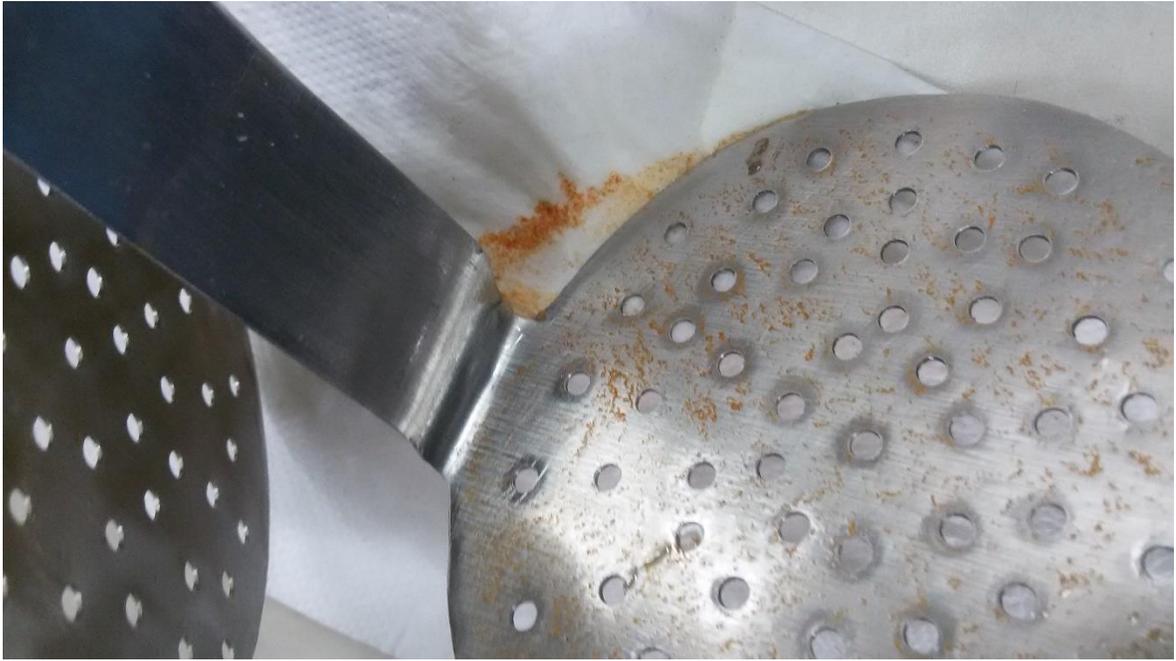


Figura 25: Acumulación de partículas sobre electrodo

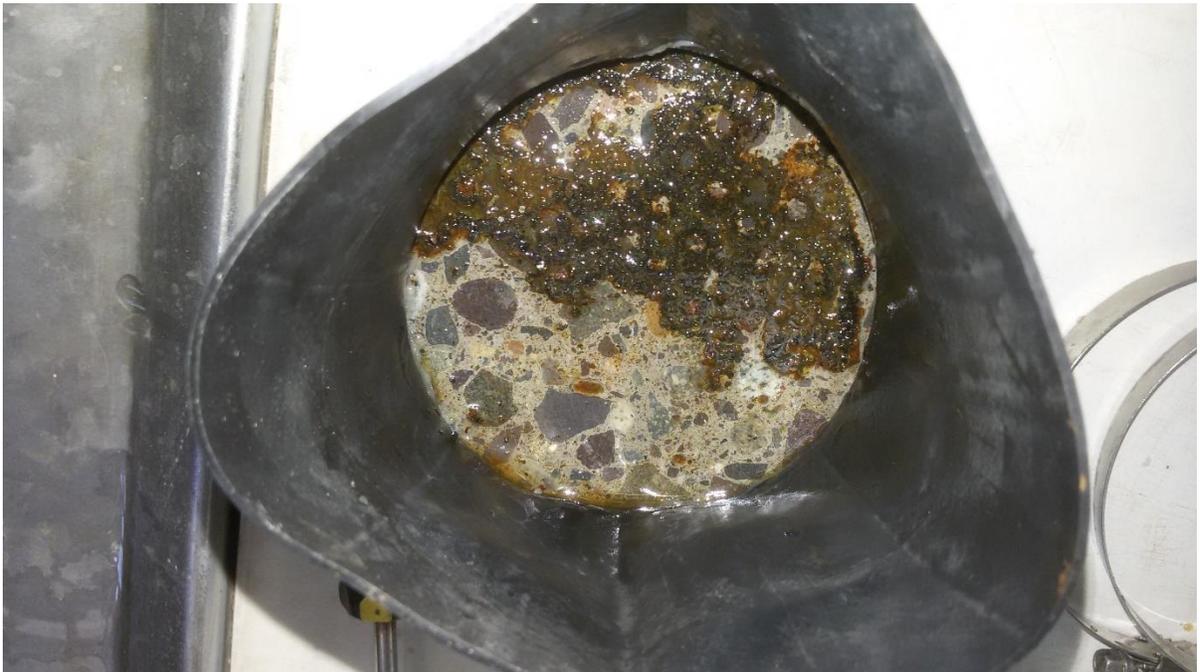


Figura 26: Acumulación de partículas sobre probeta de hormigón una vez finalizado el ensayo

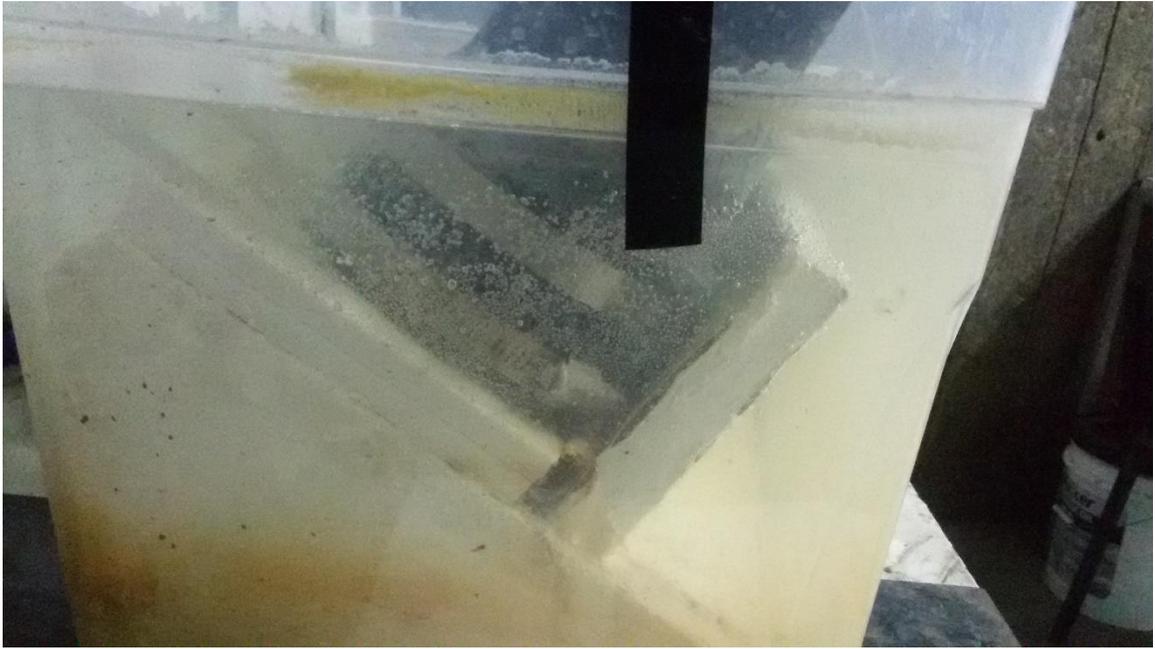


Figura 27: Soporte inclinado para probetas. Evita acumulación de burbujas de aire en zona de interfaz probeta-ánodo

7.3. Mediciones Ensayo ASTM C 1012

Tabla 46 Ensayo Probeta HC 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
10:45	1	1,5	0,06	21,2
11:15	2	1,7	0,068	22,4
11:45	3	1,8	0,072	23,3
12:15	4	1,9	0,076	24,5
12:45	5	2,1	0,084	26,6
13:15	6	2,2	0,088	26,8
13:45	7	2,3	0,092	27,6
14:15	8	2,4	0,096	29
14:45	9	2,5	0,1	29,8
15:15	10	2,6	0,104	30,4
15:45	11	2,7	0,108	30,9
16:15	12	2,8	0,112	32,3
16:45	13	2,9	0,116	32,6
Q total [Coulombs]		1.958,4		
Q corregida [Coulombs]		1.634		

Tabla 47 Ensayo probeta HC 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1,8	0,072	23,1
14:00	2	2,1	0,084	23,2
14:30	3	2,2	0,088	23,5
15:00	4	2,2	0,088	25,1
15:30	5	2,3	0,092	27,2
16:00	6	2,5	0,1	31,1
16:30	7	2,6	0,104	32,7
17:00	8	2,6	0,104	33,5
17:30	9	2,8	0,112	34,3
18:00	10	2,9	0,116	35,1
18:30	11	3,1	0,124	36,6
19:00	12	3,2	0,128	38
19:30	13	3,3	0,132	38,8
Q total [Coulombs]		2.235,6		
Q corregida [Coulombs]		1.865		

Tabla 48 Ensayo probeta HC 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	2,1	0,084	23,1
14:00	2	2,4	0,096	23,2
14:30	3	2,4	0,096	23,5
15:00	4	2,5	0,1	25,1
15:30	5	2,7	0,108	27,2
16:00	6	2,9	0,116	31,1
16:30	7	3	0,12	32,7
17:00	8	3	0,12	33,5
17:30	9	3,1	0,124	34,3
18:00	10	3,2	0,128	35,1
18:30	11	3,3	0,132	36,6
19:00	12	3,4	0,136	38
19:30	13	3,4	0,136	38,8
Q total [Coulombs]		2.494,8		
Q corregida [Coulombs]		2.082		

Tabla 49 Ensayo probeta HC 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1,6	0,064	23,1
14:00	2	1,7	0,068	23,2
14:30	3	1,8	0,072	23,5
15:00	4	2	0,08	25,1
15:30	5	2	0,08	27,1
16:00	6	2,3	0,092	29
16:30	7	2,3	0,092	31,1
17:00	8	2,5	0,1	32,5
17:30	9	2,6	0,104	33
18:00	10	2,7	0,108	33,6
18:30	11	2,8	0,112	34,6
19:00	12	2,8	0,112	35,7
19:30	13	2,9	0,116	37
Q total [Coulombs]		1.998		
Q corregida [Coulombs]		1.667		

Tabla 50 Ensayo probeta HC 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1,8	0,072	23,1
14:00	2	1,9	0,076	23,2
14:30	3	2	0,08	23,5
15:00	4	2,2	0,088	25,1
15:30	5	2,3	0,092	27,2
16:00	6	2,7	0,108	31,1
16:30	7	2,8	0,112	32,7
17:00	8	2,9	0,116	33,5
17:30	9	3,2	0,128	34,3
18:00	10	3,2	0,128	35,1
18:30	11	3,4	0,136	36,6
19:00	12	3,6	0,144	38
19:30	13	3,6	0,144	38,8
Q total [Coulombs]		2.368,8		
Q corregida [Coulombs]		1.977		

Tabla 51 Ensayo probeta HC 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
10:45	1	2,4	0,096	23,1
11:15	2	2,8	0,112	23,2
11:45	3	3,1	0,124	23,5
12:15	4	3,2	0,128	25,1
12:45	5	3,4	0,136	27,2
13:15	6	3,5	0,14	31,1
13:45	7	3,7	0,148	32,7
14:15	8	3,9	0,156	33,5
14:45	9	4	0,16	34,3
15:15	10	4,2	0,168	35,1
15:45	11	4,3	0,172	36,6
16:15	12	4,5	0,18	38
16:45	13	4,5	0,18	38,8
Q total [Coulombs]		3.171,6		
Q corregida [Coulombs]		2.646		

Tabla 52 Ensayo Probeta HM 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mV	Lectura A	Temperatura °C
10:45	1	0,7	0,028	23,2
11:15	2	0,7	0,028	23,6
11:45	3	0,8	0,032	23,9
12:15	4	0,8	0,032	24,4
12:45	5	0,8	0,032	24,8
13:15	6	0,8	0,032	24,9
13:45	7	0,8	0,032	25,4
14:15	8	0,8	0,032	25,5
14:45	9	0,8	0,032	25,6
15:15	10	0,8	0,032	25,6
15:45	11	0,8	0,032	25,7
16:15	12	0,9	0,036	26,1
16:45	13	0,9	0,036	26,3
Q total [Coulombs]		691,2		
Q corregida [Coulombs]		577		

Tabla 53 Ensayo probeta HM 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mV	Lectura A	Temperatura °C
13:30	1	0,8	0,032	21
14:00	2	0,8	0,032	21,1
14:30	3	0,9	0,036	21,9
15:00	4	0,9	0,036	22,2
15:30	5	1	0,04	23,1
16:00	6	1	0,04	23,8
16:30	7	1	0,04	24,3
17:00	8	1,1	0,044	24,8
17:30	9	1,1	0,044	25,8
18:00	10	1,1	0,044	26,3
18:30	11	1,1	0,044	26,9
19:00	12	1,1	0,044	27,1
19:30	13	1,2	0,048	27,8
Q total [Coulombs]		871,2		
Q corregida [Coulombs]		727		

Tabla 54 Ensayo probeta HM 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1,3	0,052	22,6
14:00	2	1,4	0,056	24
14:30	3	1,5	0,06	25
15:00	4	1,5	0,06	26
15:30	5	1,6	0,064	27
16:00	6	1,7	0,068	28
16:30	7	1,7	0,068	29
17:00	8	1,8	0,072	30
17:30	9	1,9	0,076	31
18:00	10	1,9	0,076	31
18:30	11	1,9	0,076	33
19:00	12	2	0,08	33
19:30	13	2	0,08	34
Q total [Coulombs]		1.479,6		
Q corregida [Coulombs]		1.235		

Tabla 55 Ensayo probeta HM 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
10:45	1	0,7	0,028	24,3
11:15	2	0,8	0,032	24,7
11:45	3	0,9	0,036	25,4
12:15	4	0,9	0,036	25,7
12:45	5	0,9	0,036	26,1
13:15	6	0,9	0,036	26,2
13:45	7	0,9	0,036	26,5
14:15	8	0,9	0,036	26,6
14:45	9	0,9	0,036	26,7
15:15	10	0,9	0,036	27,1
15:45	11	0,9	0,036	27,2
16:15	12	1	0,04	27,3
16:45	13	1	0,04	27,5
Q total [Coulombs]		774		
Q corregida [Coulombs]		646		

Tabla 56 Ensayo probeta HM 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,8	0,032	20,9
14:00	2	0,9	0,036	21,1
14:30	3	1	0,04	21,7
15:00	4	1	0,04	22,5
15:30	5	1	0,04	23,1
16:00	6	1	0,04	23,6
16:30	7	1	0,04	24,3
17:00	8	1	0,04	24,8
17:30	9	1	0,04	25,8
18:00	10	1,1	0,044	26,1
18:30	11	1,1	0,044	16,8
19:00	12	1,1	0,044	27
19:30	13	1,1	0,044	27,1
Q total [Coulombs]		874,8		
Q corregida [Coulombs]		730		

Tabla 57 Ensayo probeta HM 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1	0,04	23
14:00	2	1,1	0,044	24
14:30	3	1,1	0,044	24
15:00	4	1,2	0,048	26
15:30	5	1,2	0,048	26
16:00	6	1,3	0,052	27
16:30	7	1,3	0,052	28
17:00	8	1,3	0,052	29
17:30	9	1,3	0,052	29
18:00	10	1,3	0,052	30
18:30	11	1,4	0,056	30
19:00	12	1,4	0,056	31
19:30	13	1,4	0,056	31
Q total [Coulombs]		1.087,2		
Q corregida [Coulombs]		907		

Tabla 58 Ensayo probeta HCF 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
15:00	1	2,6	0,104	23,9
15:30	2	2,8	0,112	25,5
16:00	3	2,9	0,116	28,1
16:30	4	3,1	0,124	29,5
17:00	5	3,4	0,136	32,5
17:30	6	3,4	0,136	33,5
18:00	7	3,5	0,14	36,1
18:30	8	3,6	0,144	36,7
19:00	9	3,6	0,144	37,9
19:30	10	3,7	0,148	38,9
20:00	11	3,8	0,152	40
20:30	12	3,9	0,156	41,2
21:00	13	3,9	0,156	42,3
Q total [Coulombs]		2.948,4		
Q corregida [Coulombs]		2.460		

Tabla 59 Ensayo probeta HCF 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
15:00	1	2,7	0,108	25
15:30	2	2,9	0,116	26,6
16:00	3	3,1	0,124	29,2
16:30	4	3,2	0,128	30,6
17:00	5	3,3	0,132	33,6
17:30	6	3,5	0,14	34,9
18:00	7	3,7	0,148	37,2
18:30	8	3,8	0,152	37,9
19:00	9	3,8	0,152	38,8
19:30	10	3,9	0,156	39,8
20:00	11	3,9	0,156	40,9
20:30	12	4	0,16	41,6
21:00	13	4,1	0,164	42
Q total [Coulombs]		3.060		
Q corregida [Coulombs]		2.553		

Tabla 60 Ensayo Probeta HCF 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
15:00	1	3,1	0,124	25
15:30	2	3,4	0,136	27,1
16:00	3	3,7	0,148	30,1
16:30	4	3,8	0,152	32,5
17:00	5	4,1	0,164	35,1
17:30	6	4,2	0,168	37,2
18:00	7	4,4	0,176	39,3
18:30	8	4,4	0,176	40,5
19:00	9	4,5	0,18	41,3
19:30	10	4,6	0,184	42
20:00	11	4,6	0,184	42,8
20:30	12	4,7	0,188	43
21:00	13	4,8	0,192	43,7
Q total [Coulombs]		3.625,2		
Q corregida [Coulombs]		3.025		

Tabla 61 Ensayo Probeta HCF 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1,7	0,068	23,9
14:00	2	1,9	0,076	24,5
14:30	3	2	0,08	25,7
15:00	4	2,1	0,084	27,3
15:30	5	2,2	0,088	28,5
16:00	6	2,3	0,092	30,1
16:30	7	2,4	0,096	30,8
17:00	8	2,5	0,1	32,2
17:30	9	2,6	0,104	33
18:00	10	2,6	0,104	33,7
18:30	11	2,7	0,108	34,3
19:00	12	2,7	0,108	34,9
19:30	13	2,8	0,112	35,4
Q total [Coulombs]		2.034		
Q corregida [Coulombs]		1.697		

Tabla 62 Ensayo probeta HCF 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	1,9	0,076	23,7
14:00	2	2	0,08	24,5
14:30	3	2,1	0,084	26,3
15:00	4	2,4	0,096	27,7
15:30	5	2,5	0,1	28,5
16:00	6	2,7	0,108	30,2
16:30	7	2,8	0,112	31,3
17:00	8	2,9	0,116	32,9
17:30	9	3,1	0,124	33,8
18:00	10	3,2	0,128	34,4
18:30	11	3,2	0,128	35,1
19:00	12	3,3	0,132	35,6
19:30	13	3,3	0,132	35,9
Q total [Coulombs]		2.361,6		
Q corregida [Coulombs]		1.971		

Tabla 63 Ensayo probeta HCF 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	2,4	0,096	23,7
14:00	2	2,6	0,104	24,4
14:30	3	2,7	0,108	25,3
15:00	4	2,8	0,112	26
15:30	5	2,9	0,116	27,7
16:00	6	3	0,12	30,1
16:30	7	3,2	0,128	31,9
17:00	8	3,4	0,136	33,7
17:30	9	3,5	0,14	35,3
18:00	10	3,6	0,144	36
18:30	11	3,7	0,148	36,5
19:00	12	3,8	0,152	37,7
19:30	13	3,8	0,152	38,4
Q total [Coulombs]		2.757,6		
Q corregida [Coulombs]		2.301		

Tabla 64 Ensayo probeta HMF 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,6	0,024	22,2
14:00	2	0,7	0,028	22,9
14:30	3	0,7	0,028	23,6
15:00	4	0,7	0,028	24,1
15:30	5	0,7	0,028	25
16:00	6	0,7	0,028	25,3
16:30	7	0,8	0,032	25,5
17:00	8	0,8	0,032	25,7
17:30	9	0,8	0,032	26,2
18:00	10	0,9	0,036	26,4
18:30	11	0,9	0,036	26,9
19:00	12	0,9	0,036	27,1
19:30	13	0,9	0,036	27,3
Q total [Coulombs]		673,2		
Q corregida [Coulombs]		562		

Tabla 65 Ensayo probeta HMF 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,7	0,028	21,7
14:00	2	0,8	0,032	22,5
14:30	3	0,8	0,032	24,9
15:00	4	0,8	0,032	25,3
15:30	5	0,9	0,036	26,4
16:00	6	0,9	0,036	27,1
16:30	7	0,9	0,036	27,8
17:00	8	0,9	0,036	30,3
17:30	9	1	0,04	30,8
18:00	10	1	0,04	32,2
18:30	11	1	0,04	33,2
19:00	12	1,1	0,044	33,5
19:30	13	1,1	0,044	35
Q total [Coulombs]		792		
Q corregida [Coulombs]		661		

Tabla 66 Ensayo probeta HMF 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,9	0,036	21,6
14:00	2	0,9	0,036	22,5
14:30	3	0,9	0,036	23,4
15:00	4	1	0,04	24,5
15:30	5	1	0,04	24,8
16:00	6	1	0,04	25
16:30	7	1	0,04	25,7
17:00	8	1	0,04	25,9
17:30	9	1,1	0,044	26,2
18:00	10	1,1	0,044	26,7
18:30	11	1,1	0,044	27
19:00	12	1,1	0,044	27,5
19:30	13	1,2	0,048	28,3
Q total [Coulombs]		882		
Q corregida [Coulombs]		736		

Tabla 67 Ensayo probeta HMF 0% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,5	0,02	21,9
14:00	2	0,6	0,024	22,1
14:30	3	0,6	0,024	22,7
15:00	4	0,7	0,028	23,2
15:30	5	0,7	0,028	2,7
16:00	6	0,7	0,028	23,9
16:30	7	0,7	0,028	24,7
17:00	8	0,7	0,028	25,3
17:30	9	0,7	0,028	25,7
18:00	10	0,7	0,028	26,1
18:30	11	0,8	0,032	26,4
19:00	12	0,8	0,032	26,9
19:30	13	0,8	0,032	27,3
Q total [Coulombs]		601,2		
Q corregida [Coulombs]		502		

Tabla 68 Ensayo probeta HMF 20% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,6	0,024	21,8
14:00	2	0,6	0,024	22,1
14:30	3	0,6	0,024	23,2
15:00	4	0,6	0,024	23,7
15:30	5	0,7	0,028	23,9
16:00	6	0,7	0,028	24,1
16:30	7	0,7	0,028	24,7
17:00	8	0,7	0,028	25,1
17:30	9	0,7	0,028	25,6
18:00	10	0,8	0,032	26
18:30	11	0,8	0,032	26,3
19:00	12	0,9	0,036	26,9
19:30	13	0,9	0,036	27,1
Q total [Coulombs]		615,6		
Q corregida [Coulombs]		514		

Tabla 69 Ensayo probeta HMF 40% daño

Hora	N Lectura	Lectura mA	Lectura V	Temperatura °C
13:30	1	0,6	0,024	21,8
14:00	2	0,6	0,024	22,1
14:30	3	0,6	0,024	23,2
15:00	4	0,6	0,024	23,7
15:30	5	0,7	0,028	23,9
16:00	6	0,7	0,028	24,1
16:30	7	0,7	0,028	24,8
17:00	8	0,8	0,032	25,2
17:30	9	0,8	0,032	25,7
18:00	10	0,9	0,036	26
18:30	11	0,9	0,036	26,4
19:00	12	0,9	0,036	26,8
19:30	13	1	0,04	27,2
Q total [Coulombs]		648		
Q corregida [Coulombs]		541		