



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

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN DURABILIDAD DEL HORMIGÓN  
PROYECTADO (SHOTCRETE), MEDIANTE ENSAYOS DE MIGRACIÓN DE  
CLORUROS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

VALENTINA CONSTANZA GUEVARA PAINEMAL

PROFESOR GUÍA:  
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JACQUES BORNAND ARAYA  
YURI TOMICIC CALVO

SANTIAGO DE CHILE  
2017



RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: VALENTINA CONSTANZA GUEVARA PAINEMAL  
FECHA: 2017  
PROF. GUÍA: FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

## ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN DURABILIDAD DEL HORMIGÓN PROYECTADO (SHOTCRETE), MEDIANTE ENSAYOS DE MIGRACIÓN DE CLORUROS

Actualmente, para calificar la calidad del hormigón proyectado se recurre a ensayos que evalúan diversas propiedades del material, incluyendo el desarrollo de resistencia mecánica temprana; la resistencia a compresión; la resistencia residual, el contenido de aire, entre otras. Por otra parte, para calificar su durabilidad se utiliza, al igual que para el hormigón convencional, el ensayo de permeabilidad al agua (NCh 2262), cuyos resultados presentan en general alta dispersión. En el caso de proyectos con mayores exigencias de durabilidad, que establecen un determinado período de servicio, se hace necesario recurrir a ensayos que permitan calificar sus características de porosidad y permeabilidad con niveles mayores de definición que el que se alcanza con el ensayo de penetración de agua, antes indicado. Es por esto que en el presente trabajo se realiza un estudio comparativo de dos metodologías de ensayo que permiten calificar la resistencia del hormigón a la penetración de ion cloruro, RCPT (ASTM C 1202)[1] y NT BUILD 492[2]; adicionalmente a otro que permite determinar el volumen de poros permeables del hormigón (VPV), a través del valor de la absorción de agua después de ebullición (ASTM C 642 [3]), método que cuenta con antecedentes de aplicación en el revestimiento de túneles en Canadá y Australia. Aplicando dichas metodologías de ensayo, se evalúa el desempeño en durabilidad de uno de los hormigones utilizados en las obras de la Línea 3 de Metro, que corresponde a un SH30(90)10/FL3, colocado mediante vía húmeda.

Las muestras ensayadas se obtuvieron a partir de paneles de control del material en obra, 18 en total, que permitieron la extracción de 72 testigos, de los que a su vez, se obtuvieron probetas a utilizar en los distintos ensayos: RCPT (36), NT BUILD 492 (54) y VPV (19). De los resultados de estos ensayos se deriva que el volumen de poros permeables (VPV) para el shotcrete de la obra es de un 17.1% en promedio, lo que corresponde a un hormigón de durabilidad en el rango Bueno/Regular, teniendo como referencia el criterio de Morgan [4], calidad que estaría por debajo de lo que se obtiene para obras de sostenimiento con shotcrete de acuerdo a ese criterio. En cuanto al comportamiento en el ensayo RCPT se observa un valor medio de 3636 C, que corresponde a una permeabilidad a cloruros Moderada. Los resultados del shotcrete en estudio en el ensayo NT BUILD 492 registraron un valor del Coeficiente de difusión igual a  $9.7 \times 10^{-12} (m^2/s)$ , calificado como Normal. No obstante, se evidenciaron anomalías en las muestras ensayadas por este método, que podrían ser consecuencia de filtraciones de una solución durante el ensayo. Realizado un análisis de sensibilidad y considerando sólo los valores que se presume no estuvieron afectados a dicho defecto de montaje del ensayo, se podría calificar al shotcrete en estudio con la misma calidad anteriormente señalada; sin embargo producto de esto se deben desechar los resultados obtenidos.

De este estudio se concluye que las metodologías evaluadas son alternativas válidas para la especificación por desempeño en durabilidad del shotcrete, quedando por confirmar la concordancia entre los métodos que establecen los ensayos RCPT y NT BUILD 492.



*A mi familia: mamá, papá y Felipe, a quienes amo mucho*



# Agradecimientos

Son muchos los que me ayudaron en esta etapa, siendo cada uno realmente importante para el desarrollo de esta memoria. A todos los integrantes del laboratorio químico, en especial a Marco por su alegría constante, bromas y canciones; también por todo el conocimiento y ayuda que me transmitió incondicionalmente durante todos los ensayos.

A mi profesor guía Federico, por todo el conocimiento entregado; a Jacques que sin ser parte de mi comisión me apoyó con infraestructura y equipamiento requerido para realizar los ensayos, fue fundamental. A Luis R. por perdonarme el termómetro quebrado.

A empresa Metro, por facilitarme los testigos sin problema alguno, entregándome exactamente lo que necesitaba y cuando lo necesitaba.

A cada uno de los trabajadores de IDIEM que me prestaron ayuda cuando pudieron, ya sea rectificando o cortando probetas. A Jorge C. del laboratorio de áridos, por revisar mis muestras mientras ebullían cuando yo no estaba. A Mitzi a quién a pesar de no conocer previamente, hizo el contacto directo con gente de Metro para conseguir los testigos, estando dispuesta a responder todas mis dudas durante largo tiempo; también a Gonzalo O. por todas las boletas de proyección de shotcrete facilitadas. A Daniel C. que aunque no lo crea, su ayuda y excelente disposición al término de mis ensayos fue invaluable.

A todos aquellos que me ayudaron directa o indirectamente a crecer durante estos 7 años; con los que compartí y compartieron conmigo y que hicieron tan entretenida mi estadía en la U. Gracias a los que estuvieron desde los inicios, a todos los que se sumaron en el transcurso y a los que se suman al final; Dientón gracias por este año tan bonito, y también por ayudarme con las fuentes de poder que alcanzaron a sobrevivir y las que no. Negrucho, Clau, Anto los quiero infinito, son realmente lo máximo.

Por su supuesto a toda mi familia que siempre me apoyó. Valeria, fuiste y eres mi hermana, hombro y risa.

Gracias totales.



# Tabla de contenido

Tabla de contenido	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Figuras	xiii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	1
1.3. Alcance . . . . .	2
<b>2. Antecedentes: Hormigón proyectado</b>	<b>4</b>
2.1. Materiales constituyentes del hormigón proyectado . . . . .	4
2.2. Dosificación y mezclado . . . . .	7
2.3. Estructura interna y mecanismos de transporte . . . . .	7
2.4. Métodos de ensayo y requisitos de calidad . . . . .	8
2.4.1. VPV y otros ensayos para determinar porosidad del hormigón . . . . .	10
2.5. Corrosión en el hormigón armado . . . . .	15
2.5.1. Factores de variabilidad en penetración de cloruros . . . . .	17
2.5.2. Ensayos de penetración de cloruros . . . . .	19
2.6. Usos del hormigón proyectado . . . . .	22
<b>3. Caracterización del hormigón</b>	<b>23</b>
3.1. Composición de mezcla en estudio . . . . .	24
3.2. Resistencias a compresión . . . . .	26
<b>4. Planteamiento de investigación</b>	<b>28</b>
4.1. Desarrollo experimental . . . . .	28
4.1.1. VPV . . . . .	29
4.1.2. RCPT . . . . .	32
4.1.3. NT BUILD 492 . . . . .	35
4.2. Resultados de ensayos . . . . .	39
4.2.1. VPV . . . . .	39
4.2.2. RCPT . . . . .	41
4.2.3. NT BUILD 492 . . . . .	42
<b>5. Análisis de resultados</b>	<b>44</b>

5.1. VPV . . . . .	45
5.2. RCPT . . . . .	49
5.3. NT BUILD 492 . . . . .	50
5.4. Resumen de análisis de resultados . . . . .	56
5.5. Recomendaciones . . . . .	57
<b>6. Discusión y conclusiones</b>	<b>59</b>
6.1. Discusión . . . . .	59
6.2. Conclusiones . . . . .	61
<b>7. Glosario</b>	<b>63</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>65</b>
<b>A. Tablas(VPV)</b>	<b>68</b>
<b>B. Tablas(RCPT)</b>	<b>70</b>
<b>C. Tablas(NTBUILD492)</b>	<b>81</b>

# Índice de Tablas

3.1. Materiales . . . . .	25
3.2. Granulometría y parámetros físicos de áridos . . . . .	25
3.3. Dosificación según ACI modificado . . . . .	26
3.4. Resistencia compresión y contenido PNT . . . . .	27
4.1. Muestras ensayadas . . . . .	39
4.2. Volúmenes de poros permeables y absorción post ebullición y sumergido, % . . . . .	40
4.3. Edad y variación de ensayo RCPT . . . . .	42
4.4. Edad y coeficiente de migración de cloruros . . . . .	43
5.1. Contraste entre shotcrete de V. Guevara y V. Muñoz . . . . .	44
5.2. Hormigones ensayados por T. Vega . . . . .	45
5.3. Resumen ensayo VPV . . . . .	48
5.4. Resumen ensayos V. Muñoz . . . . .	48
5.5. Resumen RCPT . . . . .	49
5.6. Resultados T. Vega de RCPT . . . . .	50
5.7. Resumen NT BUILD 492 . . . . .	51
5.8. Resumen NT BUILD 492 modificado . . . . .	54
5.9. Resultados T. Vega, ensayo NT BUILD 492 . . . . .	55
5.10. Resumen resultados . . . . .	56
A.1. Fecha de proyección e inicio de ensayo . . . . .	68
A.2. Pesos descritos en capítulo 4 . . . . .	69
A.3. Valores de expresiones descritas en capítulo 4, de 4.1 a 4.7 . . . . .	69
B.1. Fechas relevantes del ensayo (2016-2017) . . . . .	70
B.2. Mediciones muestra: 8970 . . . . .	71
B.3. Mediciones muestra: 8971 . . . . .	71
B.4. Mediciones muestra: 8972 . . . . .	72
B.5. Mediciones muestra: 8973 . . . . .	72
B.6. Mediciones muestra: 8974 . . . . .	73
B.7. Mediciones muestra: 8975 . . . . .	73
B.8. Mediciones muestra: 8976 . . . . .	74
B.9. Mediciones muestra: 8978 . . . . .	74
B.10. Mediciones muestra: 8979 . . . . .	75
B.11. Mediciones muestra: 8980 . . . . .	75
B.12. Mediciones muestra: 8981 . . . . .	76

B.13. Mediciones muestra: 8982 . . . . .	76
B.14. Mediciones muestra: 8983 . . . . .	77
B.15. Mediciones muestra: 8985 . . . . .	77
B.16. Mediciones muestra: 8986 . . . . .	78
B.17. Mediciones muestra: 8986N . . . . .	78
B.18. Mediciones muestra: 8988 . . . . .	79
B.19. Mediciones muestra: 8989 . . . . .	79
B.20. Resumen carga eléctrica de ensayo . . . . .	80
C.1. Datos iniciales y finales (1) . . . . .	81
C.2. Datos iniciales y finales (2) . . . . .	82
C.3. Mediciones perfil de penetración (1) . . . . .	83
C.4. Mediciones perfil de penetración (2) . . . . .	84
C.5. Resultados finales (1) . . . . .	85
C.6. Resultados finales (2) . . . . .	86
C.7. Resultados finales MODIFICADOS (1), valores en rojo: cambiaron interpretación con respecto a datos originales . . . . .	87
C.8. Resultados finales MODIFICADOS (2), valores en rojo: cambiaron interpretación con respecto a datos originales . . . . .	88

# Índice de Figuras

2.1. Modelo de predicción de rebote según tamaño de áridos [5] . . . . .	6
2.2. Desarrollo de resistencia del shotcrete [6] . . . . .	9
2.3. Correlación muy pobre entre absorción y coeficiente de difusión de cloruros [7], Sherman et al. . . . .	11
2.4. Correlación entre coeficiente de migración de cloruros y volumen de vacíos permeables[7] . . . . .	11
2.5. Contenido de agua alcanzado en VPV (5h boil), 30 minutos de inmersión y 24 horas de inmersión, expresado en porcentaje de contenido de agua según ensayo de saturación mediante vacío [8] . . . . .	12
2.6. Comparación entre volúmenes de agua absorbidos de 4 ensayos. Barras de izquierda a derecha: 30 minutos de inmersión, 24 horas de inmersión, VPV, saturación mediante vacío, [8] . . . . .	13
2.7. Gráfico de BWA versus resistencia a la compresión en shotcrete (valores recopilados de proyectos en Universidad de Laval, Quebec Canadá) . . . . .	14
2.8. Clasificación según Morgan [4] . . . . .	14
2.9. Clasificación según Morgan . . . . .	15
2.10. Proceso de corrosión en hormigón armado . . . . .	16
2.11. Modelo de vida útil de estructuras de hormigón armado, por Tutti 1982 [9] .	19
2.12. Clasificación RILEM para ensayo NT BUILD 492 . . . . .	22
3.1. Distribución de cortes para la obtención de probetas . . . . .	24
3.2. Muestras previo a cortes . . . . .	24
4.1. Resistencia a compresión de cilindros de 150x300 (mm) en función de la edad en condiciones de curado variable [10] . . . . .	29
4.2. Secuencia ensayo VPV . . . . .	31
4.3. Preparación RCPT . . . . .	33
4.4. Detalle de instalación de RCPT[11] . . . . .	34
4.5. Montaje RCPT . . . . .	34
4.6. Probetas sumergidas en agua saturada de $Ca(OH)_2$ durante período de saturación y vacío . . . . .	36
4.7. Montaje de método de ensayo NT BUILD 492 [2] . . . . .	37
4.8. Montaje NT BUILD 492 . . . . .	37
4.9. Tensión y duración de ensayo, según corriente inicial . . . . .	38
4.10. Medición de profundidad de penetración de cloruros,[2] . . . . .	38
4.11. VPV, %, según muestras . . . . .	40

4.12. Carga RCPT, totalidad de muestras . . . . .	41
4.13. Carga RCPT, promedio por panel . . . . .	41
4.14. Coeficiente de migración en régimen no estacionario . . . . .	43
5.1. Absorción pre y post ebullición, %, por muestra . . . . .	46
5.2. Diferencia en absorción . . . . .	46
5.3. Clasificación según Morgan . . . . .	47
5.4. Clasificación según Morgan para muestras ensayadas . . . . .	48
5.5. Penetrabilidad de ion cloruro basada en carga transmitida[1] . . . . .	49
5.6. Clasificación RILEM para ensayo NT BUILD 492 . . . . .	51
5.7. Perfiles de penetración de ion cloruro, de probetas ensayadas por IDIEM . . . . .	52
5.8. Perfiles de penetración de ion cloruro . . . . .	53
5.9. Mediciones modificadas NT BUILD 492 . . . . .	54
5.10. Irregularidades de manto de probetas . . . . .	55
5.11. Comparación de resultados de ensayos de iones cloruro . . . . .	57

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Planteamiento del problema

Dado que el hormigón proyectado está cumpliendo un rol fundamental en la industria de la construcción tanto civil como minera, es que se desea aportar con investigación relacionada con cómo predecir su comportamiento a lo largo de su vida útil. De esta manera el uso de un material con comportamiento conocido en la ejecución de obras, se aproximaría más a las condiciones que se requieran según durabilidad y desempeño por diseño. Adicionalmente, como ya existen trabajos de investigación relacionados con la durabilidad del material, realizados en IDIEM [12, 13, 14], específicamente con ensayos de penetración de cloruros, es que se decide continuar con éstos para así afinar la línea de estudio ya existente, mediante el aporte de resultados nuevos que puedan ser analizados en conjunto a los anteriores, que han dejado muchas preguntas por resolver.

### 1.2. Objetivos

El notorio aumento en la utilización del hormigón proyectado, también llamado shotcrete, genera la necesidad de estudiarlo exhaustivamente para darle un mejor uso y eventualmente hacer mejoras en sus materias primas constituyentes y técnicas de colocación. También es importante entender cuales son las problemáticas asociadas a dicho material y qué agentes dañinos pueden afectar significativamente la *durabilidad* de éste. La *durabilidad* se define como la capacidad de resistencia a deterioro y baja de desempeño, ya sea por cualquier agente externo o interno, químico o físico. A partir de estas consideraciones se plantea como principal objetivo de la presente investigación, el estudio y evaluación de desempeño de dos ensayos relacionados con la migración de cloruros, que han sido utilizados con éxito en hormigón convencional o mortero para determinar propiedades que se relacionan directamente con la durabilidad. Éstos ensayos son ampliamente usados hoy en día, pero debido a las características peculiares del shotcrete, se necesita su validación mediante ensayos a distintas dosificaciones de éste, para así abarcar sus propiedades asociadas. En esta memoria se abor-

dará el estudio del comportamiento de hormigón proyectado utilizado en Metro, mediante las metodologías de ensayo NT BUILD 492, método perteneciente a la norma noruega, y *Rapid chloride permeability test* (ASTM C1202-RCPT), además se verificarán los resultados de investigaciones anteriores, donde se obtuvieron resultados de muy alta impermeabilidad de cloruros, utilizando el ensayo ASTM C1202-RCPT, lo cual no se condice con la alta porosidad que presentan estos hormigones. Por otra parte, se efectuará un análisis de los resultados que entregan los distintos métodos, para concluir sobre la efectividad de dichos ensayos y la existencia de alguna correlación entre éstos.

Si bien en especificaciones tradicionales de hormigón la relación w/c de una mezcla de hormigón es un parámetro importante que se correlaciona con la durabilidad del hormigón, en Chile se está desistiendo de incluirlo dándole mayor cabida a establecer requisitos de durabilidad basados en ensayos vinculados a la permeabilidad [15]. Es por esto que se plantea como objetivo secundario, evaluar el desempeño del shotcrete utilizando también la metodología de ensayo de la norma ASTM C642-13 (VPV), *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*, que busca medir el volumen de vacíos permeables para caracterizar al hormigón proyectado en estudio, según su estructura de poros, parámetro fundamental en el análisis de durabilidad.

Adicionalmente a los objetivos señalados, se estudiarán las ventajas y desventajas del uso del shotcrete frente a otros métodos constructivos, y las limitaciones de los ensayos evaluados y aquellos que actualmente se realizan para su especificación y control. Para aquellos métodos de ensayos evaluados en la presente investigación, se buscará acotar su uso en el hormigón proyectado según cómo se ajuste cada uno a las características propias.

### 1.3. Alcance

El trabajo a realizar contempla las siguientes etapas que aseguran el cumplimiento de los objetivos propuestos, estos se plantean a continuación:

- Realización de una revisión bibliográfica exhaustiva, para entender e interiorizar el funcionamiento de los ensayos, junto a sus aplicaciones, ventajas/desventajas y limitaciones.
- Determinación de volumen de vacíos permeables, %, mediante ensayo VPV de la norma ASTM C642-13 para así caracterizar el hormigón proyectado, que también se ensayará con iones cloruros y así estudiar concordancia entre resultados.
- Implementación del ensayo NT BUILD 492, ya que en IDIEM, donde se realizarán las experiencias, no se cuenta con los implementos necesarios para su realización. Esto se hará de acuerdo a la normativa correspondiente, para asegurar la mayor confiabilidad posible a las especificaciones.
- Determinación del coeficiente de migración de cloruros y la resistencia a la penetración de iones cloruros para el shotcrete en estudio, mediante NT BUILD 492 y ASTM C1202-RCPT respectivamente.
- Cálculos y comparación de resultados de dichos ensayos.

- Análisis de resultados de los tres ensayos en conjunto, y comparación con investigaciones anteriores, particularmente con memorias de V. Muñoz y T. Vega. Concluir a partir de resultados de ensayos realizados sobre el comportamiento del shotcrete bajo efectos del cloruro.

# Capítulo 2

## Antecedentes: Hormigón proyectado

“A comienzo de los años treinta, nació el término general de *Shotcrete* (Hormigón Proyectado), difundido por el “American Railway Engineering Association” (Asociación Americana de Ingenieros de Ferrocarriles), para describir el proceso de ‘gunitado’.”(SHOTCRETE: guía chilena del hormigón proyectado, 2017, p18).

El hormigón proyectado corresponde a una dosificación y técnica de colocación especial del hormigón. Éste es utilizado en una amplia gama de estructuras y sostenimientos, tanto civil como minero. La aplicación del material es mediante un proceso neumático a alta velocidad hacia el sustrato, el que puede asegurar una suficiente compactación; puede ser de forma manual o robotizada y la elección de cada una de ellas depende en gran medida del tipo de construcción, pero no exclusivamente. Generalmente la colocación manual se utiliza en construcciones civiles y reparaciones, mientras que para minería, construcción de túneles subterráneos y aplicaciones en altura o secciones de gran tamaño la colocación es comúnmente robotizada. En ambas técnicas se requiere operadores experimentados y con competencias suficientes para reducir la alta variabilidad intrínseca de la proyección del material. Por último, la compactación del hormigón es fundamental en términos de durabilidad, en el caso del shotcrete al ser proyectado a alta velocidad se asegura este parámetro de calidad, en efecto hay estudios que afirman que si el shotcrete es apropiadamente aplicado, logra una compactación superior a la del hormigón moldeado [16].

El uso de shotcrete conlleva varios beneficios que son considerados al momento de su elección. Por ejemplo se utiliza muy poco moldaje, en ocasión no se usa, y su rápida colocación con respecto al hormigón convencional.

### 2.1. Materiales constituyentes del hormigón proyectado

El shotcrete, al igual que el hormigón convencional, se compone de varios materiales que deben cumplir con la normas y con las especificaciones técnicas pertinentes, provenientes del proyectista. Es muy importante que se respeten los requisitos del proyecto, que las materias primas utilizadas sean de calidad certificada y que la ejecución de la obra cuente con

supervisión especializada, puesto que esto condiciona el desempeño futuro de la estructura construida. La dosificación de los componentes del hormigón está sujeta a varias propiedades del hormigón endurecido, tales como resistencia especificada a la compresión, asentamiento, densidad, tenacidad, retracción por secado, permeabilidad y durabilidad [17].

Las materias primas constituyentes del hormigón proyectado son: cemento, áridos, agua, aditivos y opcionalmente dependiente de las especificaciones del proyecto puede contener adiciones, materiales complementarios, mallas o fibras.

El cemento típicamente utilizado en Chile para el shotcrete es el cemento portland puzolánico o portland siderúrgico de alta resistencia, esto último para aumentar la resistencia a edades tempranas, requisito fundamental del shotcrete [15]. El cemento portland corresponde al cemento que se obtiene de la molienda del clínker y yeso, y que como máximo tolera un 3 % de materiales extraños. Luego un cemento portland siderúrgico corresponde a un cemento portland con escoria básica granulada de alto horno, con no más del 30 % de esta adición con respecto al peso del producto ya fabricado; y un cemento portland puzolánico corresponde a un cemento portland con puzolana incorporada, con no más del 30 % de esta adición con respecto al peso del producto ya fabricado [18].

Los áridos utilizados en las mezclas de hormigón proyectado utilizados en revestimiento están limitados en su tamaño máximo de hasta 10 (mm) dada la trabajabilidad que éste debe poseer, para lograr una adecuada colocación, una hidratación rápida de la pasta y por el sistema de bombeo con que se coloca el hormigón. La granulometría que se utiliza debe cumplir con la norma chilena NCh163, la que considera que la utilización de arenas finas provoca una mayor retracción pero menor nivel de segregación, mientras que arenas gruesas puede estar relacionadas con mayor rebote al momento de proyectar el material, factor relevante dada la pérdida de material [15]. La figura 2.1 muestra un modelo de la proyección del shotcrete, que predice una variación lineal del rebote según el logaritmo del tamaño de los áridos. Sin embargo el rebote depende de más factores, como por ejemplo de la vía de colocación del shotcrete, que puede ser seca o húmeda; en general la vía húmeda es cada vez más utilizada, especialmente robotizada, debido a sus menores limitaciones. Dentro de sus ventajas, se estima que aproximadamente tiene asociado un rebote del 4 al 6 %, mientras que la vía seca del orden de un 15 % [16].

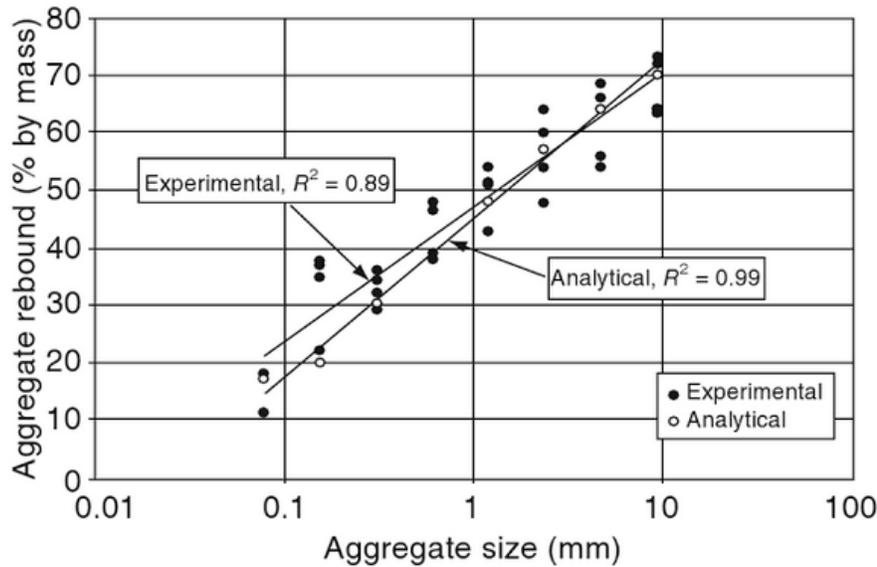


Figura 2.1: Modelo de predicción de rebote según tamaño de áridos [5]

El agua de amasado de la mezcla debe ser preferentemente potable, en caso de que no se cuente con una fuente se tiene que asegurar que el agua a utilizar cumpla con la norma chilena NCh1498. Ésta debe tener concentraciones inferiores a las establecidas por la norma, como cloruros y sulfatos para así evitar el deterioro del material desde su interior.

Para mejorar la propiedades de la mezcla de shotcrete en estado fresco y/o endurecido se utilizan aditivos y adiciones. Los aditivos más utilizados son reductores de agua de bajo y de alto rango, controladores de hidratación y aceleradores de fraguado, los que se incorporan durante el amasado del hormigón, en cantidades de hasta el 5% con respecto al peso del cemento utilizado. En particular al shotcrete siempre se le incorpora el aditivo acelerante de fraguado, esencial para su aplicación en paramentos verticales o sobrecabeza, ya que disminuye el desprendimiento y deslizamiento del material, además de permitir la colocación de capas de mayor espesor; esto se traduce en mayor velocidad en la construcción y por lo tanto en reducción de costos; no obstante debe tenerse especial cuidado porque su mal uso puede provocar condiciones indeseadas, por ejemplo una sobredosis del aditivo puede desencadenar una disminución en la velocidad de fraguado a largo plazo o arriesgar la durabilidad del hormigón [15][19]. Una adición importante en el hormigón proyectado es el microsílíce, el cual trae consigo beneficios asociados a su finura, como por ejemplo disminución de porosidad y rebote, mejor adherencia al sustrato y mejoras en cuanto al volumen de bombeo; esta adición se dosifica entre el 5 y 10% en peso con respecto al del cemento utilizado.

Adicionalmente es necesario utilizar en muchos casos fibras y/o mallas. Las fibras se encargan principalmente de conferir resistencia mecánica después de que el hormigón se haya fisurado, sin embargo también ayudan a aumentar su resistencia al impacto y controlar la retracción por secado. Además al encontrarse homogéneamente distribuida, proporciona capacidad de resistencia uniforme, actuando como una micro armadura, esto se traduce en reducción de rebote y mejor compactación. Éstas pueden ser sintéticas, de vidrio o de acero. Las mallas se encargan principalmente de resistir los esfuerzos de tracción que la estructura no es capaz de soportar.

## 2.2. Dosificación y mezclado

La dosificación corresponde a la medición en peso de todas las materias constituyentes del hormigón para luego proceder al mezclado. Esta debe asegurar una mezcla homogénea de la pasta; no existe para este proceso una norma especial para el shotcrete, sin embargo se trabaja con la norma NCh170 que regula al hormigón convencional y es adaptable a este tipo de hormigón.

La temperatura es un parámetro de carácter sustancial a controlar durante el mezclado, transporte y proyección. Debido a esta sensibilidad es que por ejemplo normas internacionales restringen las temperaturas mínimas y máximas permitidas de los materiales utilizados, estos van entre 5 y 35 °C [20].

## 2.3. Estructura interna y mecanismos de transporte

La estructura interna está definida en gran medida por la estructura de poros, es decir, de los espacios vacíos inmersos en el hormigón. Por ello se debe entender qué implicancia tiene cada uno de estos espacios y qué mecanismos actúan permitiendo el ingreso de elementos destructivos.

Los principales tamaños de poros son:

- Poros de gel: Diámetro aproximado entre 2 a 3 ( $\mu\text{m}$ )
- Poros capilares: Diámetro aproximado de 1.3 ( $\mu\text{m}$ )
- Burbujas de aire: Diámetro aproximado de 50 ( $\mu\text{m}$ )
- Aire atrapado y huecos de compactación: Diámetro aproximado de hasta 30 (mm)

Es relevante comprender los mecanismos de transporte a través de la estructura de poros del hormigón, ya que son fundamentales al momento de explicar el comportamiento de un hormigón *durable*, término que se detalla en la sección *Métodos de ensayo y requisitos de calidad*. Los mecanismos más típicos son los que se muestran a continuación:

- Permeabilidad: Fenómeno producido por un gradiente hidráulico, en el cual hay involucrada presión en el líquido o gas para ingresar a otro sector.
- Difusión iónica: Movimiento de iones o moléculas a causa de un gradiente de concentración. El transporte tiene dirección hacia el sector con menor concentración, hasta que el equilibrio sea alcanzado.
- Absorción capilar: Efecto que se produce debido a la tensión superficial del líquido, cuando la tensión intermolecular es menor a la adhesión del material en contacto.

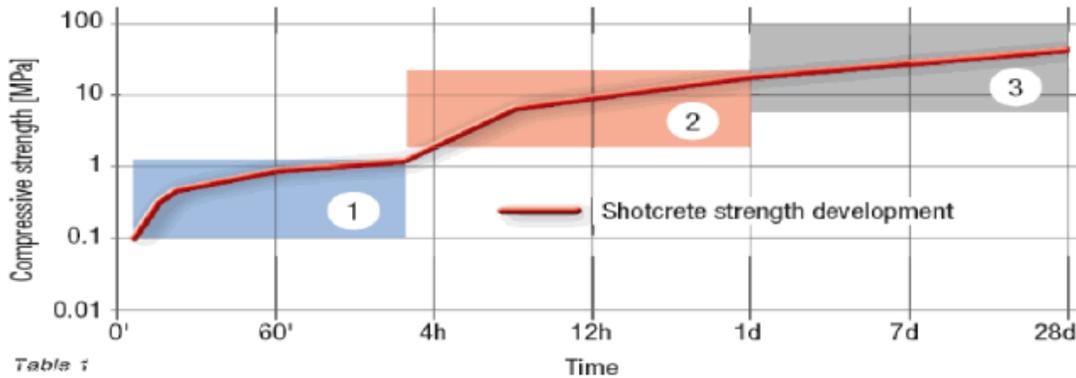
## 2.4. Métodos de ensayo y requisitos de calidad

Para asegurar calidad del shotcrete es necesaria la utilización de distintos métodos de ensayos que garanticen el buen desempeño del material. Sin embargo en Chile, en general, los ensayos que se utilizan no están normalizados para el hormigón proyectado, es por esto que se recurre complementariamente a normas extranjeras o experiencias y recomendaciones de empresas. Es importante ensayar durante distintas etapas de fraguado al hormigón proyectado, dado que según la edad que tenga debe cumplir con diversas condiciones que permitan entender si sigue un progreso dentro de los parámetros aceptables. Los ensayos existentes pueden agruparse según el estado del hormigón, por ejemplo para estado fresco, fraguado inicial y hormigón endurecido; a continuación se nombran sólo algunos de ellos [21].

- **Cono de Abrams:** Ensayo para medir la docilidad del hormigón, magnitud asociada fuertemente con la trabajabilidad de la mezcla. Se utiliza un cono truncado de molde, el cual es llenado con la mezcla de hormigón, al retirarlo se mide la diferencia de altura entre el cono truncado y la máxima altura de la mezcla libre. El parámetro es llamado “descenso de cono” o “asentamiento”. Ensayo realizado al hormigón fresco.
- **Pistola Hilti:** Ensayo que busca estimar la resistencia a la compresión a edades tempranas, mediante la medición de la profundidad de penetración de un clavo y los valores de fuerza de extracción de éste.
- **Penetrómetro de aguja:** Busca medir resistencias tempranas mediante la penetración de una aguja en el hormigón. Por medio de la fuerza necesaria para comprimir un resorte interno que se comprime al ejercer presión se logra la obtención de resistencias.
- **Resistencia a la flexión:** Como lo dice su nombre mide la resistencia a la flexión y se realiza ensayando vigas de dimensiones determinadas por normas, como por ejemplo la norma ASTM C1609 que exige medidas de 100x100x350(mm) o 150x150x500 (mm). Esta magnitud oscila entre el 7 y 15 % de la resistencia a compresión.
- **Ciclo de hielo y deshielo:** Ensayo para estudiar el nivel de resistencia del hormigón cuando está sometido a estos ciclos.
- **Extracción y ensayo de testigos:** Se extraen testigos de hormigón proyectado a edades tempranas, para ensayarlos a compresión a diversas edades, éstas pueden ser a las 12 y 24 horas, y a los 7 y 28 días. El requisito para la resistencia a compresión a edades tempranas, es que supere al menos los 10 (MPa). La medida de compresión es un parámetro muy importante ya que no solamente califica la calidad del hormigón en cuanto a su resistencia, sino que también se vincula a otros parámetros como la tenacidad, permeabilidad, durabilidad y el nivel de compactación. Este ensayo debe ser tomado a cilindros extraídos de paneles proyectados; en caso que no se haga de paneles y se determine de hormigón moldeado en cilindros, se deberá contar con ensayos pre-construcción para determinar la correlación entre hormigón proyectado y moldeado compactado por vibración, en que generalmente hay una variación de alrededor de un 20 %. Esta diferencia puede aumentar según la calidad de proyección o cuidados durante el fraguado [22].
- **Espesor:** Este es muy fácil de medir en el hormigón endurecido. Se pueden perforar agujeros o extraer testigos, los cuales son medidos posteriormente y se verifica si cumplen con el espesor de diseño o mínimo.

Los ensayos para fraguado inicial o resistencias tempranas, ayudan a calcular la capacidad de soporte del terreno natural al cual se está recubriendo, y así saber en cuanto tiempo se puede ingresar de forma segura a continuar las faenas [21].

Para visualizar el progreso de la resistencia a la compresión del shotcrete en el tiempo y los ensayos que se realizan según la edad ver figura 2.2.



Development of	Method	Instrument	Strength	Time
1	Initial strength	needle penetration	Penetrometer	up to 1.5 MPa 0 – 3 h
2	Early strength	stud driving	Hilti DX 450-SCT	3 – 20 MPa 3 – 24 h
3	Final strength	coring	Compression testing machine	5 – 100 MPa 1 – 28 d

Figura 2.2: Desarrollo de resistencia del shotcrete [6]

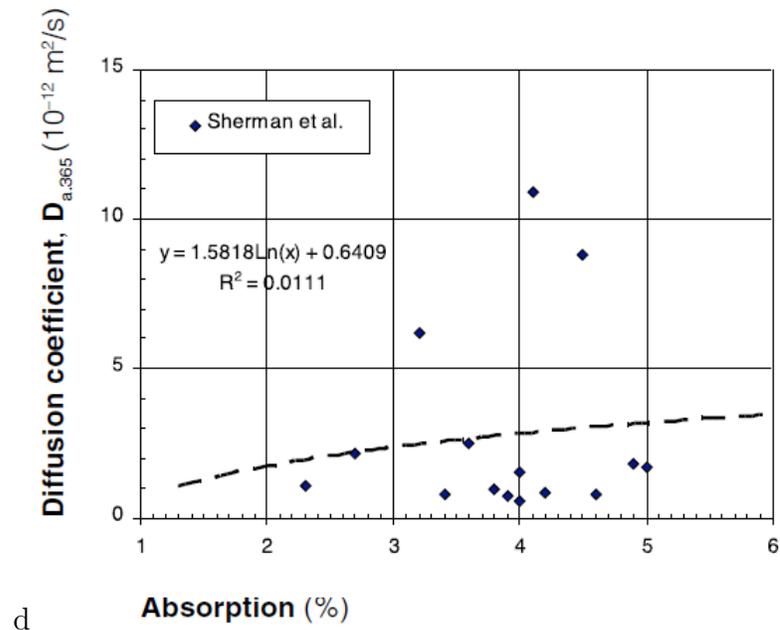
Adicionalmente a las categorías de ensayos nombradas, existen ensayos que buscan parámetros estrechamente relacionados a la *durabilidad* del material. ¿Pero cómo está definido este concepto? “La *durabilidad del hormigón de cemento hidráulico* se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente” (Guide to durable concrete. ACI Committee 201, 2001) [23]. Para asegurar la durabilidad del material es necesario considerar la elección de materiales, dosificación, fabricación, puesta en obra y curado. De los puntos anteriores sólo falta entender por qué la colocación es tan importante y específicamente en qué se ve afectada. Primero que todo, en el caso de haber armaduras, deben ser colocadas correctamente, de manera que se aseguren los espesores de recubrimiento, espaciado entre ellas y encapsulamiento adecuado; la proyección tiene que ser lo suficientemente favorable para evitar oquedades o vacíos de hormigonado, considerando una distancia apropiada al sustrato, tiempo acorde, correcto movimiento circular de la boquilla en el caso de colocación manual; además el espesor se debe ajustar lo más posible a las especificaciones, para asegurar la capacidad de soporte requerida, para esto se debe disminuir el rebote y sobre-espesor. En general existen muchas diferencias entre aplicación manual y robotizada, y se utilizan de manera diferenciada según convenga. La ventajas en general de la aplicación robotizada son la velocidad de proyección, especial para obras extensas y de sobre cabeza, en algunos casos mayor seguridad para los operadores, ahorro de costos, mayor control y mejores condiciones de trabajo para la cuadrilla. La aplicación manual implica muchas variables ya que requiere un pitonero, quien cumple

un rol fundamental en la calidad del material debido a sus responsabilidades correspondientes a la velocidad del aire comprimido, cantidad de agua incorporada y cantidad de aditivo acelerante agregado.

### 2.4.1. VPV y otros ensayos para determinar porosidad del hormigón

Existen ensayos que intentan medir la porosidad del material, parámetro directamente relacionado a la durabilidad, dado que por medio de los poros es que pueden ingresar agentes agresivos externos.

Para la medición de absorción de agua o porosidad del hormigón, existen una serie de métodos de ensayo, unos más efectivos que otros, que intentan evaluar dichos parámetros, que dependen de la estructura de poros y en gran medida de la interconectividad existente entre éstos. Entre los métodos existentes, el ensayo *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete* de la norma ASTM C642-13 (VPV) permite determinar la densidad, porcentaje de absorción de agua, antes y después de ebullición del agua, y porcentaje de vacíos en el hormigón endurecido. Si bien la metodología de este ensayo es explicada con mayor detalle en el capítulo 4, es necesario saber que tiene 2 procesos predominantes para la absorción de agua, estos son la inmersión del hormigón mientras se calienta el agua y mientras se enfría; y la ebullición del agua en la que está sumergida. Las altas temperaturas modifican la viscosidad y movilidad del agua en la red de poros, lo que se traduce en mayores desplazamientos dentro de la pasta endurecida. Durante la ebullición del agua, ésta se internará en los poros en forma de vapor de agua, generando una presión muy elevada, provocando la expulsión de aire y del mismo vapor. Posteriormente cuando el agua externa deja de ebullición y se enfría el agua circundante, la presión disminuye, volviendo a valores de la presión atmosférica, permitiendo el alto ingreso de agua líquida, llenando poros que previo al ensayo sólo habían estado ocupados por el aire. La medición de absorción con este método no es apropiada relacionarla con la resistencia del hormigón frente a cloruros, como se muestra a continuación en la figura 2.3.



d

Figura 2.3: Correlación muy pobre entre absorción y coeficiente de difusión de cloruros [7], Sherman et al.

Sin embargo como se presenta en el artículo *Chloride resistance of concrete* (2009), sí se puede relacionar el volumen de poros vacíos (VPV) con el coeficiente de difusión de un hormigón, no obstante estos estudios son para hormigón convencional, lo cual no necesariamente podría ser aplicable en el shotcrete. A continuación se presenta el gráfico que los demuestra, en que también se extrae que sólo es acertada esta relación para valores mayores al 13 % de VPV.

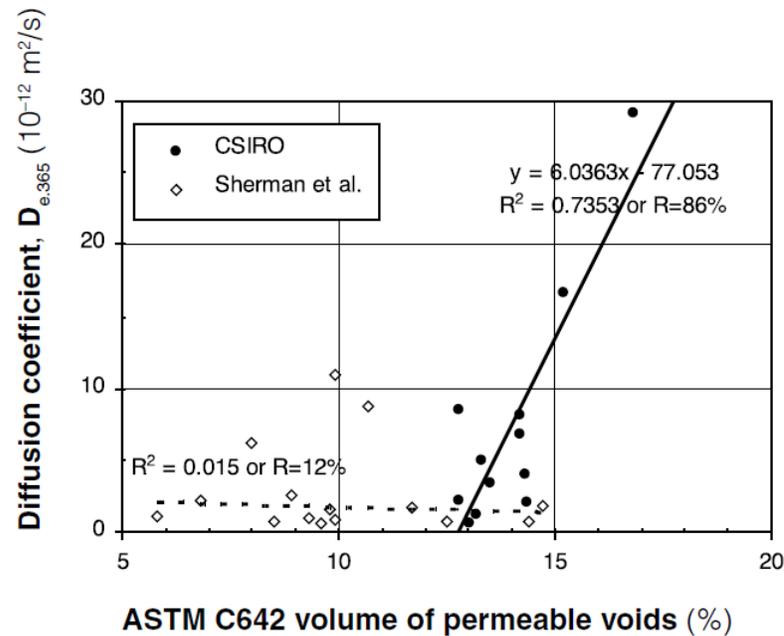


Figura 2.4: Correlación entre coeficiente de migración de cloruros y volumen de vacíos permeables[7]

Otros ensayos se basan en la inmersión del material en agua durante distintos períodos de tiempo; además del ensayo de saturación mediante vacío. Éste último evalúa la porosidad por absorción de agua, a través del secado en horno de la muestra y posteriormente se coloca en un desecador conectado una bomba de vacío a 0.1 mmHg para luego ser sumergida en agua con la bomba de vacío actuando. Mediante la diferencia de volúmenes de agua se obtiene la cantidad de agua absorbida, y por lo tanto el porcentaje con respecto a la masa de la muestra.

Ya se dijo que VPV no es el único ensayo que mide la cantidad de vacíos, pero sí uno de los más efectivos, según Washburn y Footitt. De acuerdo a un estudio de comparación de los ensayos nombrados anteriormente en ladrillos y materiales calcáreos, de la revista *Materials and Structures*, el ensayo de absorción mediante vacío es el más preciso de todos en cuanto a la absorción de agua, y que VPV arroja resultados cercanos al 90 % de absorción de éste [8]. En particular se muestran estos resultados en la figuras 2.5 y 2.6.

<b>Sample</b>	<b>5 h boil</b>	<b>30 min immersion</b>	<b>24 h immersion</b>
<b>1</b>	<b>91.5</b>	<b>8.5</b>	<b>60.5</b>
<b>2</b>	<b>91.0</b>	<b>34.4</b>	<b>47.3</b>
<b>3</b>	<b>90.5</b>	<b>30.0</b>	<b>73.9</b>
<b>4</b>	<b>100.0</b>	<b>60.8</b>	<b>71.84</b>
<b>5</b>	<b>89.0</b>	<b>68.2</b>	<b>72.0</b>
<b>6</b>	<b>80.8</b>	<b>32.98</b>	<b>49.0</b>
<b>7</b>	<b>99.7</b>	<b>55.84</b>	<b>76.45</b>

Figura 2.5: Contenido de agua alcanzado en VPV (5h boil), 30 minutos de inmersión y 24 horas de inmersión, expresado en porcentaje de contenido de agua según ensayo de saturación mediante vacío [8]

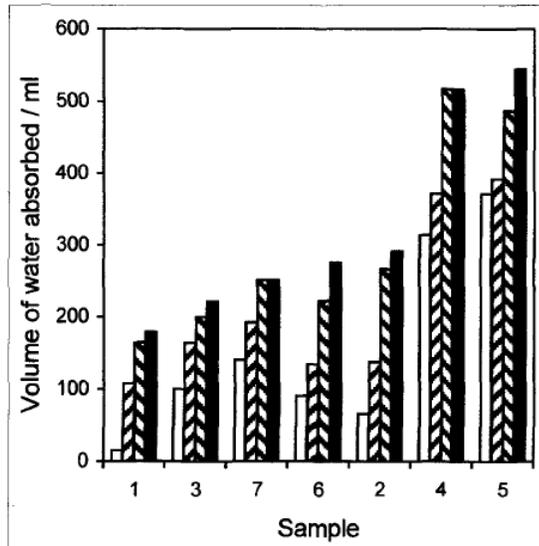


Figura 2.6: Comparación entre volúmenes de agua absorbidos de 4 ensayos. Barras de izquierda a derecha: 30 minutos de inmersión, 24 horas de inmersión, VPV, saturación mediante vacío, [8]

Pese a los resultados, Washburn y Footitt (1921) manifiestan su preocupación por la baja precisión del ensayo VPV, y sobre el uso de presión atmosférica y ebullición de agua en el experimento, que dicen puede ser un método poco confiable y lo suficientemente irreal para no ser incorporado como método de referencia [8].

Adicionalmente, existen algunos problemas prácticos relacionados a la aplicación del ensayo VPV. Específicamente en Canadá, existen documentos de contratos que incluyen en sus especificaciones la inclusión de este ensayo, restringiendo con un valor mínimo al *Boiled water absorption* (BWA), el cual muchas veces cuesta obtenerlo considerando que también hay limitaciones de resistencia a la compresión. Cumplir estos 2 objetivos simultáneamente requiere de un gran esfuerzo, lo que es entendible al observar el gráfico de la figura 2.7, donde se exhibe la baja correlación existente entre estos dos parámetros. Las líneas punteadas marcan los 4000 y 6500 (psi) equivalentes a 28 y 45 (MPa), valores típico de resistencia del shotcrete [24].

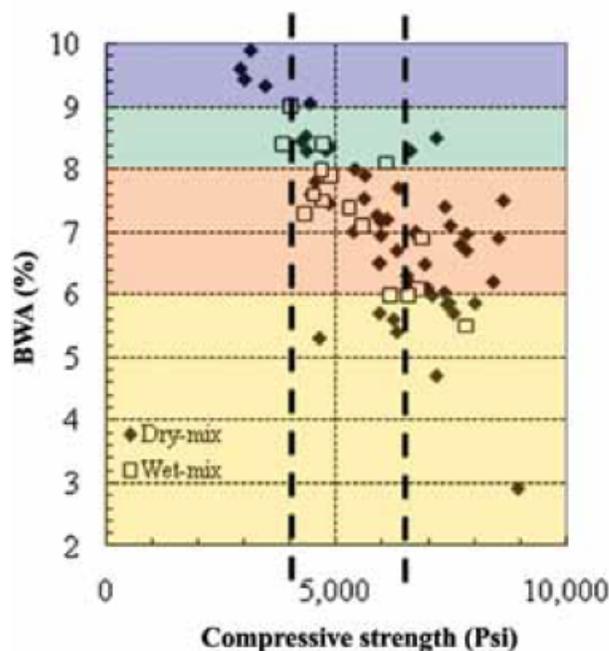


Figura 2.7: Gráfico de BWA versus resistencia a la compresión en shotcrete (valores recopilados de proyectos en Universidad de Laval, Quebec Canadá)

BWA corresponde a la absorción capilar que representa la absorción en masa, mientras que VPV lo hace volumétricamente, sin embargo miden la misma porosidad, expresadas de manera diferente.

A continuación, en figuras 2.8 y 2.9, se presenta una clasificación hecha por Morgan, D.R et al. en el año 1987, quién recopiló resultados del ensayo VPV para cientos de muestras de shotcrete provenientes de proyectos de norte America, con las cuales elaboró una clasificación de la calidad del shotcrete según su porcentaje de volumen de vacíos y absorción después de ebullición. Esta clasificación ha sido usada en numerosos proyectos del oeste de Canadá [4] y también se utilizará en el análisis de esta investigación.

Sprayed concrete quality	Permeable void volume, %	Boiled water absorption, %
Excellent	<14	<6
Good	14 to 17	6-8
Fair	17 to 19	8 to 9
Marginal	>19	>9

Figura 2.8: Clasificación según Morgan [4]

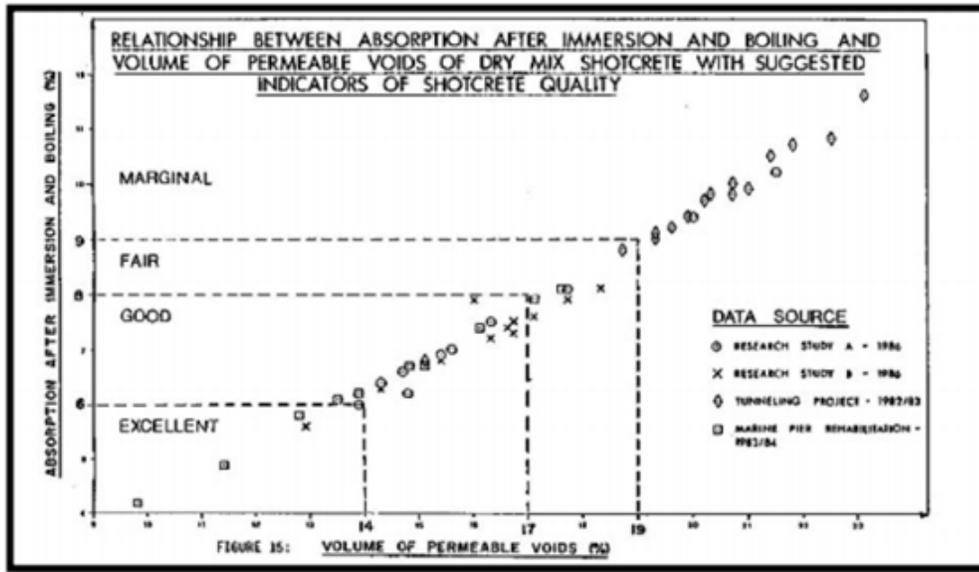


Figura 2.9: Clasificación según Morgan

## 2.5. Corrosión en el hormigón armado

Al hormigón armado, ya sea proyectado o convencional, se le debe proteger del ingreso de distintos agentes agresivos externos para evitar el deterioro ya sea de la pasta como de la armadura interna. La corrosión a la armadura es un caso particular de deterioro que se presenta cuando no se toman las acciones preventivas suficientes, correspondiendo a un proceso electroquímico en el que se ve afectada la armadura de refuerzo, este fenómeno puede ser a causa de dos eventos, la carbonatación o el ingreso de iones cloruro; ambos son responsables del fenómeno conocido como despasivación del hormigón. Por efecto de la carbonatación el hormigón que es naturalmente alcalino debido a su pH muy alto, entre 12.6 y 14.3, pierde su alcalinidad, bajando su pH a nivel de la armadura a valores del orden de 9.0. Esta despasivación genera un ambiente propicio para el inicio de la corrosión. Además esta alcalinidad inherente, debida principalmente por los álcalis e hidróxidos de calcio, sodio y potasio, genera una capa protectora de óxido muy pequeña sobre la barra (del orden de un par de nanómetros) que actúa como protección para que la corrosión no se active. Adicionalmente a la capa protectora natural de óxido que se forma sobre las barras, el hormigón de recubrimiento (especificado como un espesor de hormigón sobre las barras) también es una barrera física importantísima para frenar el ingreso de agente agresivos, sin embargo en ambientes marinos por ejemplo, éste puede ser fácilmente penetrado por la acumulación de cloruros en la superficie hasta que paulatinamente ingresan de todas formas hasta alcanzar el acero.

También, los iones cloruros pueden ingresar de diversas maneras a la mezcla de hormigón, ya sea por materiales constituyentes: agregados contaminados, agua no potable o aditivos que contengan cloruros; o bien por el ambiente al que está expuesta la estructura. Generalmente en ambientes marinos se manifiesta más este fenómeno, ya sea por las aguas salinas o la atmósfera con humedad salina. El cloruro reacciona con el aluminato tricálcico del hormigón produciendo compuestos que fijan los cloruros y reducen la concentración de  $Cl^-$  libre.

Las pilas electroquímicas se desarrollan a lo largo de las barras ya que en el caso de recubrimientos carbonatados o por ingreso de  $Cl^-$ , se destruye la capa de óxido protectora, con las consiguientes reacciones de oxidación y reducción, en ánodo y cátodo respectivamente. Las reacciones se muestran a continuación [25]:

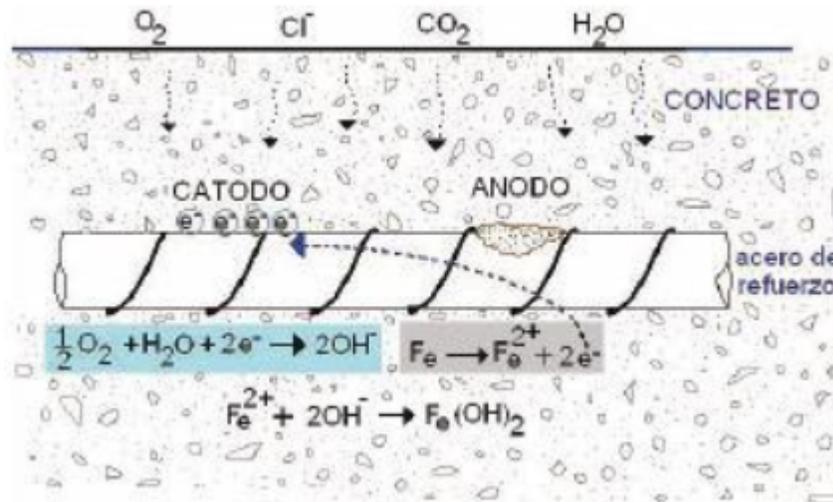


Figura 2.10: Proceso de corrosión en hormigón armado

Como resultado de estas reacciones, el electrolito encerrado en la *picadura* corroída, ánodo, se hace cada vez más positivo, siendo todo lo contrario el electrolito que rodea la zona catódica, el cual se hace cada vez más negativo. La positividad de la *picadura* genera una atracción de  $Cl^-$ , provocando la reacción (2.4), ésta produce una baja de pH (incrementando la acidez), lo que acelera la corrosión aún más. El pH del electrolito puede llegar a disminuir de 6 a 2-3.



El problema específico de la corrosión no es la disminución de alcalinidad precisamente, sino que ésta genera óxido en la interfaz acero/hormigón de las barras de acero, el cual ocupa 2 a 4 veces el volumen de la porción corroída; además de producir pérdidas mecánicas inherentes a la disminución de sección de las barras. En resumen las consecuencias de la corrosión son:

- Empeoramiento de la zona de adherencia entre acero-hormigón, perdiendo resistencia.
- Existencia de tensiones radiales a lo largo de las barras generando fisuración y delaminación producto del óxido, generan fisuras.

- Mayor corrosión en las corrugaciones de las barras.
- Cuando se ha perdido alrededor de un 3% de sección principal de la barra, puede ya haberse corroído hasta un 20% de las corrugaciones, por lo tanto disminuye acuñaamiento entre hormigón y barras.

La corrosión es importante de estudiar debido a que sus consecuencias afectan directamente la durabilidad de la estructura de hormigón armado, es por eso que se analizará con más detalle cómo ingresa el cloruro y los ensayos que permiten estudiar cómo evoluciona el deterioro por corrosión de armadura.

### 2.5.1. Factores de variabilidad en penetración de cloruros

Existen 3 mecanismos que explican el ingreso y transporte de cloruros en el hormigón, estos son absorción capilar, presión hidrostática y difusión, los que ya fueron explicados genéricamente en secciones pasadas, sin embargo se detallará el proceso de difusión, ya que es el método por el cuál los iones sí pueden alcanzar las barras de refuerzos; mientras se trabaje con un hormigón de no tan baja calidad ni los refuerzos sean tan superficiales los otros dos métodos no tienen el suficiente alcance, pero sí contribuyen a acelerar el proceso de difusión. Como se nombró anteriormente, la difusión en los ensayos de migración de cloruros, ocurre cuando existe mayor concentración de éstos en la superficie del material, lo que se traduce en un flujo de iones hacia el interior hasta alcanzar la armadura de acero. Para que suceda el proceso de difusión iónica es necesario que el material tenga una fase líquida continua (capilares conectados) y exista un gradiente de concentración de iones cloruros [11]. La difusión correspondiente a un flujo unidimensional se describe mediante la primera ley de Fick (2.5).

$$J = -D_{eff} \times \frac{dC}{dx} \quad (2.5)$$

Donde  $J$  es el flujo de iones cloruros,  $D_{eff}$  el coeficiente de difusión efectivo,  $C$  la concentración de iones cloruros y  $x$  es la variable de posición. Esto es sólo válido para cuando es alcanzado la condición de estado estacionario, es decir para cuando la variable concentración de iones no cambia en el tiempo. No obstante, para condiciones de estado no estacionario, se utiliza la segunda ley de Fick (2.6), la que tiene como solución la expresión (2.7), que se obtiene mediante el uso de condiciones de borde y condición inicial, donde  $erf(y)$  corresponde a la función error y  $t$  al tiempo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

$$\frac{C(x, t)}{C_0} = 1 - erf\left(\frac{x}{\sqrt{4D_{eff}t}}\right) \quad (2.7)$$

La velocidad de difusión ( $J$ ) se controla no sólo por el coeficiente de difusión a través

de la solución de poro, sino también por las características físicas de la estructura de poros capilares. El hormigón al no ser un material homogéneo, hace que la difusión dependa de algunos factores. Primero, que en el material se distingue una porción sólida y otra líquida, en que la fase sólida puede ser despreciada en relación a la difusión a través de la solución de poros. Pero la velocidad de difusión también depende de la estructura de poros del hormigón y sus características físicas, esta estructura interna depende de factores como las materias primas constituyentes, las prácticas constructivas, la edad, relación w/c y nivel de hidratación de la mezcla.

“La tasa de penetración de cloruro en el hormigón se ve afectada por la capacidad de unión del cloruro al hormigón. El hormigón no es inerte en relación a los cloruros en la solución de poros. Una parte de los iones de cloruro reacciona con la matriz de hormigón convirtiéndose en uniones químicas o físicas, y esta unión reduce la velocidad de difusión. Sin embargo, si se mide el coeficiente de difusión después de haber alcanzado las condiciones de estado estacionario, se puede presumir que toda la unión ha tenido lugar y este efecto no se observará entonces. Si no se ha alcanzado una condición de estado estacionario, no habrá ocurrido todo el atascamiento y esto afectará los resultados. La capacidad de unión al cloruro se controla mediante los materiales cementicios utilizados en el hormigón. La inclusión de materiales de cementación suplementarios afecta a la unión, aunque la influencia exacta no está clara” [Byfors, 1986; Rasheeduzafar, et al. , 1992; Sandberg y Larrson, 1993; Thomas, et al., 1995]. “Además, el contenido de  $C_3A$  del cemento influye en su capacidad de unión; un mayor contenido de  $C_3A$  conduce a un aumento de la unión” [Holden et al., 1983; Midgely y Illston, 1984; Hansson y Sorenson, 1990].

El proceso corrosivo en el hormigón reforzado consta de 2 etapas muy marcadas, las cuales determinan la vida útil del hormigón dañado. Estas corresponden a la *iniciación* y *crecimiento*, ver figura 2.11. La *iniciación* corresponde a la etapa cuando se pierde la efectividad de la película pasivadora que protege a la armadura. Esto es cuando el pH alcanza valores cercanos a 9, por efecto de la carbonatación o cuando el ingreso de cloruros alcanza el nivel de la armadura, alcanzando concentraciones críticas. También puede deberse a daño mecánico, esfuerzos localizados en la superficie que inician la fisuración, entorno no homogéneo que podría llegar a disolver la capa protectora, entre otras. Todo esto conlleva a la formación de la primera *picadura* que se genera en la barra de acero, específicamente en la capa pasivadora que recubre al acero. Por otro lado el *crecimiento* o *propagación*, es la etapa en que la corrosión de la armadura se propaga, generando daño considerable en la estructura producto de la expansión volumétrica de los productos de la corrosión de la interfaz acero/hormigón, generando fisuración, laminaciones o pérdida de adherencia [26].

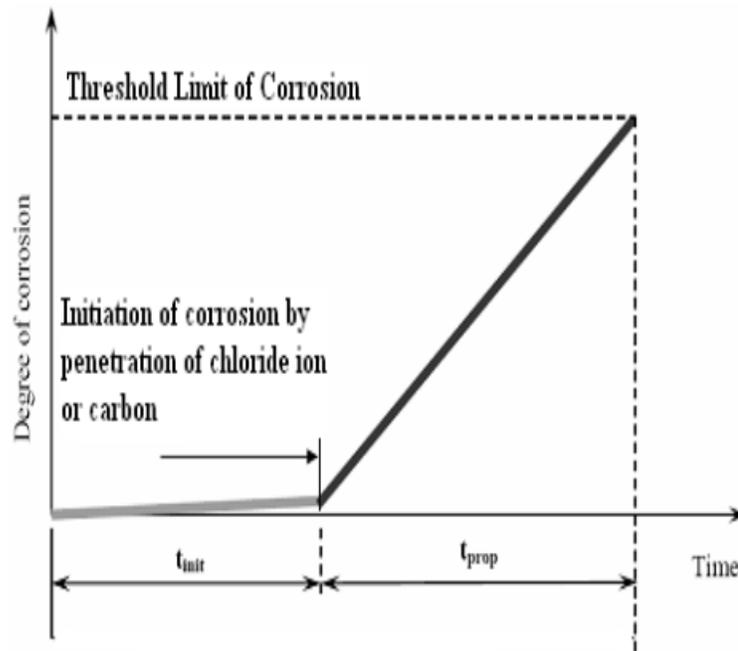


Figura 2.11: Modelo de vida útil de estructuras de hormigón armado, por Tutti 1982 [9]

### 2.5.2. Ensayos de penetración de cloruros

Como se analizó anteriormente, la penetración de cloruros al hormigón expuesto a ambientes de cloruros (marítimo o por presencia de sales descongelantes) es trascendental en términos de durabilidad de la estructura en cuestión. Este problema de durabilidad ha sido abordado con gran interés en el último tiempo, dado los desembolsos económicos que deben realizarse en reparaciones. Es por esta necesidad que se han creado diversos ensayos que intentan estudiar de la manera más precisa posible este efecto. En particular se detallarán dos ensayos que son ampliamente utilizados para el diseño y dosificación de mezclas a utilizar en hormigones que serán expuestos a ambientes agresivos, particularmente ambientes de cloruros, y cuyo estudio y aplicación se contempla en este trabajo de título.

#### - ASTM C1202

El ensayo que corresponde a la norma ASTM C1202 *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration* o *Rapid chloride permeability test* es un método de migración de iones cloruro en presencia de un campo eléctrico, a través de una probeta del hormigón en estudio, éste utiliza la carga eléctrica total registrada durante 6 horas de duración del ensayo como índice de permeabilidad del ión  $Cl^-$  del hormigón. El ensayo es altamente utilizado debido a su simpleza dentro de lo que significa un método así de acelerado, además de los resultados sencillos de interpretar [27].

En resumen el ensayo consiste en someter a probetas cilíndricas de hormigón, de 50 (mm) de espesor y 100 (mm) de diámetro, a una caída de tensión de 60 (V) DC, estando las caras planas sumergidas en soluciones de cloruro de sodio (catolito) e hidróxido de sodio (anolito) cada una respectivamente. En el catolito se desarrolla la semi-reacción de reducción, mientras

que en el anolito la semi-reacción de oxidación; ninguna de las dos ocurre espontáneamente, sino que necesitan de un potencial eléctrico externo. Es importante diferenciar estas semi-reacciones que conforman una celda electrolítica, en que el cátodo tiene carga negativa y el ánodo carga positiva, de las celdas galvánica en que las reacciones ocurren espontáneamente, generando un potencial eléctrico y las cargas eléctricas de los electrodos son opuestas. Luego, la carga total que pasa a través de las probetas es medida en coulombs, ésta es utilizada para obtener el indicador de resistencia de la muestra frente a la penetración de cloruros. Dada la naturaleza del ensayo que involucra la resistencia eléctrica del hormigón, se debe considerar que cualquier elemento, como barras de acero de refuerzo, que sean conductores eléctricos generarán cambios significativos en los resultados. Por lo tanto este ensayo no es válido para muestra de hormigón reforzado.

Originalmente el método fue desarrollado para evaluar la utilización de distintos materiales en mezclas de hormigón, no obstante hoy es utilizado en el control de calidad y aceptación de hormigones que se están utilizando ya en obra. Por otro lado, evidencia deja en claro que las edades de las muestras ensayadas mediante este método y las condiciones de curado al que fueron sometidas, son parámetros fundamentales en los resultados. Un buen curado de la muestra, se traduce en mejor desempeño en cuanto a la resistencia a la penetración de cloruros, ya que presentarán menor permeabilidad con el paso del tiempo. Es por esto que en los informes finales del ensayo, se debe especificar detalladamente ambos parámetros [1].

Aunque el método de ensayo tiene buenos resultados, es necesario entender y conocer sus limitaciones, para así aplicarlo adecuadamente. En particular, la norma advierte que se debe tener especial cuidado con la interpretación de resultados de aquellas muestras que tengan superficies tratadas, por ejemplo con sellantes, esto podría generar resultados de bajas resistencias a la penetración de cloruros. No obstante, según la norma ASTM C1202, el ensayo *Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration (Salt Ponding Test)* correspondiente a AASHTO T259, no se condice con los resultados para muestras con caras planas tratadas con sellantes, y asegura que presenta una buena correlación con el método RCPT; contrariamente acusa resultados de alta resistencia a la penetración de cloruros. El método nombrado, *Salt Ponding Test*, expone a las caras planas de una muestra de hormigón a cloruro de sodio y a exposición ambiental con 50% de humedad durante 90 días, para luego medir la concentración de cloruros a 2-3 rodajas de 0.5 (inch) de grosor de la misma muestra. De igual manera en la publicación *Rapid chloride permeability test* de la revista *Concrete Construction* (2002) se respalda la buena correlación de RCPT con el clásico *90-day salt ponding test*, sin embargo en la publicación menos reciente *Re-evaluation of the AASHTO T259 90-day salt ponding test* de la revista *Cement and Concrete Research* (1999) se expone totalmente lo contrario, afirmando una pobre correlación entre el llamado *ponding test* y el método acelerado RCPT, el que ha sido criticado por su falta de bases científicas [28].

Por otro lado, el método de ensayo RCPT también puede entregar resultados engañosos si la probeta tiene incorporada en su mezcla nitrato de calcio, ya que la corriente sería transportada por los iones nitrito, más iónicamente móviles en lugar de los iones cloruro. Los iones cloruro experimentarían efectivamente un menor gradiente de potencial, reduciendo la distancia recorrida. Esto puede traducirse en resultados de baja resistencia en comparación con la mezcla idéntica sin ese componente. Totalmente opuesto a esto son los resultados del método

*Salt Ponding Test.* No obstante, este efecto puede ser muy bajo dadas las concentraciones de iones de nitrito que se dan en la práctica [11].

Producto de la caída de tensión suministrada, la temperatura de las soluciones tiende a aumentar, lo que produce también un aumento en el flujo de carga eléctrica, sobre todo en los casos que se ensayan hormigones de peor calidad, entonces los hormigones de baja calidad parecen aún peores de lo que realmente son. Además esto genera una hidratación más rápida en el material, lo que afecta a las muestras de más temprana edad [11] [27].

No obstante, la falencia mayor del método está relacionado a que mide el movimiento de electrones que pasan a través de las muestras, sin hacer distinción entre cloruros u otros elementos, es decir mide la conductividad eléctrica del material. Específicamente hay elementos suplementarios o adiciones químicas que acentúan dicho fenómeno, como por ejemplo cenizas volantes, humo de sílice, reductores de agua, superplastificantes o inhibidores corrosión; es por esto que muchos especialistas no lo recomiendan cuando las muestras contienen dichos componentes.

Por último el ensayo no posee gran repetibilidad ni reproducibilidad. Concretamente la misma norma establece que el coeficiente de variación es de 12.3%, si el ensayo se realiza a las mismas muestras por el mismo operario y 18% al realizarlo en laboratorios diferentes.

### - NT BUILD 492

El método noruego es aplicable a hormigón, mortero y hormigón de reparación, éste mide el coeficiente de migración de cloruros mediante el ensayo de migración no estacionario.

En resumen el ensayo consiste en someter a 3 probetas a caídas de tensiones variables, mientras sus caras planas están en contacto con soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio, durante un tiempo también variable. Los dos parámetros anteriormente nombrados pueden ser distintos durante el desarrollo del ensayo para cada probeta, y dependen del valor inicial de corriente que pasa a través de ellas mientras se les suministra una diferencia de potencial de 30 (V) DC. En particular la diferencia de tensión generada se mueve en el rango entre 10 a 60 (V), mientras que la duración del ensayo entre 6 a 96 horas continuas.

El método promueve la difusión de iones cloruros, desde la solución de cloruro de sodio (catolito) hacia el anolito correspondiente a la solución de hidróxido de sodio; simultáneamente, al igual que en el método de ensayo RCPT antes nombrado, ocurren las semi-reacciones de oxidación y reducción; cuando se termina el tiempo estipulado de duración al ensayo, las muestras deben retirarse y partirse axialmente, de tal forma que pueda observarse y medir el perfil de penetración de iones  $Cl^-$ , el que es necesario, junto a otros parámetros, para medir el coeficiente de migración de cloruros.

El método tiene ventajas asociadas a la rapidez con que se obtienen resultados, ya que es un ensayo acelerado; sin embargo para cuando se ensayan hormigones con tamaño máximo de árido mayores 2 (cm), la medición del perfil de penetración podría tener complicaciones debido a la interferencia del árido. La norma especifica que en estos casos se deben correr las mediciones hasta alcanzar un punto claramente no interferido dentro de ciertos límites longitudinales.

Los resultados del método de ensayo pueden ser analizados mediante una clasificación RILEM que califica la calidad del material según el rango en el que se encuentre el coeficiente de migración. Ésta se muestra a continuación.

<b>Nordtest Method BUILD 492, Migration coefficient (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Concrete quality</b>
$< 2 \times 10^{-12}$	Very good
$2 - 8 \times 10^{-12}$	Good
$8 - 16 \times 10^{-12}$	Normal
$> 16 \times 10^{-12}$	Poor

Figura 2.12: Clasificación RILEM para ensayo NT BUILD 492

## 2.6. Usos del hormigón proyectado

La aplicación de shotcrete es muy extensa y variada, incluyendo obras estructurales o elementos con distintos fines, tales como industriales, comerciales, edificios residenciales, además de obras de reparación y rehabilitación de puentes, represas, embalses y estructuras marinas; también en estabilizaciones subterráneas en roca, tanto en obras mineras como tunelería. Esta extensa lista de usos del shotcrete, está asociada a las ventajas que presenta frente al hormigón convencional, lo que lleva a su preferencia. Por ejemplo la disminución o innecesario uso de moldaje en el shotcrete facilita la colocación en lugares inaccesibles o difíciles de llegar; debido a su proyección a alta velocidad no es necesario compactar la mezcla, e incluso puede alcanzar niveles de compactación más altos que el hormigón convencional; en construcciones subterráneas el uso de shotcrete es rentable y seguro para el personal de trabajo [16].

# Capítulo 3

## Caracterización del hormigón

Las mezclas de shotcrete con que se trabaja en el presente estudio pertenecen a la línea 3 de Metro, las muestras utilizadas se obtuvieron de proyecciones en paneles estándar mediante equipo que opera mediante vía húmeda. En particular se dispuso de muestras correspondientes a los piques Moneda y Plaza de Armas, las cuales se proyectaron en banco, bóveda, contrabóveda, revestimiento, galerías, HP1, HP2, HP3, ventilación, sello de túnel y distintas conexiones durante el período del 24 de septiembre al 7 de noviembre del año 2016. Las dosificación y materias primas son las mismas para todos los paneles, por lo tanto es correcto hacer un análisis comparativo de los resultados de los ensayos realizados.

De cada uno de los paneles se extrajeron aparte de los testigos para ensayos de autocontrol (específicamente de compresión, del contrato con la empresa Metro), algunos adicionales para efectuar los ensayos correspondientes a la presente investigación. La totalidad de los testigos fueron extraídos de los paneles después de 12 horas desde la proyección. Los pertenecientes a Metro para ser ensayados a compresión de edades tempranas, 12 y 24 horas, y a 7 y 28 días, y los testigos contemplados para esta investigación fueron almacenados durante el tiempo de curado, 28 días, en piscinas de agua con cal en las dependencias de IDIEM, manteniendo las mismas condiciones para todos. Posteriormente se cortaron las probetas y se guardaron en condiciones seguras hasta los días de ensayo.

La muestra completa comprendió un total de 18 paneles, de los cuáles se extrajeron 4 testigos por panel destinados específicamente a esta investigación. Éstos presentaron alturas variables entre 120 a 180 (mm) y diámetro de 100 (mm). A continuación se muestra la distribución de probetas obtenidas de cada conjunto de testigos contemplados por panel (Figura 3.1). Es importante destacar que uno de los paneles fue proyectado con mezcla de hormigón sin aditivo acelerante, llamado panel nulo; esto se realizó para determinar si existía alguna anomalía inherente al aditivo, que pudiera ser causal de un comportamiento distinto en los ensayos de penetración del ion cloruro.

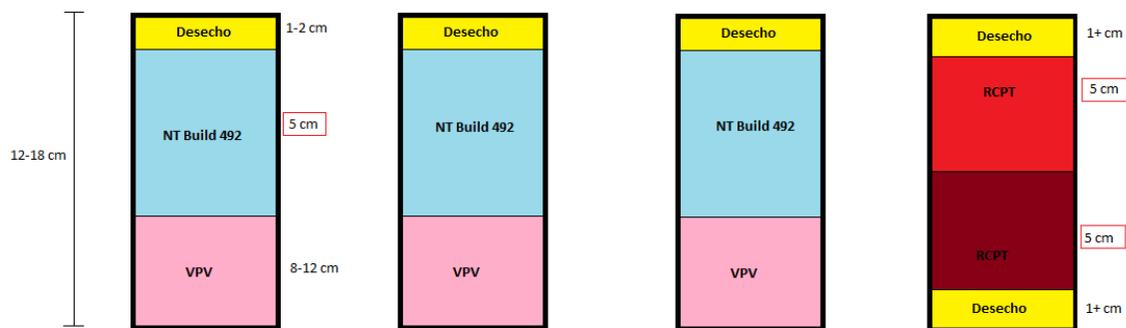


Figura 3.1: Distribución de cortes para la obtención de probetas

Todos los cortes fueron realizados en la dependencias de IDIEM según el progreso de los ensayos (tanto en sus sedes Plaza Ercilla como en Arturo Prat) y su posterior rectificado para asegurar perpendicularidad de caras planas. En la figura 3.2 se pueden observar algunas muestras antes de ser cortadas según figura 3.1.



Figura 3.2: Muestras previo a cortes

### 3.1. Composición de mezcla en estudio

A continuación se presenta la composición de la mezcla de hormigón proyectado en estudio correspondiente a un SH30,0(90)10/FL3, tablas 3.1, 3.2 y 3.3. La nomenclatura de identi-

cación alude a un shotcrete con una resistencia a 28 días de 300 (kgf/cm<sup>2</sup>) a la compresión medido en un cubo de 20 (cm) de arista a los 28 días, con nivel de confianza de 90 %, tamaño máximo nominal del árido de 10 (mm) y asentamiento de cono fluido (21 +/- 3 cm). Adicionalmente cabe destacar que en la proyección del hormigón se le incorporó aditivo acelerante (Tamshot 70 AFC) en un 8,5 % con respecto al peso del cemento.

Tabla 3.1: Materiales

CEMENTO	: Portland Tipo I, alta resistencia (importado)
GRAVA	: Cia. Minera Santa Laura
GRAVILLA	: Cia. Minera Santa Laura
ARENA	: Cia. Minera Santa Laura
ARENA FINA	: Cia. Minera Santa Laura
ADITIVO 1	: Tamcem SF (Microsilíce) - Normet
ADITIVO 2	: Tamcem 65C (Hiperplastificante) - Normet
AGUA	: Potable

Tabla 3.2: Granulometría y parámetros físicos de áridos

	Áridos de planta				Shotcrete
	Grava	Gravilla	Arena	Arena fina	Árido combinado
2	100	100	100	100	100
1.5	98	100	100	100	100
1	41	100	100	100	100
3/4	2	93	100	100	100
1/2	0	45	100	100	100
3/8		20	100	100	100
#4		1	99	99	99
#8			67	88	70
#16			43	79	48
#30			28	70	34
#50			17	50	22
#100			9	24	11
#200	0.3	0.5	5	10	
Absorción(%)	1.19	1.27	2.2	1.9	
D. real seca(kg/m <sup>3</sup> )	2.66	2.64	2.62	2.63	
D. Apar. Comp.(kg/m <sup>3</sup> )	1.64	1.68	1.72	1.62	
Chancado (%)					
MF	7.96	6.92	3.37	1.9	
D. Aparente suelta(kg/m <sup>3</sup> )	1.46	1.53	1.6	1.51	

De acuerdo a los parámetros antes indicados y utilizando como método de dosificación el ACI modificado, Cementos BSA procedió a calcular y determinar las correspondientes proporciones de materiales a utilizar, tabla 3.3.

Tabla 3.3: Dosificación según ACI modificado

<b>Cemento Portland</b>	400	kg/m <sup>3</sup>
<b>Agua total</b>	219	kg/m <sup>3</sup>
<b>Agua libre</b>	183	kg/m <sup>3</sup>
<b>Arena</b>	1433	kg/m <sup>3</sup>
<b>Arena fina</b>	253	kg/m <sup>3</sup>
<b>Gravilla</b>	0	kg/m <sup>3</sup>
<b>Grava</b>	0	kg/m <sup>3</sup>
<b>Razón w/c</b>	0.46	
<b>Aditivo 1</b>	20	kg/m <sup>3</sup>
<b>Aditivo 2</b>	2.8	kg/m <sup>3</sup>

## 3.2. Resistencias a compresión

Empresa Metro realiza ensayos al hormigón proyectado en condiciones de obra como método de control de calidad, ya sea en estado fresco como endurecido. Éstos corresponden al asentamiento del cono de Abrams, resistencias a la penetración con aguja de 9 (mm) a 2, 5 y 10 minutos, resistencia a la penetración mediante pistola Hilti a 3 y 8 horas y por último, ensayos a compresión a la edad de los 7 y 28 días.

Para efectos prácticos y útiles de la investigación, sólo se incorporarán los resultados de resistencia a compresión transformada a cubo normal de arista de 20 (cm), a la edad de 28 días, y especificación de aquellas muestras que contengan la adición Penetrón Admix (PNT) que corresponde a un impermeabilizante por cristalización, que se agrega en polvo a la mezcla recién preparada. Esta adición se incorporó sólo en los tramos o puntos que indica la ITO; éstos se muestran en la tabla 3.4.

La adición PNT contiene cemento Portland, arenas silíceas finas y varios químicos activos, estos últimos reaccionan con la humedad del hormigón mediante una reacción catalítica que produce cristales no solubles dentro de los poros y capilares de la mezcla de hormigón. El hormigón queda sellado permanentemente contra la penetración de agua y otros líquidos tanto a presión negativa como positiva, además protege su estructura contra el deterioro por la acción de factores medioambientales adversos.

Adicionalmente, al momento de proyectar el hormigón se utiliza el aditivo acelerante en líquido TamShot 70 AFC, libre de álcalis y de cloruros para hormigón proyectado, eficiente en aplicaciones de shotcrete para vía húmeda y vía seca.

Tabla 3.4: Resistencia compresión y contenido PNT

Muestra	Resistencia a 28 días ( $kgf/cm^2$ )(*)	PNT
8970	545	
8971	582	SI
8972	661	
8973	585	SI
8974	466	SI
8975	612	SI
8976	594	
8978	431	SI
8979	512	
8980	651	
8981	595	SI
8982	603	SI
8983	610	SI
8985	571	
8986	575	SI
8986N		SI
8988	606	
8989	562	
Aplicando conversión a probeta cúbica de 200 (mm)(*)		

# Capítulo 4

## Planteamiento de investigación

El shotcrete se ha vuelto una técnica de hormigonado mayormente utilizada en los últimos tiempos, esto se debe a su alta versatilidad, economía, seguridad, entre otras ventajas, además se caracteriza por su colocación altamente eficiente y adherencia a distintos sustratos, tales como roca, albañilería, acero, hormigón y otros. Su uso es apropiado en estructuras de difícil acceso y geometrías complejas, como reducciones de secciones o curvas. Dado los antecedentes se respalda que la técnica se ha mejorado de manera evidente, en particular se han desarrollado y afinado los sistemas de impermeabilización, convirtiéndolo en un método apto para soporte en construcciones subterráneas [29]. El hormigón proyectado cuenta con diversos ensayos para caracterizar y determinar las distintas propiedades inherentes a su especificación y su desempeño, sin embargo es de carácter imperativo el estudio de permeabilidad de iones cloruros, para así predecir en algún grado su comportamiento con respecto a la corrosión de fibras, armadura, mallas, arcos y todo tipo de elemento de acero que se encuentre inmerso o en contacto directo con él.

### 4.1. Desarrollo experimental

Los ensayos que se realizan son VPV, RCPT y NT BUILD 492, desarrollados en el mismo orden temporal que fueron nombrados, es decir con distintas edades. Sin embargo, la edad de ensayo varía en el rango entre 60 a 250 días, lo que introduce un factor de variabilidad en la resistencia a la compresión del hormigón de hasta un orden del 25% con respecto a la resistencia obtenida con un curado húmedo a 28 días, lo que no sería una variable significativa en el estudio. A continuación se observa un gráfico de aumento de resistencia a compresión del hormigón en función del tiempo, figura 4.1 [10]. No obstante, en el caso del shotcrete estas curvas presentaría un crecimiento aún más pronunciado, de resistencias tempranas.

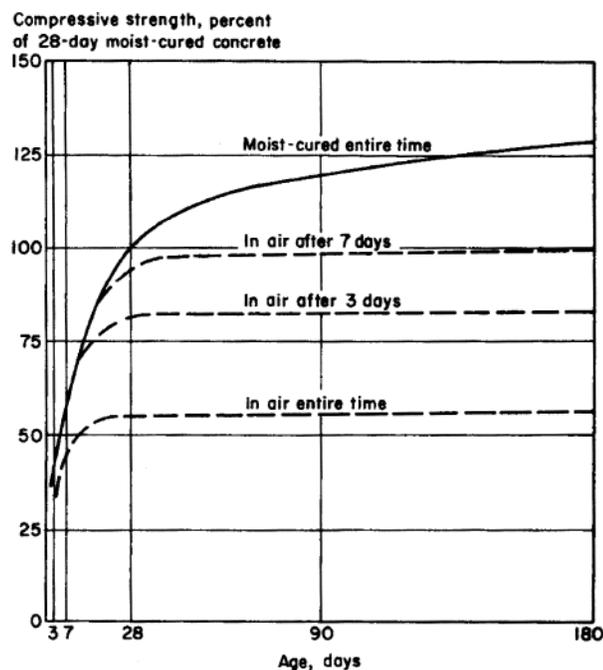


Figura 4.1: Resistencia a compresión de cilindros de 150x300 (mm) en función de la edad en condiciones de curado variable [10]

#### 4.1.1. VPV

El método de ensayo para determinar el volumen de poros permeables (*Volume of permeable voids*), descrito en la norma ASTM C642, se basa en la determinación de la densidad, porcentaje de absorción de agua y porcentaje de vacíos en el hormigón endurecido. Las probetas a ensayar deben ser extraídas de los testigos sacados de hormigón o de vigas, de cualquier forma y tamaño, siempre y cuando el volumen no sea inferior a 350 (cm<sup>3</sup>) y estar libre de grietas o fisuras [3].

El ensayo de volumen de poros permeables fue realizado en el laboratorio de IDIEM, durante los meses de noviembre 2016 a enero 2017. En total se realizaron 19 ensayos, provenientes del mismo lote utilizado para ensayar a penetración de iones cloruros. Estas muestras fueron: 8986, 8986N, 8988 y 8989, ver tabla 4.1.

El procedimiento por norma para la realización del ensayo, consta de 4 etapas consecutivas para la obtención de los siguientes parámetros: masa seca al horno, masa saturada después de inmersión en agua, masa saturada después de ebullición en agua y masa sumergida aparente. Cada una de ellas se consigue de la siguiente manera:

- **Masa seca al horno:** Se determina la masa inicial, luego las probetas se secan en horno a una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  por no menos de 24 horas, se sacan y enfrían al aire y se les determina su masa a temperatura ambiente. Si la diferencia de masas varía en más del 0.5 % del valor menor, se vuelve a realizar el procedimiento de secado en horno por no menos de 24 horas, sucesivamente hasta obtener una diferencia menor al 0.5 %. El último valor obtenido que cumple con la condición se le designa **A**.

- **Masa saturada después de inmersión en agua:** Se sumergen las muestras en agua potable a una temperatura aproximada de 21°C durante 48 horas, se determina su masa en condición de superficie seca, y se vuelven a sumergir en agua por no menos de 24 horas. Cuando la diferencia de masas sea menor al 0.5 % del mayor valor, se habrá determinado la masa final, sin embargo si esto no se cumple en primera instancia, se repetirá el procedimiento hasta obtener una diferencia menor al 0.5 %. El último valor obtenido corresponde a la masa saturada después de inmersión en agua, y se le designa **B**.
- **Masa saturada después de ebullición en agua:** Luego de saturar las muestras, se colocan en un recipiente con agua potable suficiente para cubrir las muestras y se hierven durante 5 horas. Terminado el paso anterior se dejan enfriar por lo menos durante 14 horas a temperatura ambiente y se determinan las masas de las muestras en condición de superficie seca. Este valor de muestra saturada después de ebullición es denominado **C**.
- **Masa sumergida aparente:** Finalmente se determina la masa sumergida aparente, suspendiendo las muestras en un recipiente con agua, este valor se denomina **D**.

A continuación se presentan algunas etapas del ensayo, figura 4.2.



(a) Secado en horno



(b) Post saturación



(c) Ebullición



(d) Masa sumergida aparente

Figura 4.2: Secuencia ensayo VPV

### Cálculos VPV

Para determinar el VPV se deben obtener los parámetros que se detallan a continuación:

Absorción después de inmersión (%):

$$[(B - A)/A] \times 100 \quad (4.1)$$

Absorción después de inmersión y ebullición (%):

$$[(C - A)/A] \times 100 \quad (4.2)$$

Densidad seca global (g/cm<sup>3</sup>):

$$[(A/C - D)] \times \rho \quad (4.3)$$

Densidad global después de inmersión ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ):

$$[B/(C - D)] \times \rho \quad (4.4)$$

Densidad global después de inmersión y ebullición ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ):

$$[C/(C - D)] \times \rho \quad (4.5)$$

Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ):

$$[A/(A - D)] \times \rho \quad (4.6)$$

Volumen de vacíos o espacio de poros permeables (%):

$$[(C - A)/(C - D)] \times 100 \quad (4.7)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del agua y corresponde a 1 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

#### 4.1.2. RCPT

La norma ASTM C1202 detalla las condiciones, metodología y cálculos requeridos para realizar el ensayo *Rapid chloride permeability test*. Éste se utiliza para determinar un indicador de la resistencia a la penetración de iones cloruros en el hormigón endurecido. A grandes rasgos el ensayo consiste en monitorear la temperatura y la corriente eléctrica que pasa por las probetas durante 6 horas, mientras que se les proporciona una caída de tensión de 60 V DC y que cada una de las caras planas de la probeta se encuentre sumergida en soluciones de cloruro de sodio e hidróxido de sodio respectivamente, ver figura 4.4. Con ese montaje es posible inducir una migración de iones cloruro dentro del hormigón. Con el registro de los datos obtenidos durante el período de ensayo es posible calcular la carga total que pasa a través de las probetas y así mediante cálculos e interpretación, determinar la resistencia del hormigón a la penetración de iones cloruros.

Las probetas a ensayar deben ser cortes de testigos cilíndricos de  $50 \pm 3$  (mm) de espesor y 100 (mm) de diámetro y al menos ser 2 para promediar resultados. Se debe realizar una preparación de las muestras previo al inicio del ensayo propiamente tal, que consiste en lijar las probetas, lavarlas, y aplicar revestimiento sobre la superficie del manto con algún sellante resistente a los reactivos, agua y temperaturas de hasta  $90^\circ\text{C}$ ; en el caso particular de la presente investigación se utilizó huincha aislante sobre silicona roja, ver figura 4.3-(a).

Luego, las probetas se someten a saturación bajo condición de vacío a una presión de al menos 50 (mm Hg) durante 4 horas, de las cuales la última hora debe ser sumergida en agua destilada. Finalmente ya sacadas de la cámara de vacío, las muestras se dejan bajo agua durante  $18 \pm 2$  horas. Ver figura 4.3-(b).



(a) Sellantes. Izquierda: huincha aislante sobre silicona, derecha: silicona roja



(b) Desecador conectado a bomba de vacío

Figura 4.3: Preparación RCPT

A continuación se puede iniciar el montaje del ensayo, el cual consiste en colocar la probeta en la celda del equipo y sellarla con silicona acética para luego verter los reactivos en cada extremo de ellas respectivamente. Éstos corresponden a solución de cloruro de sodio ( $NaCl$ ) al 3.0 % por masa e hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) 0.3N, ambas soluciones en agua destilada. Ya finalizada la preparación y revisión de ausencia de filtraciones el ensayo puede comenzar. Para ello se conecta el polo negativo de la fuente de poder con la sección de la celda rellena con  $NaCl$  (catolito), y el polo positivo a la celda con  $NaOH$  (anolito), como se observa en las figuras 4.4 y 4.5. Se activa la fuente de poder proporcionando una caída de tensión de  $60.0 \pm 0.1$  V.

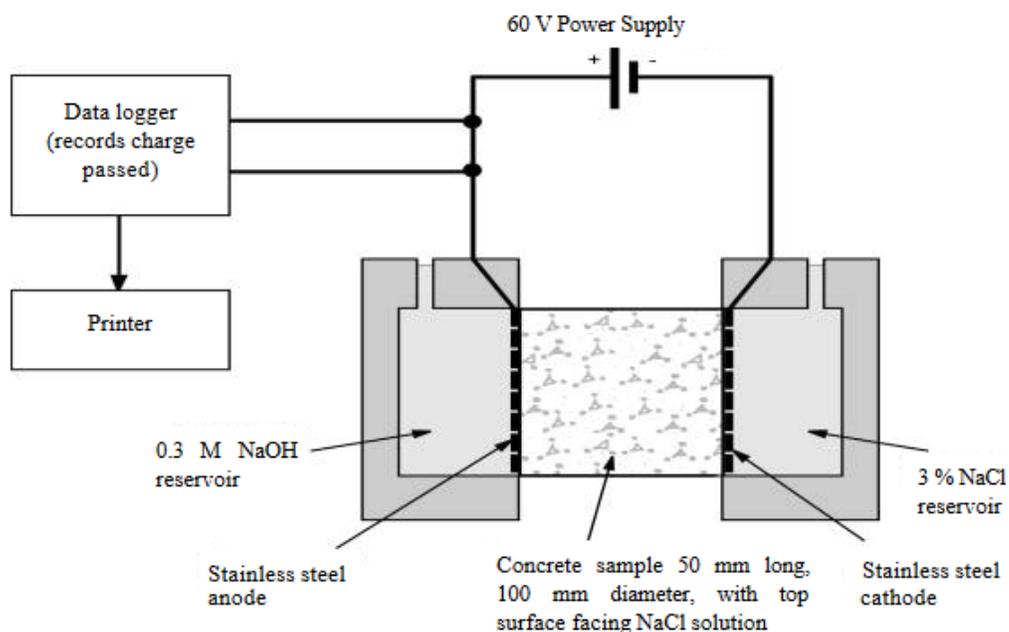


Figura 4.4: Detalle de instalación de RCPT[11]



Figura 4.5: Montaje RCPT

### Cálculos RCPT

Se deben realizar lecturas cada 30 minutos por lo menos, de corriente y temperatura, esta última no puede exceder los 90°C para evitar el daño de la celdas y la ebullición de la soluciones. Con estos valores es posible calcular la carga total que pasa a través de las muestras,

mediante integración de la curva corriente *versus* tiempo, o con la siguiente expresión, la cual se utilizó en la presente investigación.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (4.8)$$

Donde  $Q$  corresponde a la corriente que pasa en coulombs,  $I_0$  la corriente inmediatamente después de que el voltaje fue aplicado e  $I_t$  la corriente en  $t$  minutos después de aplicar el voltaje en amperes.

### 4.1.3. NT BUILD 492

El procedimiento detallado de *nordtest method* NT BUILD 492 perteneciente a la norma noruega, tiene como objetivo determinar el coeficiente de migración de cloruros del hormigón, mortero o cemento, bajo condiciones de migración en régimen no estacionario, es decir que las concentraciones de las soluciones cambian en el tiempo.

Este ensayo requiere de 3 probetas de 100 (mm) de diámetro y 50 (mm) de espesor para la obtención de 1 resultado. En resumen el ensayo consiste en forzar mediante una caída de tensión la migración de iones cloruros a través de las probetas. Luego, al término del período de ensayo este ingreso de iones se observa en el perfil de penetración, de manera tal que permite una medición de la penetración promedio del frente de cloruro. Con estas mediciones y otras adicionales es posible calcular el coeficiente de migración,  $D_{nssm}$ , del hormigón utilizando la ecuación derivada de la teoría de Nernst-Einstein.

Antes de iniciar el ensayo, se deben acondicionar las probetas. Durante 4 horas deben colocarse en la cámara de vacío (desecador) a una presión de 1-5 (kPa), sumergiéndolas en solución saturada de hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ) después de las primeras tres horas, quedando sumergidas durante la hora restante conectadas a la cámara de vacío, posteriormente a presión atmosférica durante  $18 \pm 2$  horas.

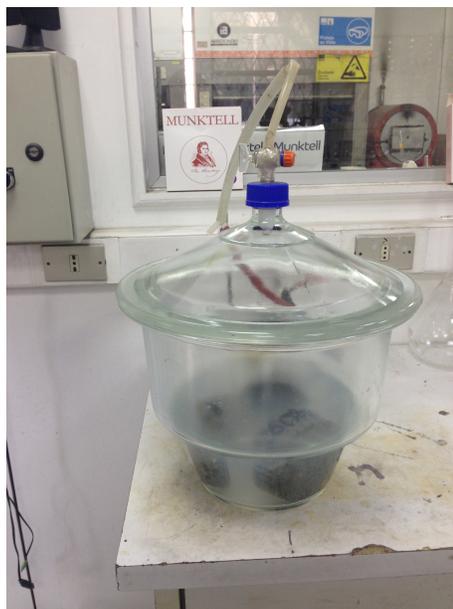


Figura 4.6: Probetas sumergidas en agua saturada de  $Ca(OH)_2$  durante período de saturación y vacío

Luego de esto se realiza el montaje del ensayo, lo cual fue posible con la implementación de éste de manera artesanal, ya que no se contó con la infraestructura necesaria previo al inicio del trabajo de investigación. Esto se hizo mediante la realización del recipiente de acrílico a medida, y los cortes de electrodos provenientes de una plancha de acero inoxidable.

El montaje consiste en asegurar la impermeabilidad de las muestras; en este caso se utiliza huincha aisladora y manga de polietileno. A continuación se preparan las soluciones, anolito y catolito, que son soluciones de hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) 0.3N y solución al 10 % en masa de cloruro de sodio ( $NaCl$ ) respectivamente, en ambas se utiliza agua destilada. Con todo preparado, se colocan las muestras ya impermeabilizadas en el contenedor de acrílico que les asegure una inclinación de  $32^\circ$ ; éste es llenado con 12 (l) de catolito, las muestras se sumergen en él conteniendo 300 (ml) de anolito dentro de la manga de polietileno. No debe existir contacto entre las caras inferiores de las probetas con los cátodos; los ánodos se acomodan dentro de la solución anódica sin contacto directo tampoco con la probeta. Finalmente se conecta la fuente de poder, suministrando una caída de tensión de 30 (V), como se muestran en el esquema 4.7 y en las figuras 4.8 (a)-(b).

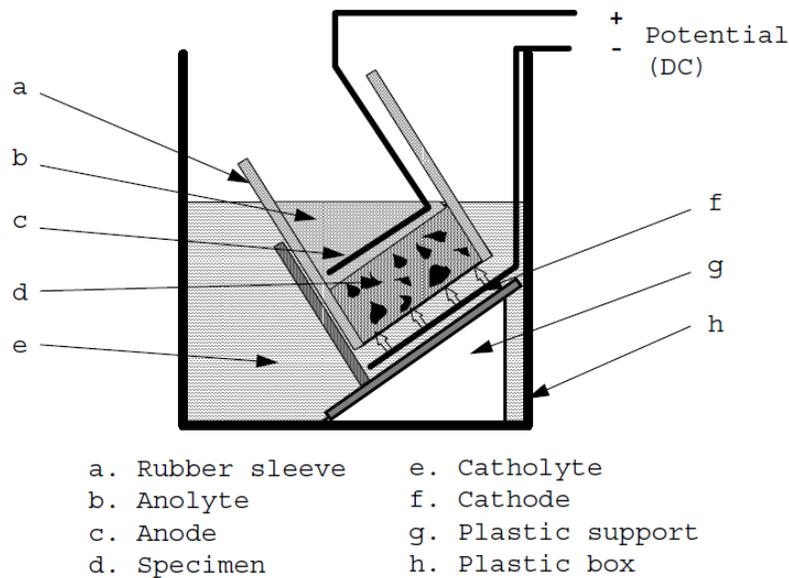
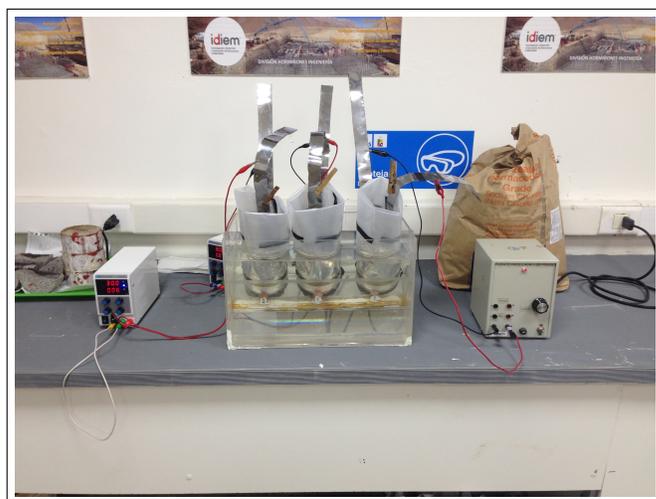
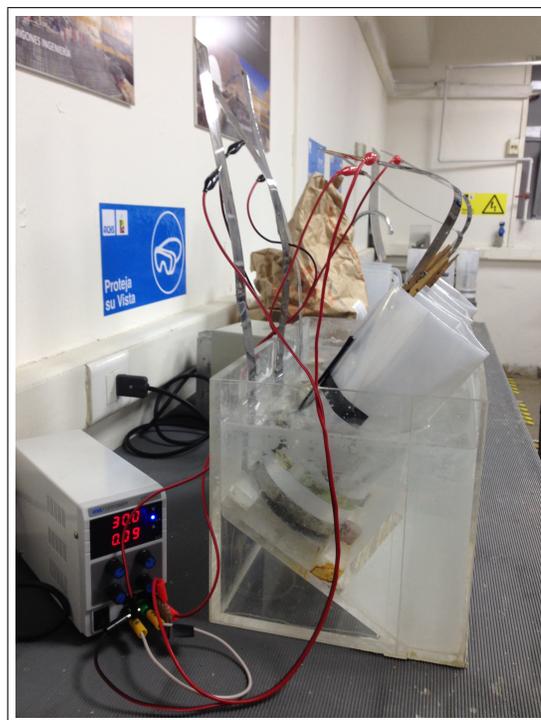


Figura 4.7: Montaje de método de ensayo NT BUILD 492 [2]



(a) Elevación de montaje ensayo NT BUILD 492



(b) Perfil de montaje NT BUILD 492

Figura 4.8: Montaje NT BUILD 492

El procedimiento normalizado establece fijar inicialmente el potencial de la fuente en 30 (V) y registrar la corriente inicial,  $I_0$  (mA), en cada una de las probetas. La intensidad de la corriente determina el tiempo de duración del ensayo como se indica en la tabla 4.9. Además según se indica en la tabla se debe ajustar la caída de tensión que se utilizará durante el desarrollo del ensayo conforme a la lectura de corriente con el voltaje ajustado. Al inicio y

final del ensayo se debe medir corriente (corregida) y temperatura, además de espesor de cada muestra; con estos parámetros es posible calcular el coeficiente de migración de cloruros en régimen no estacionario (non-steady-state migration coefficient,  $D_{nssm}$ ).

Initial current $I_{30V}$ (with 30 V) (mA)	Applied voltage $U$ (after adjustment) (V)	Possible new initial current $I_0$ (mA)	Test duration $t$ (hour)
$I_0 < 5$	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

Figura 4.9: Tensión y duración de ensayo, según corriente inicial

Finalizado el tiempo de duración del ensayo, se desconectan las fuentes de poder, y se desmontan las probetas para proceder a cortarlas axialmente, mediante ensayo de hendimiento. Luego se rocía el plano fracturado con nitrato de plata ( $0.1M AgNO_3$ ) para visualizar el perfil de penetración de iones cloruros. A continuación se presenta cómo realizar las mediciones de profundidad de penetración del frente de cloruros, figura 4.10.

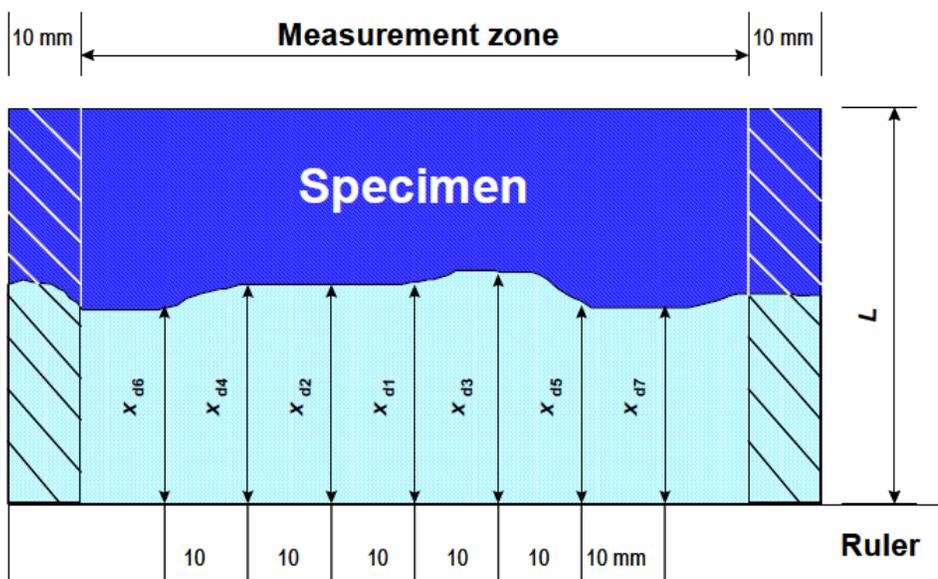


Figura 4.10: Medición de profundidad de penetración de cloruros,[2]

### Cálculos NT BUILD 492

Para calcular el coeficiente de migración de cloruros se utiliza la siguiente ecuación:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \cdot (x_d - 0,0238\sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}}) \quad (4.9)$$

Dónde  $T$  es el promedio entre la temperatura inicial y final en grados celcius,  $L$  es el espesor de la muestra en milímetros,  $U$  es la caída de tensión aplicada en volt,  $t$  es la duración del ensayo en horas y  $x_d$  es el promedio de profundidades de penetración en milímetros.

## 4.2. Resultados de ensayos

A continuación se presentan los resultados obtenidos de los tres métodos de ensayo, VPV, RCPT y NT BUILD 492. El desarrollo necesario se detalla en las tablas del apéndice del presente documento.

### 4.2.1. VPV

A un total de 19 probetas se les realizó el ensayo de volumen de poros permeables, los cuales corresponden a 5 de los 18 paneles proyectados. Las probetas pertenecen a las coladas que se detallan a continuación en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Muestras ensayadas

Muestra	N° de probetas
8982	1
8986	4
8986N	3
8988	5
8989	6
<b>Total</b>	19

A continuación se presentan los resultados de los 19 ensayos, especificando el volumen de poros permeables, absorción después de inmersión y ebullición, y la edad de ensayo, ver tabla 4.2 y gráfico 4.11.

Tabla 4.2: Volúmenes de poros permeables y absorción post ebullición y sumergido, %

Muestra	Probeta	Madurez ensayo, días	VPV (%)	Absorción después de inmersión y ebullición (%)
8982	1	79	18.1	8.6
8986	1	68	17.4	8.2
	2	68	17.9	8.5
	3	68	17.4	8.2
	4	68	17.9	8.5
8986N	1	68	16.6	8.5
	2	68	16.1	8.3
	3	68	16.8	8.7
8988	1	59	15.2	7.0
	2	59	16.0	7.4
	3	59	15.9	7.3
	4	59	16.1	7.5
	5	59	15.6	7.2
8989	1	58	18.1	8.6
	2	58	17.7	8.4
	3	58	17.9	8.6
	4	58	17.8	8.5
	5	58	17.7	8.4
	6	58	17.8	8.4
	Mínimo	58	15.2	7.0
	Máximo	79	18.1	8.7
	Promedio	64	17.1	8.2

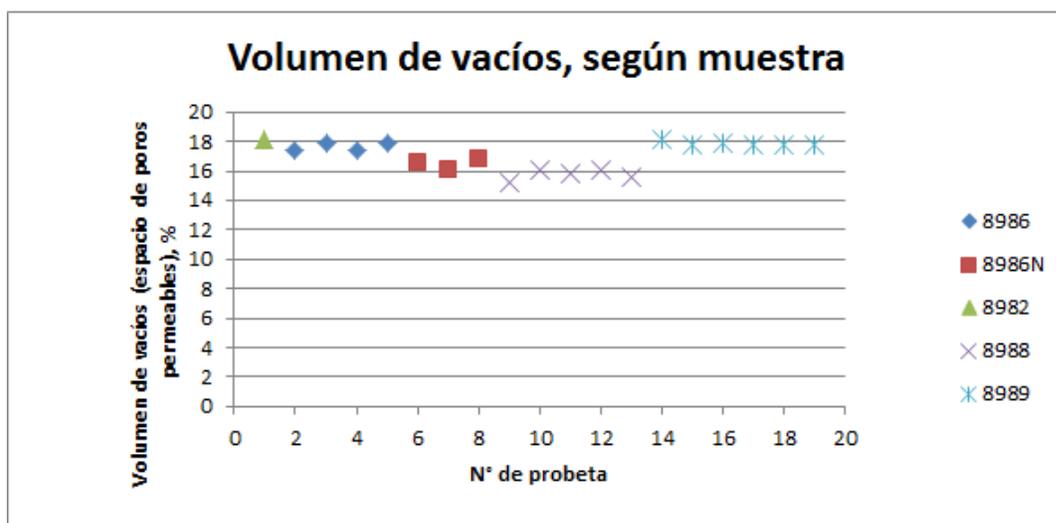


Figura 4.11: VPV, %, según muestras

### 4.2.2. RCPT

Se ensayaron 2 probetas por cada muestra (18 paneles) según el método RCPT, los cuales se promediaron para obtener resultados más representativos; la variación entre cada par de resultados se muestra en la tabla 4.3 con respecto al mayor valor de corriente transmitida. Las probetas fueron ensayadas a distintas edades, dado que la disponibilidad del laboratorio químico de IDIEM era acotada y la duración del ensayo mismo muy extenso. Esto se muestra en los gráficos 4.12 y 4.13.

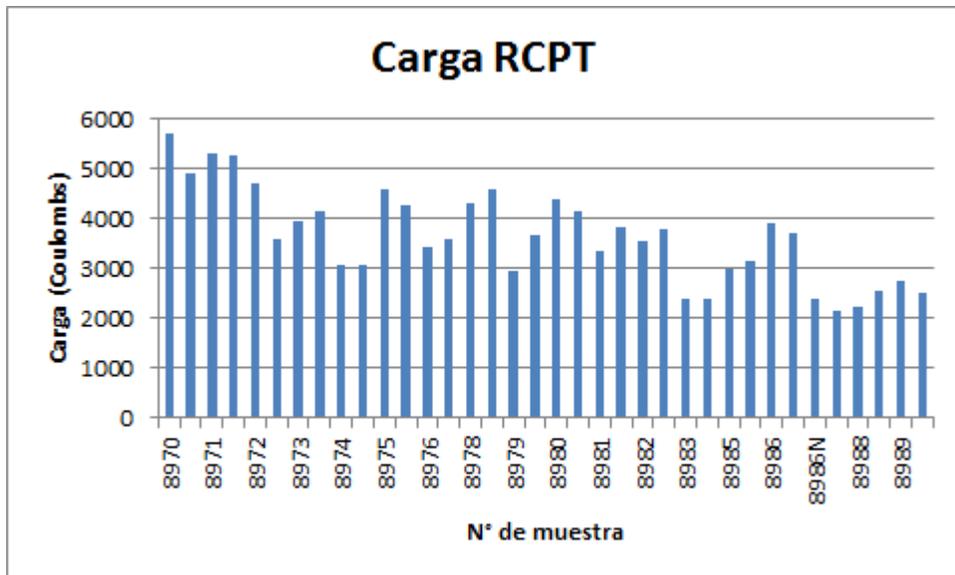


Figura 4.12: Carga RCPT, totalidad de muestras

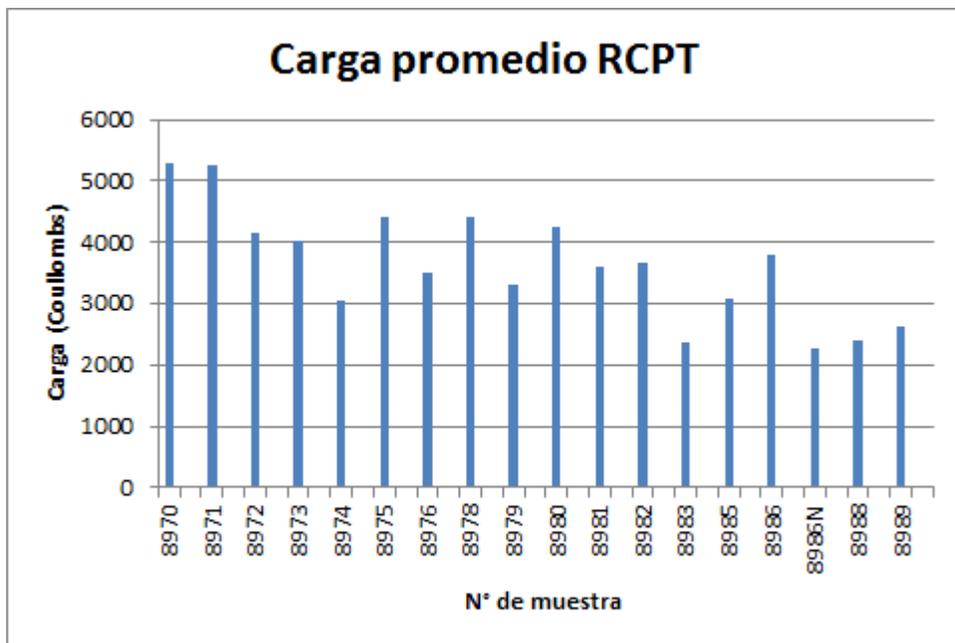


Figura 4.13: Carga RCPT, promedio por panel

Tabla 4.3: Edad y variación de ensayo RCPT

Muestra	Edad ensayo, días	Variación por panel, %
8970	60	0.14
8971	63	0.00
8972	64	0.23
8973	64	0.06
8974	68	0.00
8975	69	0.07
8976	69	0.04
8978	70	0.07
8979	70	0.20
8980	70	0.20
8981	70	0.12
8982	72	0.06
8983	73	0.00
8985	74	0.05
8986	74	0.05
8986N	74	0.10
8988	76	0.13
8989	76	0.08
<b>Mínimo</b>	60	0.00
<b>Máximo</b>	76	0.23

### 4.2.3. NT BUILD 492

Se ensayaron 3 probetas por cada panel proyectado, es decir un total de 56 probetas, con las cuales se obtuvieron 18 resultados correspondientes al promedio de los 3 resultados de cada muestra (panel).

A continuación se presenta la edad de las muestras al momento ensayarlas y el coeficientes de migración de cloruros, ver tabla 4.4 y gráfico 4.14. Todos los ensayos tuvieron una duración de 24 horas.

Tabla 4.4: Edad y coeficiente de migración de cloruros

Muestra	Edad ensayo, días	$D_{nssm} \times 10^{-12} (m^2/s)$
8970	192	11.7
8971	218	10.1
8972	216	5.9
8973	220	12.3
8974	221	11.0
8975	223	10.2
8976	222	11.8
8978	227	16.4
8979	227	12.4
8980	229	8.8
8981	238	6.2
8982	233	6.2
8983	231	8.4
8985	234	10.9
8986	229	8.6
8986N	227	8.2
8988	221	6.8
8989	225	8.7
Mínimo	192	5.9
Máximo	238	16.4

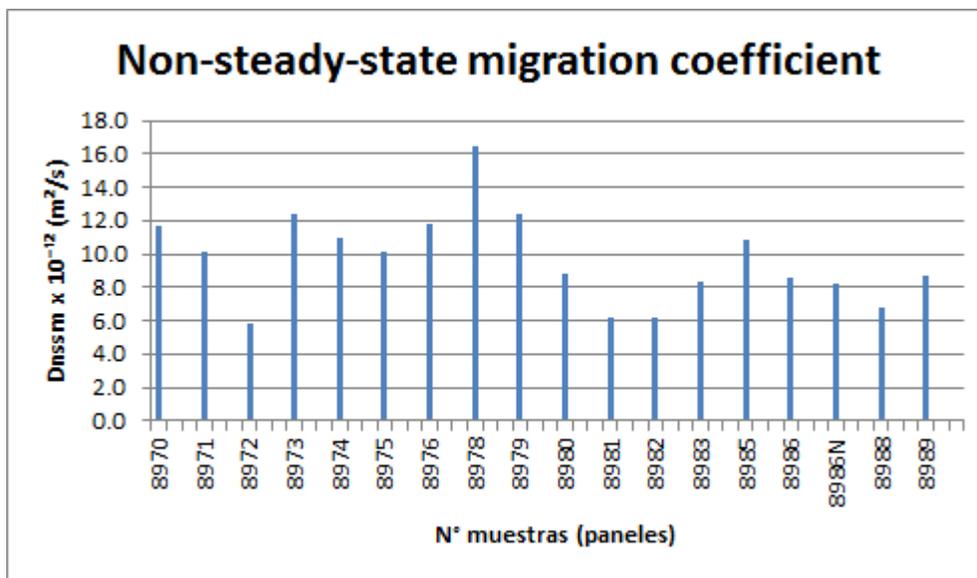


Figura 4.14: Coeficiente de migración en régimen no estacionario

# Capítulo 5

## Análisis de resultados

A continuación se analizarán los resultados presentados en el capítulo 4, mediante tablas y gráficos. Se conservará el orden expuesto anteriormente para facilitar el estudio.

Complementariamente se contrastarán los resultados con aquellos obtenidos por Venus Muñoz y Tomás Vega en sus respectivas memorias. V. Muñoz realizó los ensayos de VPV y RCPT a shotcrete en su trabajo de título “Evaluación del ensayo de volumen de vacíos permeables como método para calificar el grado de durabilidad del hormigón proyectado (shotcrete)”, mientras que T. Vega realizó los ensayos RCPT y NT BUILD 492 en su trabajo de título “Permeabilidad de cloruros en hormigones marítimos: Evaluación comparativa de métodos Nordtest NT BUILD 492 y ASTM C 1202”, donde ensayó hormigón marítimo y convencional, con y sin incorporación de fibras. Adicionalmente, las probetas ensayadas las sometió a distintos niveles de carga para su estudio en estado fisurado.

Es importante mencionar que el hormigón proyectado que ensayó V. Muñoz era muy similar al ensayado en la presente investigación, por lo tanto es adecuado un análisis comparativo; no siendo el mismo caso para los hormigones de T. Vega, sin embargo se compararán para tener valores de referencia.

A modo de comparación se muestran las siguientes tablas.

Tabla 5.1: Contraste entre shotcrete de V. Guevara y V. Muñoz

	<b>V. Guevara</b>	<b>V. Muñoz</b>
<b>Shotcrete</b>	SH30.0(90)10/FL3	SH30.0(90)10
<b>Tipo</b>	Panel	In situ
<b>Dosis cemento (<math>kg/m^3</math>)</b>	400	450
<b>w/c</b>	0.46	0.45
<b>Método de colocación</b>	Húmeda	Húmeda
<b>Aditivo acelerante</b>	Tamshot 70 AFC	Tamshot 70 AFC
<b>Densidad seca (<math>g/cm^3</math>)</b>	1.9-2.2	2.15-2.3

Tabla 5.2: Hormigones ensayados por T. Vega

Hormigón	Cemento ( $kg/cm^3$ )	Microsilice c/r cemento %	w/c	Macrofibra ( $kg/m^3$ )	$f'_c$ (Mpa)
Convencional sin fibras (HC)	384	0	0.55	0	38.4
Convencional con fibras (HCF)	384	0	0.55	3	42.2
Marítimo sin fibras (HM)	382	5.3	0.42	0	50.4
Marítimo con fibras (HMF)	382	5.3	0.42	3	58.3

## 5.1. VPV

De los resultados del ensayo VPV graficados en 4.11, se observa una diferencia menor al 3% entre el valor mínimo y máximo de la totalidad de las muestras; esto es coherente debido a que aunque la mezcla pertenecía a distintas coladas y de días diferentes, estaban confeccionadas con las mismas especificaciones y materiales.

Aunque las edades a las que se ensayaron las 19 probetas se movió entre los 58 y 79 días, no se observó ninguna tendencia predominante con respecto a este parámetro; entonces es factible descartar esta diferencia como término significativo de variabilidad.

A continuación se grafican los porcentajes de absorción previo y post ebullición del ensayo VPV, correspondiente a los valores calculados según las expresiones 4.1 y 4.2 respectivamente. Esta gráfica ayuda a visualizar las diferencias existentes entre los resultados pertenecientes a las distintas muestras, y como en particular se contrastan las 5 probetas de la muestra 8988. Adicionalmente, los resultados de absorción post ebullición son una primera aproximación para el análisis de este ensayo según la clasificación de Morgan que se detalla más adelante.

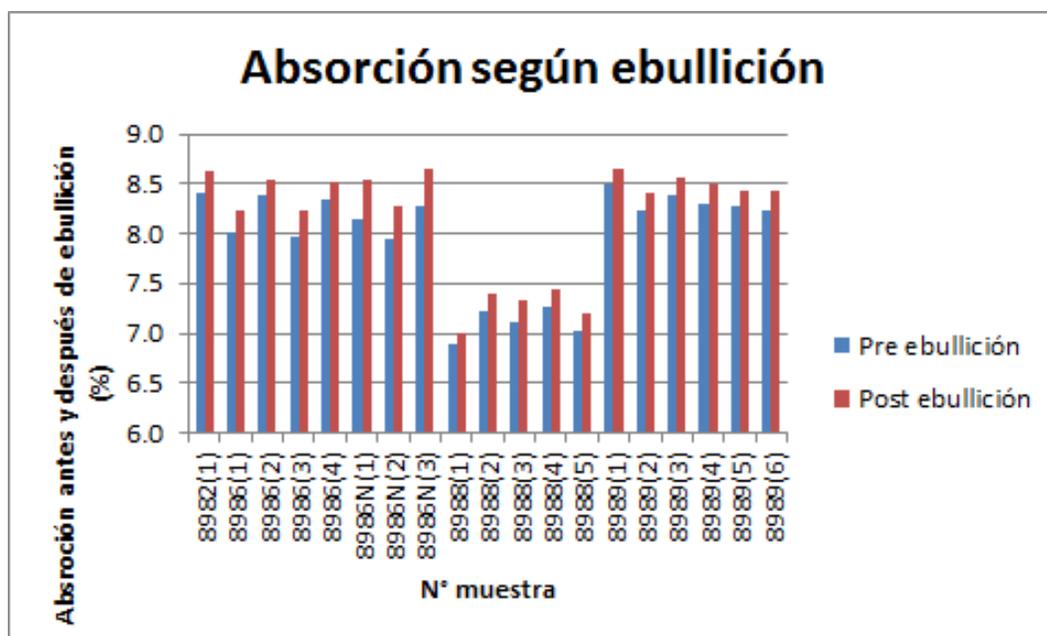


Figura 5.1: Absorción pre y post ebullición, %, por muestra

La visible diferencia entre porcentajes de absorción pre y post ebullición del agua se explica precisamente por el objetivo del ensayo. Durante la ebullición, el agua dentro de los poros del hormigón se evapora desplazando el aire contenido en ellos hacia el exterior; luego cuando se enfría la probeta sumergida post ebullición, el vapor se enfría generando una presión negativa que permite el ingreso fácil del agua en la que se está saturando, rellenando los poros de menor tamaño, que hasta ese momento habían sido inaccesibles [30]. Con el gráfico 5.2 se logra comparar las diferencias entre absorciones pre y post ebullición; esta última aumenta en alrededor del 2.7% con respecto a los valores de absorción pre ebullición.

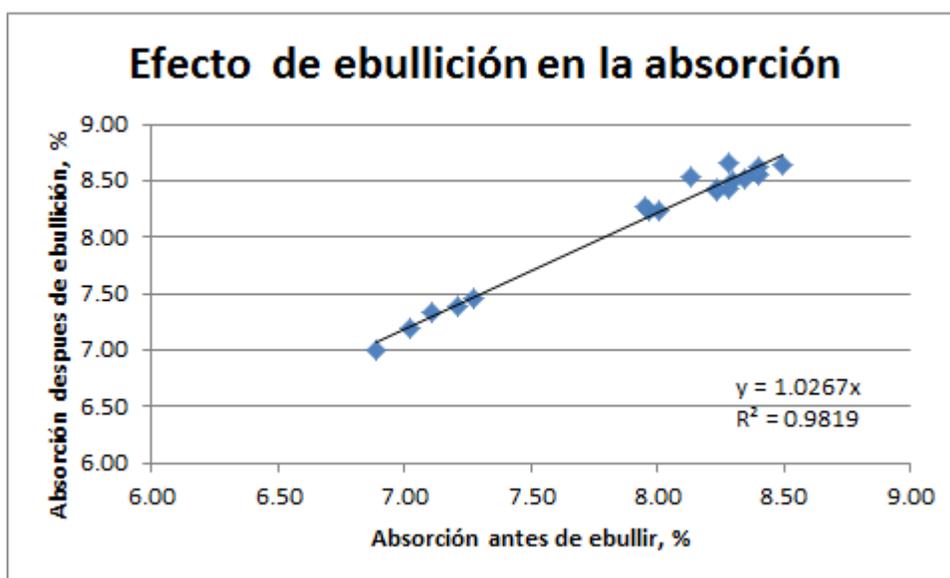


Figura 5.2: Diferencia en absorción

Según la clasificación de Morgan et al. (1987), figura 5.3, se procede a calificar al shotcrete según los resultados del ensayo.

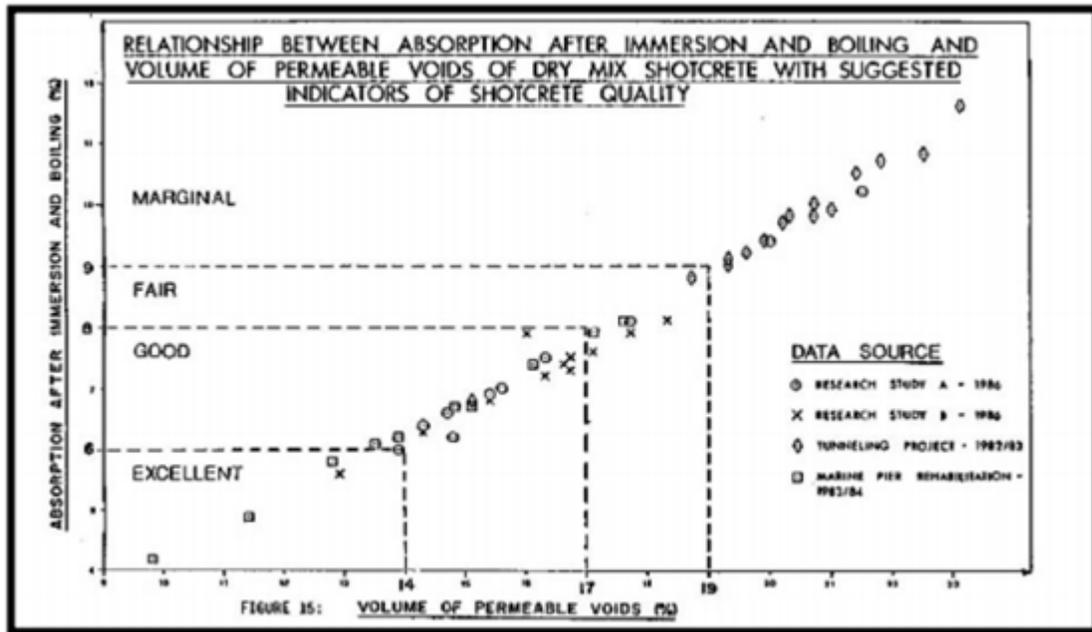


Figura 5.3: Clasificación según Morgan

Graficando los resultados de las muestras 8982, 8986, 8986N, 8988 y 8989 según clasificación de Morgan, se obtiene el gráfico de la figura 5.4, de esto se observa que los resultados de VPV oscilan entre 15.2 y 18.1%, y los de absorción post ebullición entre 7.0 y 8.7%, siendo el mínimo y máximo respectivamente. Con dichos valores se clasifica al shotcrete ensayado con calidad entre *fair* y *good* según figura 5.3. Donde el promedio total de los resultados de ambos parámetro, cae justo en la división de la clasificación *fair* y *good*.

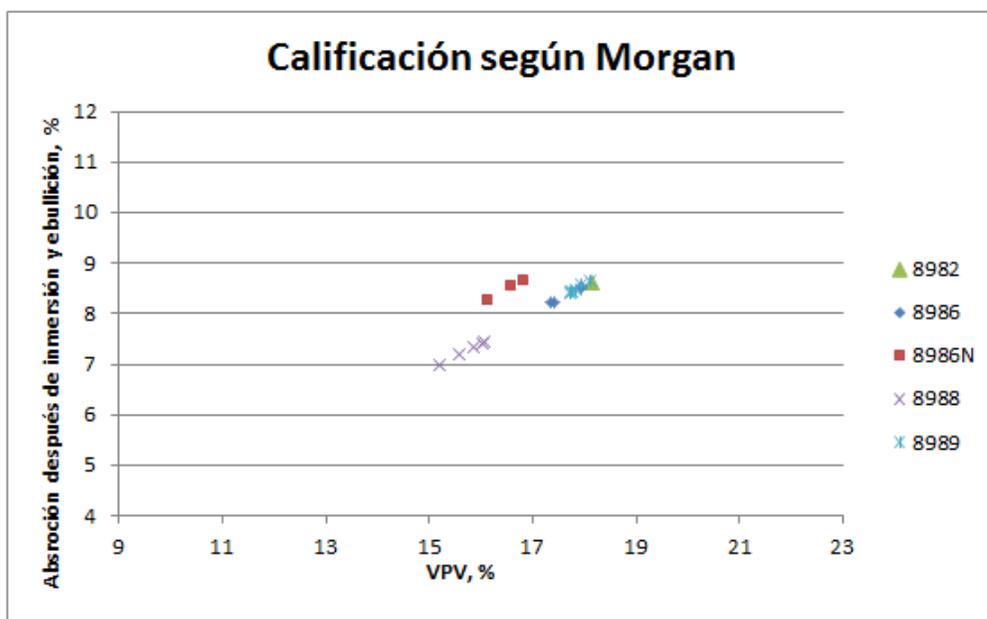


Figura 5.4: Clasificación según Morgan para muestras ensayadas

En resumen los valores promedios y desviaciones estándar son:

Tabla 5.3: Resumen ensayo VPV

	Edad ensayo (días)	VPV (%)	Absorción post ebullición (%)
Mínimo	58.0	15.2	7.0
Máximo	79.0	18.1	8.7
Promedio	62	17.1	8.0
$\sigma$	-	0.97	0.56

V. Muñoz ensayó shotcrete de 4 diferentes frentes de línea 3 de Metro, pertenecientes a estabilización de túneles y piques. Éstos tienen las mismas especificaciones técnicas y materiales utilizados entre si, sus resultados se muestran a continuación.

Tabla 5.4: Resumen ensayos V. Muñoz

Tramo línea 3 de Metro	Promedio VPV %	$\sigma$ VPV %	Absorción post ebullición % (A.P.E)	$\sigma$ A.P.E %
Pantaleón sur	18.4	1.7	8.8	1
Cortijo norte	17.3	2.4	8.3	1.4
Granada sur	17.6	1.9	8.4	1
Mery norte	17.7	1.7	8.3	0.9

Comparando los resultados de ambas investigaciones, se observa que los valores promedio de VPV de V. Muñoz están por sobre el promedio de la presente investigación, sobrepasándolo

en un rango entre 0.3 a 1.4 %, no obstante son valores muy cercanos. Coherentemente sucede lo mismo con la absorción después de ebullición. Estas diferencias podrían deberse a las variables propias de colocación, o específicamente, a que las muestras ensayadas por V. Muñoz son *in situ*, mientras que las de la presente investigación son extraídas de paneles.

## 5.2. RCPT

Respecto a las diferencias de edades al momento de ensayar, que varían en un rango de 60 a 76 días, es posible desestimar la influencia de dicho parámetro en los resultados del ensayo, dado que no se evidencia ninguna tendencia. Como bien se especifica en *Rapid chloride permeability test* de la revista *Concrete Construction* (2002) “a los 90 días y más tarde, casi no hay diferencia en la permeabilidad al cloruro entre las diversas mezclas probadas”.

Además, se analizan los resultados obtenidos del ensayo RCPT, los que se clasifican según una relación entre los valores de carga transmitida y la penetración del ion cloruro en el shotcrete. Esta clasificación está dada por la norma ASTM C 1202 como se muestra en la figura 5.5 [1].

Charge Passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4,000	High
2,000–4,000	Moderate
1,000–2,000	Low
100–1,000	Very Low
<100	Negligible

Figura 5.5: Penetrabilidad de ion cloruro basada en carga transmitida[1]

Dado que las cargas se mueven en el rango de 2256 y 5294 (C), siendo el mínimo y máximo respectivamente, es que su clasificación está entre las categorías *alta* y *moderada* penetrabilidad del ion cloruro. Sin embargo el promedio de las cargas transmitidas es de 3636 (C), lo que permite clasificar la totalidad del lote con *moderada* penetrabilidad de ion cloruro. El resumen de los resultados se muestran a continuación.

Tabla 5.5: Resumen RCPT

<b>Carga mínima, C</b>	2256
<b>Carga máxima, C</b>	5294
<b>Promedio, C</b>	3636
<b><math>\sigma</math> carga, C</b>	916
<b>Clasificación ASTM C 1202</b>	Moderada

V. Muñoz realizó el mismo ensayo a 15 probetas, sin embargo arrojaron la inexistencia de paso de carga eléctrica a través de las muestras. Claramente esto no es coherente debido al nivel de porosidad del material; V. Muñoz respaldó estos resultados con antecedentes que

indican que el hormigón con adición de microsílíce podrían acusar valores muy bajos de paso de carga. Esto no se sustenta con la actual investigación en que se utilizó la misma cantidad de adición, dosificado en un 5 % respecto al peso del cemento y sin embargo sí presenta paso de carga eléctrica.

Los ensayos presentados en la memoria de T. Vega se resumen a continuación:

Tabla 5.6: Resultados T. Vega de RCPT

Hormigón con 0 % nivel de carga	Carga eléctrica (C)	Clasificación de penetrabilidad ASTM C 1202
HC	1651	Baja
HCF	2079	Moderada
HM	611	Muy baja
HMF	532	Muy baja

Es importante destacar que T. Vega en su investigación presenta un número mayor de resultados, sin embargo estos corresponden a probetas sometidas a distintos niveles de carga a compresión con el fin de estudiar su comportamiento en estado fisurado, no obstante para efecto del presente análisis sólo se presentan los que no fueron sometidos a dichos esfuerzos previos, ya que no son comparables.

De los resultados expuesto en la tabla 5.6 no se observa una tendencia a disminuir o aumentar la capacidad de penetrabilidad de los iones cloruros en presencia de fibras, sin embargo las 2 mezclas sin fibras dan menores valores de penetrabilidad que el shotcrete ensayado en la presente investigación. Esto se debe a diversas disimilitudes que tienen las mezclas comparadas, tales como mayor resistencia a compresión y menor cantidad de cemento en el caso de las muestras de T. Vega; y valores por debajo y sobre cantidad de microsílíce y w/c en comparación a las de shotcrete.

### 5.3. NT BUILD 492

Al igual que el análisis realizado anteriormente, se estudia la influencia de la edad de las muestras en los resultados de los ensayos. El rango de diferencia de edades de las probetas ensayadas mediante el método noruego, es considerablemente mayor en comparación a los ensayos previamente vistos, correspondiendo a edades entre 192 y 238 días; sin embargo no se observó ninguna anomalía, ya que al ser éstas mayores, son menores las variaciones físicas que experimenta el hormigón.

Finalmente se califica la calidad del shotcrete según el coeficiente de migración de cloruros, mediante clasificación RILEM, ver tabla 5.6. Dado que los resultados están en el rango de  $5.9 \times 10^{-12}$  a  $16.4 \times 10^{-12}$  ( $m^2/s$ ), la calidad del shotcrete se mueve entre *good* y *poor*, aunque únicamente por sólo 1 resultado alcanza el rango de *poor* (muestra 8978). Sin embargo el

promedio alcanza un valor de  $9.7 \times 10^{-12}$  ( $m^2/s$ ), lo cual sitúa el lote de muestras en la categoría de *normal*. En la tabla 5.7 se presenta el resumen de estos resultados.

<b>Nordtest Method BUILD 492, Migration coefficient (<math>m^2/s</math>)</b>	<b>Concrete quality</b>
$< 2 \times 10^{-12}$	Very good
$2 - 8 \times 10^{-12}$	Good
$8 - 16 \times 10^{-12}$	Normal
$> 16 \times 10^{-12}$	Poor

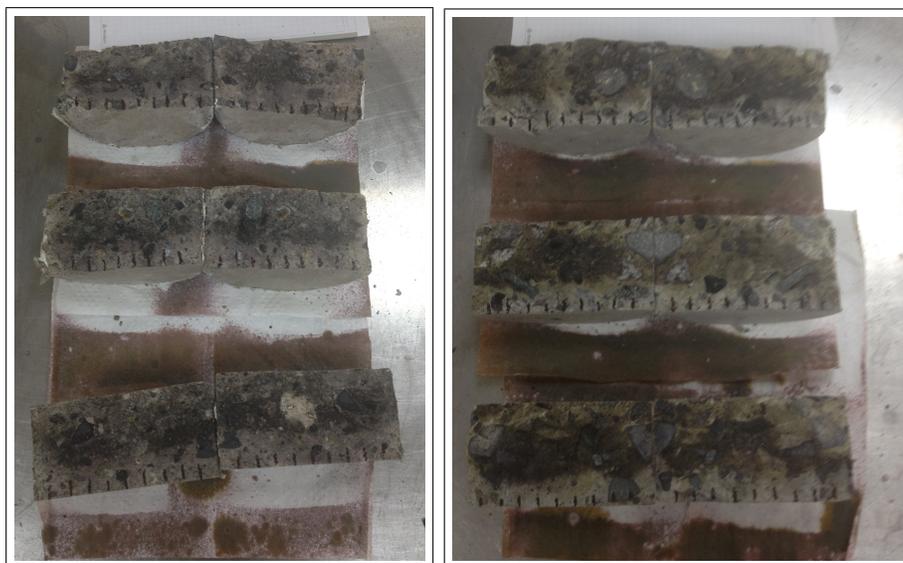
Figura 5.6: Clasificación RILEM para ensayo NT BUILD 492

Tabla 5.7: Resumen NT BUILD 492

	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Promedio</b>	$\sigma D_{nssm}$
$D_{nssm} (\times 10^{-12} m^2/s)$	5.9	16.4	9.7	2.7

A continuación se presentan fotos de los perfiles de penetración de cloruros de las probetas ensayadas, los cuales acusan anomalía si se comparan con la figura 4.10, perteneciente a la norma del ensayo, donde los perfiles no son perfectamente horizontales, pero no tienen predominancia de penetración del cloruro en ningún zona, lo que sí se observa en las probetas, especialmente en la zona circundante al manto. Una explicación sensata es que sea producto de filtración de la solución de NaCl, que es aquella en contacto directo con la cara plana inferior de las muestras, y la que cede el ion cloruro al hormigón. Sin embargo se realizó el mismo ensayo para muestras de hormigón convencional, correspondientes a proyectos de IDIEM, siguiendo exactamente el mismo procedimiento y no acusaron misma extrañeza, ver figura 5.7.

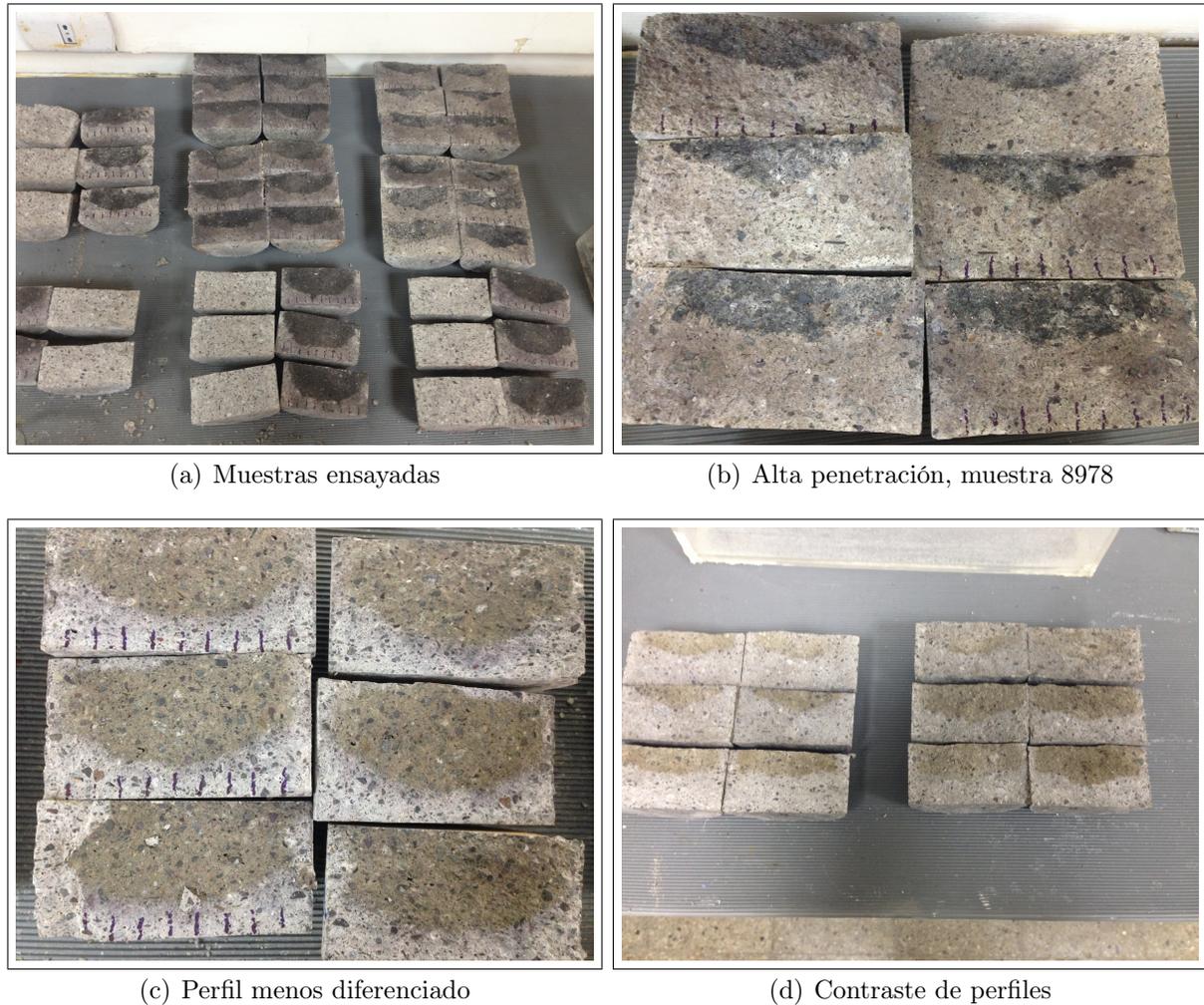
En particular la subfigura 5.8(b) da cuenta de la penetración desmesurada de la muestra 8978 que posee un coeficiente de migración de cloruros de  $16.4 \times 10^{-12}$  ( $m^2/s$ ), mayor coeficiente de la totalidad de muestras ensayadas, y única en caer en la categoría *poor*. Este resultado es aislado en cuanto al grosor del perfil de penetración y puede deberse posiblemente a una proyección deficiente en el panel, puesto que es la variable más inestable.



(a) Muestras de proyecto 1

(b) Muestras de proyecto 2

Figura 5.7: Perfiles de penetración de ion cloruro, de probetas ensayadas por IDIEM



(a) Muestras ensayadas

(b) Alta penetración, muestra 8978

(c) Perfil menos diferenciado

(d) Contraste de perfiles

Figura 5.8: Perfiles de penetración de ion cloruro

Es por esto que se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de estudiar los valores que se ajusten de manera más real a la realización del ensayo sin dicha extrañeza en los perfiles, en cuanto a las posibles filtraciones. Para esto sólo se consideran las 3 mediciones centrales del perfil ( $d_1$ ,  $d_2$  y  $d_3$ ), de un total de 7, que representa la porción relativamente homogénea de los perfiles en estudio, figura 5.9, para calcular el coeficiente de migración de cloruros modificado.

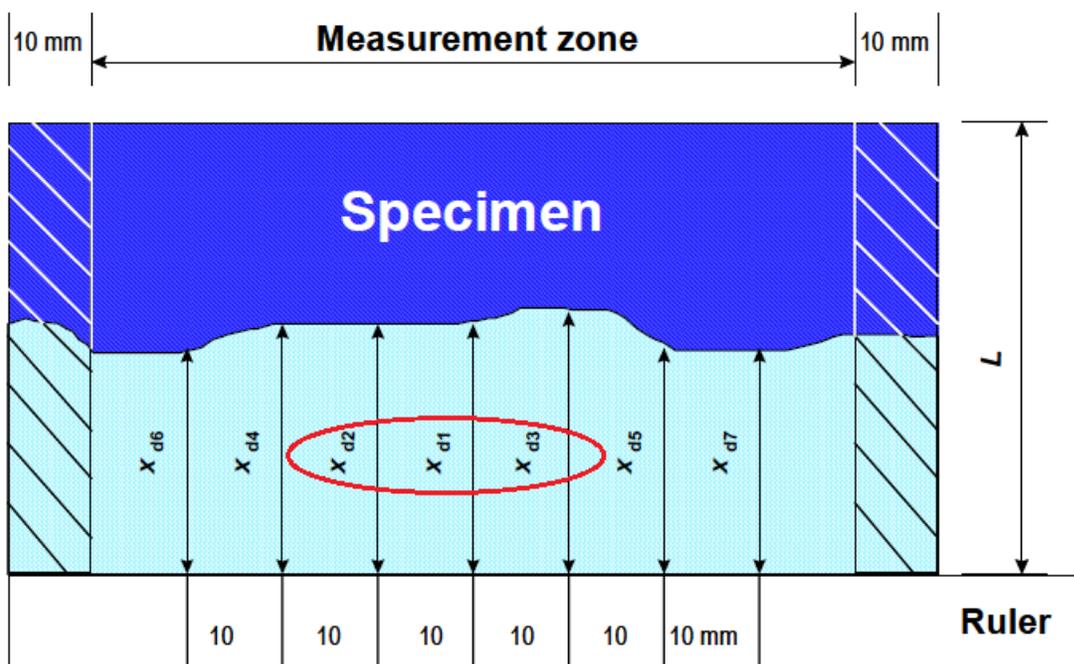


Figura 5.9: Mediciones modificadas NT BUILD 492

Realizando exactamente los mismos cálculos que para los resultados originales, se obtiene como resumen la tabla 5.8 de los resultados modificados. El único parámetro que varía en el cálculo, corresponde al promedio de profundidades de penetración,  $x_d$ .

Tabla 5.8: Resumen NT BUILD 492 modificado

	Mínimo	Máximo	Promedio	$\sigma D_{nssm}$
$D_{nssm} (\times 10^{-12} m^2/s)$ <b>Modificado</b>	4.6	15.1	8.2	2.7

Se observa que el promedio de los coeficientes de migración de cloruros disminuyó en  $1.5 \times 10^{-12} (m^2/s)$  con respecto a los valores originales, sin embargo con el nuevo promedio aún se mantiene la misma clasificación RILEM en calidad *normal*. Por otro lado, la totalidad de las muestras considerando el rango en el que se mueven, oscilan en clasificaciones solamente entre *good* y *normal*, dejando de existir el valor aislado calificado con calidad *poor*. A continuación se presentan imágenes que dan muestra de las imperfecciones del manto de las probetas, que podrían ser la causa de dichas filtraciones.

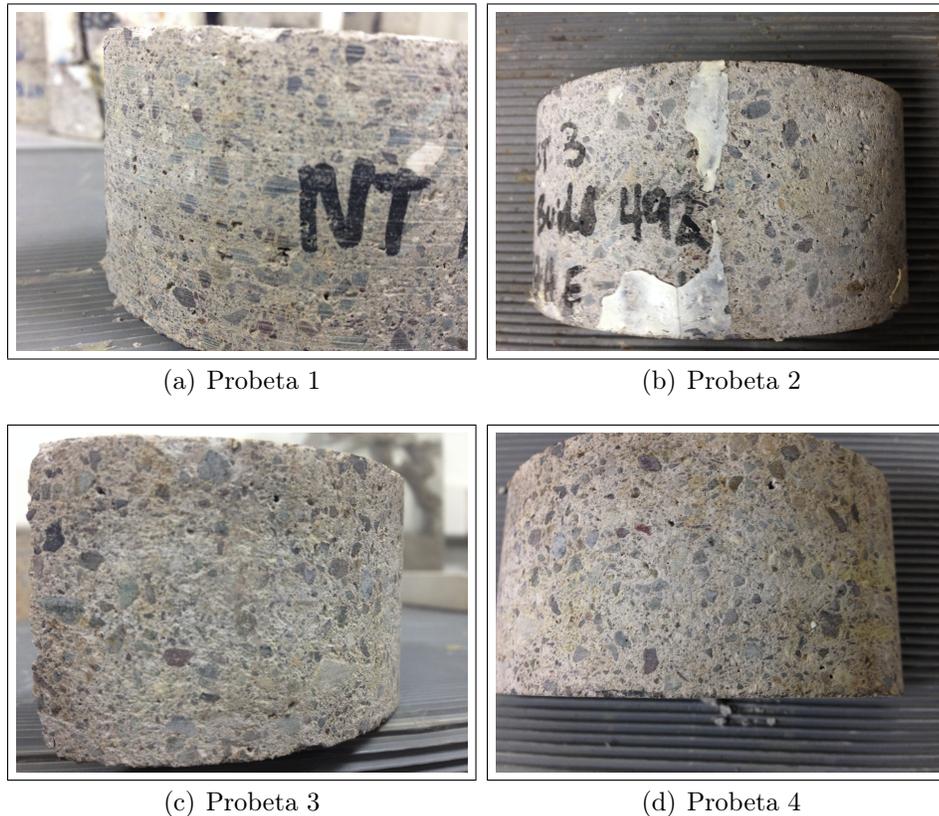


Figura 5.10: Irregularidades de manto de probetas

Por otro lado, al igual que para el ensayo RCPT, se presentan los resultados de la memoria de T. Vega, no obstante sólo se muestran aquellos con 0% de nivel de carga previo al ensayo. Estos corresponden al hormigón convencional con fibras y el hormigón marítimo con y sin fibras.

Tabla 5.9: Resultados T. Vega, ensayo NT BUILD 492

	$D_{nssm} (\times 10^{-12} m^2/s)$	<b>Clasificación RILEM: Calidad del hormigón</b>
<b>HC</b>	-	-
<b>HCF</b>	7	Good
<b>HM</b>	3.5	Good
<b>HMF</b>	0.1	Very good

Se observa en los resultados expuestos por T. Vega, que son menores a los correspondientes al shotcrete ensayado en la presente investigación, que promedian un coeficiente de migración de cloruros de  $8.2 \times 10^{-12} (m^2/s)$  en el análisis modificado, situando dichas muestras en calidad *normal*. Esto se debe, al igual que para el ensayo RCPT, a las diferencias en la dosificación del material y las grandes diferencias inherentes a la colocación entre un shotcrete con un hormigón convencional. Se observa una tendencia a aumentar la calidad en presencia de fibras y presencia de microsílíce, adición utilizada en las mezclas de hormigones marítimos, la que permite disminuir la porosidad del material.

## 5.4. Resumen de análisis de resultados

Para simplificar el estudio de las muestras ensayadas, se presentan los resultados de los 3 ensayos, juntos. De esta manera se puede observar qué tanta relación tienen entre sí, y si existe correlación entre ellos.

Tabla 5.10: Resumen resultados

	<b>VPV</b>	<b>RCPT</b>	<b>NT BUILD 492</b>
<b>Mínimo</b>	15.2	2256	4.6
<b>Máximo</b>	18.1	5294	15.1
<b>Promedio</b>	17.0	3636	8.2
$\sigma$	0.97	916	2.7
<b>Interpretación</b>	Calidad: [good-fair]	Penetrabilidad: Moderada	Calidad: Normal

A partir de la tabla 5.10 es razonable concluir una semejanza entre los distintos resultados. Aunque el ensayo VPV no mide directamente la penetrabilidad de iones cloruros, sí está íntimamente relacionado con este efecto, ya que mide un parámetro inherente a la estructura de poros que es el porcentaje de vacíos, los que son el canal directo de transporte del agente dañino. Por otro lado los ensayos RCPT y NT BUILD 492 si bien no miden el mismo parámetro, tienen similitud en sus objetivos. Por una parte RCPT entrega la cantidad de carga que viaja a través del material, no obstante la presencia de otros iones distintos al ion cloruro podrían aumentar este valor, permitiendo el paso de mayor carga, siendo así el resultado del ensayo no representativo exclusivamente de los iones en cuestión. En contraste, el ensayo NT BUILD 492 entrega el parámetro de coeficiente de migración de cloruros, mediante una inspección cuantitativa de la migración del ión cloruro, adicionalmente a diferencia del ensayo RCPT, éste sí mide exclusivamente al ion en cuestión. A continuación se presenta un gráfico de ambos resultados, para el estudio de una posible correlación.

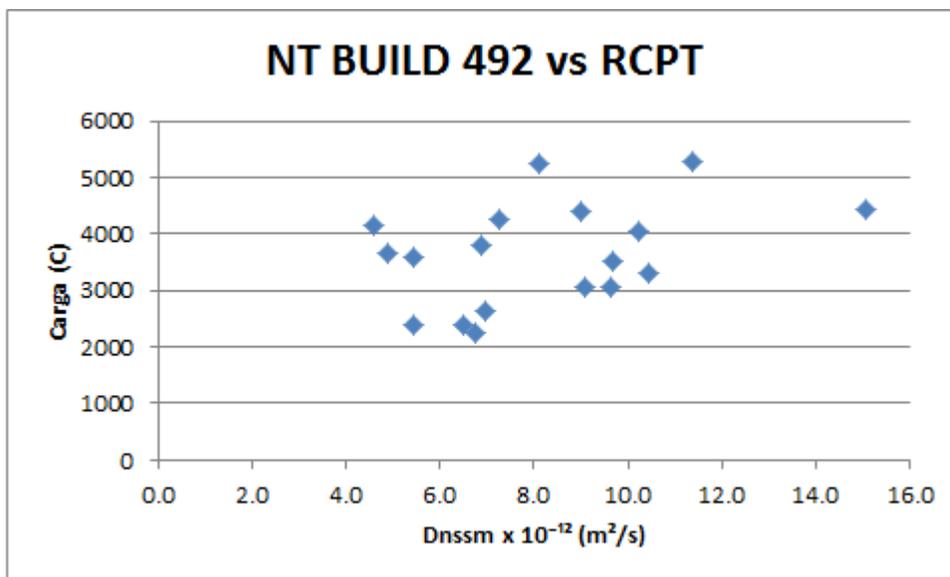


Figura 5.11: Comparación de resultados de ensayos de iones cloruro

Dada la distribución de los puntos, no es posible encontrar alguna regresión que se ajuste a los parámetros, a diferencia de T. Vega que mediante una regresión de orden 2 obtuvo un coeficiente de determinación bastante alto,  $R^2=0.95$ . Sin embargo como él mismo lo menciona, cuenta con un número de muestras muy pequeño, 9 ensayos, como para considerar representativa la expresión matemática; esto revela la necesidad de aumentar el número de ensayos a un valor mucho más elevado, ya que la investigación actual dispuso de sólo 18 resultados; en los cuales se requirió de 36 probetas para el método RCPT y 54 para NT BUILD 492.

Finalmente, se logran contrastar los resultados de V. Muñoz, ya que ambos hormigones utilizados son bastante similares. En el caso del ensayo VPV, se observa que los porcentajes de poros vacíos son muy semejantes entre sí, lo que era esperable, y que sus resultados del ensayo acelerado de penetración de cloruros, RCPT, presentaron algún error no determinable, ya que no se posee la suficiente información acerca de cómo concretamente realizó sus ensayos. Lo que sí es claro, es que los resultados de la presente investigación se acercan mayormente a lo que correspondería la realidad en cuanto a la migración de cloruros en el hormigón proyectado.

## 5.5. Recomendaciones

Dado el análisis de resultados es posible identificar algunos aspectos a mejorar, para así favorecer el estudio y encauzarlo para elaborar conclusiones más específicas a futuro.

Lo primero y más importante es encontrar e implementar un sistema que asegure la impermeabilidad de las probetas ensayadas por el método noruego NT BUILD 492. De esta manera será posible verificar si el shotcrete presenta perfiles de penetración del ion cloruro regulares o por mantos circunferenciales, observados en el perfil de penetración como curvas cóncavas. Siendo una buena alternativa adquirir los implementos, como la manga de goma

que contiene a la solución anódica, necesarios por norma, mediante empresas que se dediquen a ello. Además garantizar mediante sistemas de climatización que la temperatura del laboratorio donde se realiza este ensayo, se mantenga relativamente constante o en el rango de temperatura de 20 a 25°C.

Adicionalmente, se recomienda contar con evidencia fotográfica de los paneles proyectados con que se trabaja en un trabajo futuro; esto sería muy útil para analizar algunos puntos aislados de los gráficos que se alejan de los promedios.

Adicionalmente sería interesante el estudio del ensayo perteneciente a la norma ASTM C1202, RCPT, en muestras de shotcrete que contengan en sus materiales constituyentes iones adicionales al cloruro, como por ejemplo iones nitrito provenientes de nitrato de calcio, y así contrastarlo con misma mezcla sin presencia de éstos. De esta manera se podría entender qué tan determinante es en los resultados del ensayo que el material posea otros iones, y así cómo varía la cantidad de carga registrada.

Y por último aumentar el número de muestras ensayadas tanto en el método de RCPT como NT BUILD 492, para así encontrar posible correlación entre ambos experimentos.

# Capítulo 6

## Discusión y conclusiones

### 6.1. Discusión

A través de la presente investigación, sobre metodologías de ensayo para calificar la durabilidad del hormigón proyectado que sirvan como alternativa al método de ensayo basado en el de permeabilidad al agua del hormigón, se logra una aproximación que permite la validación de éstos para el análisis de vida útil del shotcrete. Independiente de los resultados obtenidos se logra comprender y adoptar el concepto de durabilidad como parámetro relevante, además se analizan los métodos de ensayo que actualmente se recomiendan para calificar el desempeño del shotcrete.

#### **Comparación de resultados del presente trabajo con los de V. Muñoz**

El trabajo de V. Muñoz fue el que incentivó la presente investigación, debido a las incertidumbres que quedaron con respecto al método de ensayo RCPT y la posibilidad de respaldar sus resultados del ensayo VPV.

V. Muñoz realizó en su trabajo un análisis de los ensayos VPV y RCPT realizados a hormigón proyectado provenientes de la línea 3 de Metro, mezcla utilizada en estabilización de túneles y piques. Dichos resultados son comparados con los de la memoria expuesta aquí, ya que las mezclas utilizadas en ambas investigaciones son muy parecidas entre sí.

Mediante el ensayo VPV se logra caracterizar el hormigón proyectado para su posterior análisis. Los resultados expuestos por V. Muñoz son muy similares a los realizados en la presente investigación, estando los promedios de volumen de poros permeables de ambos estudios entre 17.1 y 18.4 %, lo que respalda un correcto proceder del método. Además la similitud de la porosidad de ambas mezclas, que son muy parecidas en cuanto a materias constituyentes, proporciones y además en su especificación SH30.0(90)10, permite inferir que el shotcrete con la misma especificación nombrada, debería moverse en el mismo rango de VPV, puesto que el método de ensayo no tiene gran dispersión, además de una alta reproducibilidad.

En los ensayos de migración de cloruros de la investigación, se obtienen resultados esperados considerando la porosidad del shotcrete con que se trabaja. Sin embargo, en comparación a los resultados de V. Muñoz, no se puede afirmar nuevamente que se éstos se condicen, puesto que los de ella no acusaron traspaso de carga a través de las muestras. Esta anomalía sin embargo fue justificada en su memoria por antecedentes que indican que cuando existe la incorporación de la adición de microsíllice, los valores de RCPT son muy bajos; no obstante, el shotcrete utilizado en la presente memoria tiene incorporado la misma cantidad de adición, dosificado en un 5% con respecto al peso del cemento, y sin embargo sí presenta paso de carga eléctrica, de hecho éste es calificado con *moderada* penetrabilidad de ion cloruro.

### **Anomalías en ensayo NT BUILD 492**

El método noruego NT BUILD 492 fue efectuado con algunos inconvenientes, los que no se lograron solucionar durante el desarrollo de la investigación, éstos se atribuyen a filtración facilitada por absorción capilar del catolito, correspondiente a la solución de NaCl; esto se logró detectar de los perfiles de penetración de cloruros observados posteriormente a la aplicación de solución de nitrato de plata. Estas filtraciones pueden ser consecuencia de distintos factores que se vieron acrecentados por la baja adherencia de la huincha aislante con el material, además de la falta de ajuste de la manga de polietileno; por ejemplo el contenido de áridos de baja granulometría en el shotcrete conlleva que el volumen de pasta cemento sea mayor que en el hormigón convencional, esto se traduce en mayor área presente en el manto capaz de absorber solución de NaCl (asumiendo que los áridos no son capaces de absorber un volumen considerable) y por lo tanto existe una mayor predisposición a absorber la solución acuosa en contacto; por otro lado, el shotcrete posee mayor porcentaje de volumen de poros permeables, lo que se puede observar claramente en la superficie de las probetas ensayadas, esto genera una dificultad considerable al momento de intentar sellar el manto por sus irregularidades. Adicionalmente, las probetas al ser extraídas de paneles (no moldeadas) su superficie es aún más rugosa. Lamentablemente debido a los inconvenientes nombrados, es que los resultados obtenidos del ensayo pierden confiabilidad.

A pesar de todo, fue posible calcular nuevos resultados que se presume no estuvieron afectados a los problemas asociados a filtraciones durante el ensayo. Dichos valores arrojan un coeficiente de migración de cloruros que clasifica al material con calidad *normal*, que se asemeja mucho a la *moderada* penetrabilidad de ion cloruro del método RCPT.

### **Limitaciones de métodos de ensayo**

Luego de obtener los resultados presentados anteriormente, es necesario evaluar las limitaciones que tienen ambos métodos de ensayo de migración de cloruros. Ambos, tienen limitaciones en cuanto a la inclusión de materiales conductores, como barras de refuerzos o fibras de acero en sus probetas ensayadas, ya que la conducción se realizaría a través de éstos en lugar de la solución de poros. Además, aunque la armadura de acero esté dispuesta de manera paralela a las caras planas de las probetas, afectaría el movimiento iónico, a no ser que la penetración de iones no alcance dicha profundidad.

En particular el ensayo RCPT tiene inconveniencias relacionadas con la identificación del transporte de iones, ya que es capaz de involucrar a todos los iones presentes y no exclusivamente a los cloruros; esto genera resultados un tanto engañosos en cuanto a la

interpretación representativa del ion cloruro. Además al ser un ensayo acelerado, no entrega resultados en estado estacionario, pero sí es una manera rápida de medición que permite ser utilizada en obras, para efectos de control de calidad. Finalmente, el aumento de temperatura que experimentan las soluciones cloruro de sodio e hidróxido de sodio producto de la caída de tensión, facilita el flujo de corriente, lo que también modifica los resultados, alejándonos aún más de la realidad.

Por otra parte, el método noruego NT BUILD 492 es capaz de abordar medianamente una limitación de RCPT relacionada a la medición exclusiva de iones cloruros, a través de la medición del perfil de penetración; sin embargo si en el hormigón existe algún material conductor como el nitrato de calcio, afectaría de todos modos el gradiente de potencial del cloruro, provocando menores distancias de transporte del ion en cuestión. Adicionalmente, la limitación de la temperatura no es problema para el método noruego, de hecho en los ensayos realizados en la presente memoria queda evidenciado, presentando una variación promedio entre temperatura del anolito inicial y final, del ensayo, de 1.62 °C, valor muy bajo en comparación al ensayo RCPT. Este ensayo también entra a la categoría de ensayos acelerados, por lo tanto de igual forma puede ser utilizado como control de calidad en obras, no así el también conocido ensayo *Salt Ponding Test* que al tener una duración de 90 días no sirve para estos propósitos.

## 6.2. Conclusiones

Habiendo realizado los ensayos y obtenido los resultados correspondientes, se concluye que el método evaluado de migración de cloruros RCPT, arrojó resultados conforme a lo esperado en el hormigón proyectado. Pese a que éste acusa valores coherentes, es necesario incorporar más muestras de diferentes especificaciones, para así incrementar la densidad de datos y abarcar la mayor cantidad de dosificaciones y propiedades físicas del shotcrete, parámetros que hacen variable cada mezcla dependiendo de su propósito. Con respecto a las fallas en la implementación del método NT BUILD 492, se ratificaron las falencias por empresa COWI, especialistas en durabilidad del hormigón armado dispuesto en zonas marinas; específicamente en que la manga utilizada no cumple con los requerimientos, ni tampoco el uso de adhesivos entre ella y la probeta. La visita de integrantes de la empresa fue con motivos de validar métodos de durabilidad en Chile.

Adicionalmente con el método de ensayo VPV fue posible respaldar los resultados de V. Muñoz, de manera tal que se encontró un rango aproximado de volumen de poros permeables en que oscila el hormigón proyectado con la especificación SH30.0(90)10.

También se logra entender las limitaciones de cada uno de los métodos de ensayo, asimismo que no existe el ensayo de migración de cloruros que tenga resuelta todas las problemáticas existentes, tales como aceleración del método, interferencia en mediciones de áridos de mayor tamaño, transporte y medición de iones no deseados, superficies tratadas con sellantes o aumento de temperatura de las soluciones involucradas que provoca un aumento de flujo de carga eléctrica. Sin embargo, con conocimiento de estas limitancias es posible la elección del método más adecuado que logre ajustarse de mejor manera a cierto tipo de hormigón y

puesta en obra.

Finalmente, se puede concluir de este estudio que las metodologías evaluadas serían alternativas válidas para la especificación por desempeño de los requerimientos de durabilidad para el shotcrete. Además, que la investigación realizada aporta a la documentación actual, sin embargo está lejos de ser suficiente para el estudio del shotcrete, método constructivo que claramente seguirá incrementando su nivel de uso a causa de sus grandes virtudes.

# Capítulo 7

## Glosario

Para efectos de la presente investigación, se definen los siguientes términos y definiciones:

**Adición:** Componente para mejorar la propiedades de la mezcla de hormigón en estado fresco y/o endurecido; de naturaleza inorgánica que destacan por sus características puzolánicas o hidráulicas.

**Aditivo:** Componente para mejorar la propiedades de la mezcla de hormigón en estado fresco y/o endurecido; de naturaleza orgánica o inorgánica.

**Ánodo:** Electrodo positivo en una celda electrolítica, en que se produce la reacción de oxidación.

**Anolito:** Parte del electrólito situado cerca del ánodo.

**Cátodo:** Electrodo negativo en una celda electrolítica, en que se produce la reacción de reducción.

**Catolito:** Parte del electrólito situado cerca del cátodo.

**Caída de tensión:** Corresponde a la diferencia de potencial existente entre los extremos de un conductor.

**Curado:** Proceso consistente en mantener un contenido de humedad y temperatura en un hormigón recién colocado de modo que pueda desarrollar sus propiedades [31].

**Durabilidad:** Capacidad de una estructura o elemento de hormigón a resistir las condiciones físicas o químicas a las que va a estar expuesta durante la vida útil para la que fue proyectada [31].

**Electrólisis:** Descomposición de una sustancia en disolución por aplicación de corriente eléctrica,

**Hormigón armado:** Hormigón que en su interior cuenta con refuerzos de acero, para soportar las sollicitaciones a tracción.

**Hormigón conveccional:** Es el hormigón utilizado habitualmente en la ejecución de cualquier tipo de estructura, bien sea de obra civil, de edificación, entre otras.

**Muestra:** Fracción de mezcla de hormigón que se utiliza para, a través de ensayos, medir sus propiedades.

**NT BUILD 492:** Método noruego que busca determinar el coeficiente de migración de cloruros del hormigón, mediante método en estado no estacionario.

**Panel nulo:** Panel sin incorporación de aditivo acelerante.

**PNT:** *Penetrón Admix*, es un aditivo impermeabilizante por cristalización.

**Probeta:** Parte de la muestra que posee dimensiones y condiciones estandarizadas para ensayar según norma correspondiente.

**RCPT:** Sigla asignada a ensayo perteneciente a la norma ASTM C 1202: *Rapid chloride permeability test*, que mediante el traspaso de carga califica la penetrabilidad de ion cloruro en el hormigón.

**Reproducibilidad:** Es la capacidad de un sistema de medición, utilizado por varios operadores, para reproducir de manera uniforme la misma medición de la misma pieza, bajo las mismas condiciones.

**Semi-reacción:** Dos semi-reacciones conforman una reacción REDOX; una de ellas corresponde a la reacción de oxidación mientras que la otra la reacción de reducción.

**Testigos de hormigón:** Cilindros de hormigón extraídos de paneles standard o *in situ* de los cuales se cortan las probetas para ensayar.

**VPV:** Método de ensayo para determinar el volumen de poros permeables (Volume of permeable voids), descrito en la norma ASTM C642.

**w/c:** Relación agua/cemento (sigla en inglés: water/cement) de la mezcla de hormigón.

**BWA:** Boiled water absorption. Absorción en masa.

# Bibliografía

- [1] ASTM. *ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*, 2012.
- [2] Nordtest. *NT BUILD 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, 1999.
- [3] ASTM. *ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.
- [4] Luois-Samuel Bolduc and Marc Jolin. Shotcrete boiled water absorption, 2010.
- [5] OE Gjørsv. High strength concrete. *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete*, pages 79–97, 2008.
- [6] Lindlar/Jahn. *Method Statement Shotcrete*. Sika Services AG, Tüffenwies 16, CH-8048 Zürich, Switzerland, segunda edition, marzo 2010.
- [7] Cement Concrete and Aggregate Australia. Chloride resistance of concrete. *Google Scholar*, pages 20–29, 2009.
- [8] MA Wilson, MA Carter, and WD Hoff. British standard and rilem water absorption tests: A critical evaluation. *Materials and Structures*, 32(8):571–578, 1999.
- [9] Sanjeev Kumar Verma, Sudhir Singh Bhadauria, and Saleem Akhtar. Estimating residual service life of deteriorated reinforced concrete structures. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(5):92–96, 2013.
- [10] ACI. *Guide to curing concrete*. Reported by ACI Comitite 308.
- [11] KD Stanish, R Douglas Hooton, and MDA Thomas. *Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review*. Department of Civil Engineering, University of Toronto Toronto, Ontario, Canada, 2000.
- [12] Muñoz V. Evaluación del ensayo de volumen de vacíos permeables, con método de valoración de la durabilidad en hormigón proyectado. Master's thesis, Universidad de Chile, 2016.
- [13] Tomás Vega. Permeabilidad a cloruros en hormigones marítimo, evaluación comparativa

- de métodos nordest NT BUILD 492 y ASTM 1202. Master's thesis, Universidad de Chile, 2015.
- [14] Karla Elorza. Estudio del efecto de la incorporación de macrofibras de polipropileno en la resistencia a la penetración de ion cloruro en hormigones marítimos. Master's thesis, Universidad de Chile, 2015.
- [15] Luis Rojas Muñoz, editor. *Shotcrete: Guía chilena del hormigón proyectado*, chapter 4. ICH, segunda edición, 2015.
- [16] Lihe Zhang, Dudley Morgan, and Sidney Mindess. Comparative evaluation of transport properties of shotcrete compared to cast-in-place concrete. *ACI Materials Journal*, 113(3), 2016.
- [17] Luis Rojas Muñoz, editor. *Shotcrete: Guía chilena del hormigón proyectado*, chapter 5. ICH, segunda edición, 2015.
- [18] INN. *Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales*. Nch 148.
- [19] UNE-EN. *Hormigón proyectado: Definiciones, especificaciones y conformidad*, mayo 2008.
- [20] Luis Rojas Muñoz, editor. *Shotcrete: Guía chilena del hormigón proyectado*, chapter 7. ICH, segunda edición, 2015.
- [21] Luis Rojas Muñoz, editor. *Shotcrete: Guía chilena del hormigón proyectado*, chapter 10. ICH, segunda edición, 2015.
- [22] Luis Rojas Muñoz, editor. *Shotcrete: Guía chilena del hormigón proyectado*, chapter 3. ICH, segunda edición, 2015.
- [23] W Barry Butler, Donald J Janssen, Hannah C Schell, Joseph G Cabrera, Roy H Keck, James W Schmitt, Ramon L Carrasquillo, Mohammad S Khan, Charles F Scholer, William E Ellis Jr, et al. Guide to durable concrete. *ACI Committee 201*, 2001.
- [24] Louis-Samuel Bolduc and Marc Jolin. Shotcrete boiled water absorption, 2010.
- [25] Almeraya-Calderón F Almaral-Sánchez J.L. Calderón-Guillén J.A. Gaona-Tiburcio C y Martínez-Villafañe A. Castorena-González, J.H. Finite element model for expansive stress due to corrosion of reinforced concrete structures. *Investigación y tecnología Journal*, 12:1–7, marzo 2011.
- [26] Fong-Yuan Ma. Corrosive effects of chlorides on metals. In *Pitting Corrosion*. InTech, 2012.
- [27] Prakash Joshi and Cesar Chan. Rapid chloride permeability testing. *Concrete Construction*, 47(12):37–43, 2002.
- [28] Patrick F. McGrath and R.Doug Hooton. Re-evaluation of the aashto t259 90-day salt ponding test. *Cement and Concrete Research*, 29(8):1239 – 1248, 1999.

- [29] Luis Rojas Muñoz, editor. *Shotcrete: Guía chilena del hormigón proyectado*, chapter 1. ICH, segunda edición, 2015.
- [30] M. A. Wilson, M. A. Carter, W. D. Hoff, J.J. Jarvis, and H.D. Serali. *British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation*, volume 32. Springer Netherlands, octubre 1999.
- [31] INN. *Norma Chilena: Hormigón-Requisitos generales*, cuarta edición, 2016. NCh 170.

# Apéndice A

## Tablas(VPV)

Tabla A.1: Fecha de proyección e inicio de ensayo

Muestra	Fecha muestreo (2016)	Fecha inicio (2017)	Edad ensayo, días
8982	17-oct	04-ene	79
8986	28-oct	04-ene	68
			68
			68
8986N	28-oct	04-ene	68
			68
			68
8988	06-nov	04-ene	59
			59
			59
			59
			59
8989	07-nov	04-ene	58
			58
			58
			58
			58

Tabla A.2: Pesos descritos en capítulo 4

Muestra	A (g)	B (g)	C (g)	D (g)
<b>8982</b>	905	981	983	553
<b>8986</b>	1823	1969	1973	1109
	1310	1420	1422	798
	1519	1640	1644	926
	1702	1844	1847	1038
<b>8986N</b>	762	824	827	435
	1220	1317	1321	695
	1075	1164	1168	615
<b>8988</b>	1800	1924	1926	1097
	1650	1769	1772	1011
	2153	2306	2311	1315
	1691	1814	1817	1033
	1723	1844	1847	1051
<b>8989</b>	1307	1418	1420	796
	1700	1840	1843	1037
	1716	1860	1863	1044
	1531	1658	1661	932
	1376	1490	1492	838
	2113	2287	2291	1289

Tabla A.3: Valores de expresiones descritas en capítulo 4, de 4.1 a 4.7

Muestra	(1) %	(2) %	(3) $g/cm^3$	(4) $g/cm^3$	(5) $g/cm^3$	(6) $g/cm^3$	(7) %
<b>8982</b>	8.40	8.62	2.10	2.28	2.29	2.57	18.14
<b>8986</b>	8.01	8.23	2.11	2.28	2.28	2.55	17.36
	8.40	8.55	2.10	2.28	2.28	2.56	17.95
	7.97	8.23	2.12	2.28	2.29	2.56	17.41
	8.34	8.52	2.10	2.28	2.28	2.56	17.92
<b>8986N</b>	8.14	8.53	1.94	2.10	2.11	2.33	16.58
	7.95	8.28	1.95	2.10	2.11	2.32	16.13
	8.28	8.65	1.94	2.10	2.11	2.34	16.82
<b>8988</b>	6.89	7.00	2.17	2.32	2.32	2.56	15.20
	7.21	7.39	2.17	2.32	2.33	2.58	16.03
	7.11	7.34	2.16	2.32	2.32	2.57	15.86
	7.27	7.45	2.16	2.31	2.32	2.57	16.07
	7.02	7.20	2.16	2.32	2.32	2.56	15.58
<b>8989</b>	8.49	8.65	2.09	2.27	2.28	2.56	18.11
	8.24	8.41	2.11	2.28	2.29	2.56	17.74
	8.39	8.57	2.10	2.27	2.27	2.55	17.95
	8.30	8.49	2.10	2.27	2.28	2.56	17.83
	8.28	8.43	2.10	2.28	2.28	2.56	17.74
	8.23	8.42	2.11	2.28	2.29	2.56	17.76

# Apéndice B

## Tablas(RCPT)

Tabla B.1: Fechas relevantes del ensayo (2016-2017)

Muestra	Fecha de muestreo	Día 1 (preparación)	Día 2 (vacío)	Día 3 (Ensayo)	Edad ensayo (días)
8970	24-sep	23-nov	28-nov	29-nov	60
8971	26-sep	28-nov	29-nov	30-nov	64
8972	29-sep	30-nov	01-dic	02-dic	63
8973	30-sep	02-dic	05-dic	06-dic	64
8974	30-sep	07-dic	12-dic	13-dic	69
8975	04-oct	12-dic	14-dic	15-dic	70
8976	06-oct	14-dic	15-dic	16-dic	70
8978	07-oct	19-dic	20-dic	21-dic	74
8979	08-oct	20-dic	21-dic	23-dic	74
8980	12-oct	26-dic	27-dic	28-dic	76
8981	13-oct	27-dic	28-dic	29-dic	76
8982	17-oct	28-dic	29-dic	30-dic	73
8983	20-oct	30-dic	03-ene	04-ene	72
8985	22-oct	30-dic	04-ene	05-ene	70
8986	28-oct	09-ene	10-ene	11-ene	74
8986N	28-oct	05-ene	09-ene	10-ene	70
8988	06-nov	13-ene	16-ene	17-ene	69
8989	07-nov	13-ene	17-ene	18-ene	68

Tabla B.2: Mediciones muestra: 8970

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	23	3,2	22	2,9
30	24,8	3,7	24,8	3,4
60	27,9	4,2	28	3,8
120	30,6	4,8	30,4	4,3
180	33,9	5,4	33,5	4,7
240	37,5	6,1	37,1	5,3
300	41,2	6,7	39,2	5,8
360	45,7	7,3	43,8	6,2
420	47,2	7,8	44,6	6,6
480	51,6	8,4	48,7	7
540	54,4	8,8	52	7,3
600	56,9	9,4	54,6	7,6
660	61	9,8	55,7	7,9
Carga (C)	5695		4893	
Promedio	5294			

Tabla B.3: Mediciones muestra: 8971

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	21,9	3,3	22,2	3,2
30	25	3,9	25,9	3,8
60	28,2	4,4	29,2	4,3
120	30,6	4,8	31,1	4,7
180	32,9	5,2	34,1	5,2
240	35	5,7	36	5,7
300	38,8	6,2	38,6	6,2
360	41,2	6,6	41,9	6,6
420	46,2	7	46,8	7
480	48,2	7,4	49,4	7,5
540	51,6	7,9	51,7	7,8
600	53,6	8,2	54	8,2
660	56,2	8,5	56,1	8,6
Carga (C)	5270		5249	
Promedio	5260			

Tabla B.4: Mediciones muestra: 8972

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	23.1	3.8	23	2.5
30	26.1	3.4	25	2.8
60	29.2	3.9	28.4	3.2
120	31	4.2	30	3.4
180	34.1	4.7	32.9	3.7
240	37.2	5.1	34.1	4.0
300	38.6	5.5	35.7	4.3
360	40.6	5.8	39.5	4.5
420	44.3	6.2	41.8	4.7
480	46.4	6.6	43.2	4.8
540	49.1	6.9	44.8	5.1
600	52.5	7.2	46.3	5.4
660	54	7.6	48	5.6
Carga (C)	4694		3596	
Promedio	4145			

Tabla B.5: Mediciones muestra: 8973

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	22.8	2.6	23.5	2.6
30	25.2	2.9	25.6	3
60	27.5	3.2	28.2	3.3
120	29.4	3.5	30	3.7
180	32.0	3.8	32.4	4
240	34.2	4.2	35	4.4
300	36.2	4.5	37	4.8
360	38.5	4.8	39.9	5.1
420	41.4	5.2	42.9	5.6
480	42.6	5.5	46	5.9
540	46.2	5.9	48	6.3
600	48.6	6.3	50.3	6.7
660	50.9	6.6	52.4	7.1
Carga (C)	3917		4151	
Promedio	4034			

Tabla B.6: Mediciones muestra: 8974

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	23.1	2.1	23.3	2.1
30	24.9	2.2	25.3	2.4
60	26.4	2.6	26.4	2.6
120	28.6	2.9	28.4	2.9
180	30.4	3.1	29.8	3
240	31.8	3.3	32	3.3
300	33.5	3.5	34.2	3.5
360	34.6	3.7	35.2	3.7
420	37.5	4	38.1	4
480	39.6	4.3	40	4.3
540	41.2	4.5	42	4.5
600	43.3	4.7	43.2	4.7
660	44.8	4.9	45.3	5.0
Carga (C)	3067		3056	
Promedio	3062			

Tabla B.7: Mediciones muestra: 8975

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	22.5	2.7	23	2.6
30	24.9	3.2	25.9	3.1
60	27.7	3.5	27.5	3.4
120	30	4	30.1	3.8
180	31.5	4.3	32	4.1
240	34	4.7	35	4.3
300	36.5	5.2	37	4.9
360	40	5.6	39	5.2
420	42	6.1	41.5	5.8
480	47	6.6	45	6.1
540	47.7	7.1	47.2	6.5
600	49.4	7.6	48	6.9
660	53.9	8.2	52.2	7.4
Carga (C)	4561		4255	
Promedio	4408			

Tabla B.8: Mediciones muestra: 8976

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	22.2	2.5	21.6	2.3
30	23.9	2.8	24.1	2.7
60	26.3	3	26.4	2.9
120	28.3	3.3	28.4	3.2
180	31	3.5	30.4	3.4
240	33.2	3.8	32	3.7
300	35	4.2	35.6	3.9
360	37.5	4.4	36.7	4.2
420	39.4	4.8	38.8	4.5
480	43	5	44	4.8
540	45	5.3	46.2	5.1
600	47.9	5.6	47.3	5.3
660	48.8	5.8	49.2	5.6
Carga (C)	3589		3431	
Promedio	3510			

Tabla B.9: Mediciones muestra: 8978

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	22.4	2.5	23	2.7
30	25.5	3	25.8	3.2
60	27.2	3.3	27.4	3.6
120	30	3.6	30	3.9
180	32.1	4	32.4	4.3
240	33.8	4.4	33.8	4.7
300	37.7	4.8	38	5.2
360	42.5	5.3	43	5.7
420	45	5.7	46.1	6.1
480	47.5	6.2	48.4	6.6
540	50.4	6.8	51.8	7.2
600	52.3	7.2	53.9	7.7
660	55.2	7.7	56.2	8.1
Carga (C)	4277		4579	
Promedio	4428			

Tabla B.10: Mediciones muestra: 8979

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	23.9	2.1	23.9	2.3
30	25.8	2.5	26.1	2.7
60		2.6		3
120	29.8	2.6	31.2	3.3
180	31.4	3	32.7	3.6
240	33.3	3.2	35.6	3.9
300	35.9	2.9	38.3	4.3
360	36.8	3.7	40	4.5
420	38.1	3.9	42.3	4.8
480	40.3	4	44.5	5.3
540	41.5	4.3	46.9	5.6
600	43	4.6	49	5.9
660	45	4.8	51.2	6.4
Carga (C)	2934		3676	
Promedio	3305			

Tabla B.11: Mediciones muestra: 8980

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	24.8	2.8	25.4	2.7
30	27.1	3.3	28.9	3.1
60	29.5	3.6	31.1	3.4
120	32.2	4.1	33.5	3.7
180	34.8	4.3	37.2	4.1
240	38.2	4.7	38.9	4.4
300	39.4	5.2	41	4.7
360	42	5.3	42.5	5.1
420	44	5.8	44	5.5
480	47.1	6.3	47	5.9
540	48.1	6.4	48.9	6.2
600	50.7	6.8	52.1	6.5
660	52	7	53.2	6.8
Carga (C)	4370		4129	
Promedio	4250			

Tabla B.12: Mediciones muestra: 8981

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	24.4	2.5	25.9	2.8
30	26.5	2.8	28.7	3.2
60	29	3	30.5	3.5
120	31	3.3	32	3.8
180	32.2	3.4	34	4
240	34	3.7	36	4.1
300	36.1	3.9	38.8	4.5
360	38.2	4.2	40	4.6
420	40	4.3	42.5	5
480	41.8	4.4	43.2	5.2
540	42.5	4.7	44.9	5.4
600	45	5.1	46.9	5.6
660	46.8	5.2	48.9	5.8
Carga (C)	3359		3830	
Promedio	3595			

Tabla B.13: Mediciones muestra: 8982

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	24.5	2.5	24.4	2.5
30	27	2.8	27.5	3
60	29	3.1	29.5	3.2
120	31.3	3.3	31.5	3.4
180	33	3.6	33.6	3.8
240	35	3.9	36	4.1
300		4.2		4.4
360	39	4.4	40.5	4.7
420	40.4	4.5	42.9	5
480	41.9	4.8	43.9	5.2
540	44.2	5.2	46.1	5.5
600		5.5		5.8
660	46.9	5.5	49.8	6
Carga (C)	3550		3769	
Promedio	3660			

Tabla B.14: Mediciones muestra: 8983

Tiempo (min)	Probeta 1		Probeta 2	
	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	24.5	1.9	24.5	1.8
30	25.9	2	26	2
60	28	2.1	28	2.2
120	28.9	2.3	29.4	2.3
180	31.1	2.5	31.3	2.5
240	32.1	2.6	33	2.6
300	33.5	2.7	33.8	2.7
360	34.2	2.9	35	2.9
420	35.1	3	36	3
480	37	3.2	37.7	3.2
540	38	3.4	38.9	3.3
600	39	3.6	40	3.6
660	40	3.6	42	3.7
Carga (C)	2380		2380	
Promedio	2380			

Tabla B.15: Mediciones muestra: 8985

Tiempo (min)	Probeta 1		Probeta 2	
	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	24.5	2.1	25	2.1
30	26.5	2.4	27.1	2.5
60	28.1	2.6	29.5	2.7
120	30.2	2.8	31.7	2.9
180	33	3	34.5	3.2
240	34.5	3.2	36.5	3.4
300	35.5	3.4	37.9	3.6
360	37.9	3.7	39.4	3.9
420	39.5	3.9	42.	4.1
480	40.3	4.1	43.5	4.4
540	42	4.4	45	4.6
600	44.1	4.6	46.5	4.8
660	45.5	4.8	48.4	5.1
Carga (C)	2992		3146	
Promedio	3069			

Tabla B.16: Mediciones muestra: 8986

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	23.9	2.6	23.9	2.5
30	26.8	3	26.8	2.9
60	29	3.2	28.5	3.1
120	31.2	3.5	31.2	3.4
180	33	3.8	33.5	3.6
240	35.5	4.2	35.8	3.9
300	39	4.5	38.3	4.3
360	41.5	4.8	42.1	4.6
420	42	5.1	42.8	4.8
480	45.5	5.5	44.9	5
540	47.5	5.8	47	5.5
600	49.8	6.1	49	5.8
660	51.3	6.5	50.8	6
Carga (C)	3892		3683	
Promedio	3788			

Tabla B.17: Mediciones muestra: 8986N

	Probeta 1		Probeta 2	
Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	24	1.7	23.8	1.6
30		2.1		1.8
60	27.9	2.2	27.2	1.9
120	29.9	2.3	29.2	2.1
180	30.5	2.4	30.5	2.2
240	32.1	2.5	31.8	2.3
300	33	2.7	34	2.5
360	35.2	2.8	35.6	2.6
420	37	3	36.8	2.7
480	38	3.2	38.4	2.9
540	39.4	3.4	39.5	3
600	40.6	3.7	41	3.1
660	41.3	3.8	42.5	3.4
Carga (C)	2380		2131	
Promedio	2256			

Tabla B.18: Mediciones muestra: 8988

Tiempo (min)	Probeta 1		Probeta 2	
	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	25.9	1.7	25.9	1.9
30	27	1.9	26.9	2.1
60	28.5	2	29	2.3
120	30.7	2.2	31	2.5
180	33	2.3	34	2.6
240	33.8	2.4	34.9	2.8
300	35	2.6	36.1	3
360	36	2.7	37.8	3.2
420	38	2.9	39.5	3.3
480	38.9	3	40.5	3.4
540	40.2	3.1	42	3.6
600		3.3		3,7
660	42.2	3.4	44.7	4
Carga (C)	2228		2552	
Promedio	2390			

Tabla B.19: Mediciones muestra: 8989

Tiempo (min)	Probeta 1		Probeta 2	
	Temperatura (°C)	Lectura (mV)	Temperatura (°C)	Lectura (mV)
0	25.9	2	26	1.9
30	28.5	2.3	28.9	2.1
60	30.5	2.4	31	2.3
120	32.3	2.6	32.5	2.4
180	33.7	2.8	34.2	2.6
240	35.3	2.9	35.5	2.7
300	37.5	3.2	37.5	2.9
360	38.8	3.4	39	3.1
420	40	3.5	40.2	3.2
480	42.5	3.7	42.5	3.4
540	43	3.9	43.2	3.6
600	44.9	4.1	44.5	3.7
660	45.8	4.2	44.5	3.9
Carga (C)	2729		2513	
Promedio	2621			

Tabla B.20: Resumen carga eléctrica de ensayo

Muestra	Carga (C)	Promedio carga (C)	Interp. ASTM C1202
<b>8970</b>	5695 4893	5294	Alta
<b>8971</b>	5270 5249	5260	Alta
<b>8972</b>	4694 3596	4145	Alta
<b>8973</b>	3917 4151	4034	Alta
<b>8974</b>	3067 3056	3062	Moderada
<b>8975</b>	4561 4255	4408	Alta
<b>8976</b>	3431 3589	3510	Moderada
<b>8978</b>	4277 4579	4428	Alta
<b>8979</b>	2934 3676	3305	Moderada
<b>8980</b>	4370 4129	4250	Alta
<b>8981</b>	3359 3830	3595	Moderada
<b>8982</b>	3550 3769	3660	Moderada
<b>8983</b>	2380 2380	2380	Moderada
<b>8985</b>	2992 3146	3069	Moderada
<b>8986</b>	3892 3683	3788	Moderada
<b>8986N</b>	2380 2131	2256	Moderada
<b>8988</b>	2228 2552	2390	Moderada
<b>8989</b>	2729 2513	2621	Moderada

# Apéndice C

## Tablas(NTBUILD492)

Tabla C.1: Datos iniciales y finales (1)

Muestra	U(V)	$I_i$ (mA)	$I_f$ (mA)	$T_i$ °C	$T_f$ °C	$T$ °C	L(mm)
<b>8970</b>	25	50.2	98.8	21	22	21.7	49.5
	25	50.2	91.6	21	22	21.5	50
	25	53.8	87.7	21	22	21.3	49.5
<b>8971</b>	30	53.7	95.7	18	21	19.3	49.75
	30	58.8	108.8	18	21	19.4	49
	30	63.5	93.7	18	21	19.5	46.25
<b>8972</b>	30	44.2	61.5	19	20	19.6	49.5
	30	40.8	64.0	19	20	19.6	49.75
	35	46.5	78.9	19	20	19.7	49.75
<b>8973</b>	30	53.2	101.8	18	22	20	50.5
	30	57.8	112.0	18	22	20.1	48.5
	30	54.0	99.9	18	22	19.9	49.75
<b>8974</b>	30	40.8	73.5	20	22	21.2	50.5
	30	47.4	95.9	20	22	21.2	47.5
	30	58.3	118.5	20	23	21.3	51.5
<b>8975</b>	25	54.9	89.3	18	20	19.2	47
	30	50.4	97.5	18	20	18.9	50
	30	52.9	85.0	18	20	19.2	50.5
<b>8976</b>	30	56.6	92.0	21	20	20.2	47.5
	30	55	98.7	21	20	20.2	50
	30	56.2	92.8	21	20	20.2	50.5
<b>8978</b>	25	56.3	94.9	16	19	17.6	50.75
	30	55.6	117.1	17	19	18.4	49
	30	59.3	110.0	16	19	17.6	51.5
<b>8979</b>	25	51.9	87.8	22	19	20.5	50.75
	25	50.8	80.1	22	19	20.6	51
	30	51.3	86.7	22	19	20.8	50.5

Tabla C.2: Datos iniciales y finales (2)

Muestra	U(V)	$I_i$ (mA)	$I_f$ (mA)	$T_i^{\circ}C$	$T_f^{\circ}C$	$T^{\circ}$	L(mm)
<b>8980</b>	30	53.7	87.2	17	18	17.6	47.5
	30	55.1	85.0	18	18	17.8	47
<b>8981</b>	30	40.2	72.0	17	19	17.7	48.5
	35	43.4	72.6	17	19	17.8	49.75
	30	40.6	70.1	17	19	17.9	49.75
<b>8982</b>	30	47.7	71.0	17	18	17.4	48
	35	44.3	77.7	17	18	17.4	50
	30	47.3	58.9	19	18	18.3	52
<b>8983</b>	30	45.2	71.3	17	17	17	51.5
	30	47.1	76.1	17	17	17.2	48.75
	30	46.7	66.6	17	17	17.3	48.5
<b>8985</b>	30	52.5	86.4	18	19	18.6	50.5
	30	48.3	79.6	17	19	18.1	52.5
	30	54.7	96.5	18	19	18.4	48.75
<b>8986</b>	30	49.9	74.2	19	18	18.7	48.5
	30	51.8	74.9	19	18	18.6	50.5
	30	45.4	72.3	19	18	18.8	48
<b>8986N</b>	35	43	79.8	18	18	18.1	48
	35	43	79	18	18	17.8	50
	35	44.6	89.1	19	18	18.4	49.75
<b>8988</b>	35	46.4	63.8	19	17	18.2	53
	35	44.1	61.6	19	18	18.4	52.5
	35	44.1	62.7	19	18	18.2	49.5
<b>8989</b>	30	45.8	70.8	18	18	17.9	52.5
	30	48.5	79.2	19	17	18	48.25
	30	49.4	97.1	18	18	18.1	49

Tabla C.3: Mediciones perfil de penetración (1)

Muestra	d6	d4	d2	d1	d3	d5	d7	$x_d$ (mm)
<b>8970</b>	21.0	23.0	22.0	23.0	21.0	21.1	20.0	21.6
	19.0	19.0	19.0	19.0	20.0	20.0	19.0	19.3
	37.0	22.0	21.0	21.0	20.0	19.0	20.0	22.9
<b>8971</b>	30.0	18.5	14.5	16.5	17.5	20.5	29.0	20.9
	30.0	24.5	23.0	19.0	20.5	26.5	33.5	25.3
	30.0	23.0	18.0	18.0	18.5	19.0	26.0	21.8
<b>8972</b>	21.5	14.0	11.5	10.5	12.0	12.0	18.0	14.2
	19.5	14.0	9.5	9.7	9.6	8.5	17.5	12.6
	16.0	13.5	12.0	12.8	13.5	14.0	24.0	15.1
<b>8973</b>	32.0	26.0	20.0	19.5	20.5	23.5	33.0	24.9
	33.5	27.0	21.0	21.0	24.0	30.5	36.5	27.6
	30.0	24.5	24.0	25.0	26.5	28.0	35.0	27.6
<b>8974</b>	23.0	20.0	17.5	16.5	16.0	19.5	24.0	19.5
	26.0	23.0	20.5	21.0	22.5	22.0	27.5	23.2
	36.0	31.5	22.5	25.5	26.5	28.0	29.0	28.4
<b>8975</b>	24.0	21.0	21.5	20.0	21.0	22.5	25.5	22.2
	24.5	20.0	17.5	17.0	19.5	20.0	26.0	20.6
	26.5	22.0	19.0	17.0	16.5	20.5	23.0	20.6
<b>8976</b>	32.0	25.5	21.5	20.0	20.5	27.5	31.0	25.4
	33.0	29.0	24.0	20.0	20.5	26.0	34.5	26.7
	28.5	26.0	22.5	20.5	22.5	25.0	30.5	25.1
<b>8978</b>	33.5	30.5	29.0	31.0	30.0	32.0	36.5	31.5
	40.5	37.5	34.0	29.0	31.5	34.5	39.0	35.1
	36.0	31.5	30.0	27.5	28.5	32.5	34.5	31.5
<b>8979</b>	28.5	26.0	20.0	18.5	18.5	24.5	25.5	23.1
	27.5	24.5	19.5	19.0	22.0	22.5	26.0	23.0
	27.5	22.5	21.0	20.5	20.0	22.5	33.0	23.9
<b>8980</b>	24.0	20.0	18.0	16.5	17.5	19.0	24.5	19.9
	25.5	20.0	16.5	17.5	16.0	22.5	28.0	20.9
<b>8981</b>	16.5	13.5	12.0	12.5	12.0	11.5	16.5	13.5
	19.0	12.0	12.5	13.0	13.0	14.5	19.0	14.7
	20.0	14.5	14.0	14.0	15.0	15.0	20.0	16.1

Tabla C.4: Mediciones perfil de penetración (2)

Muestra	d6	d4	d2	d1	d3	d5	d7	$x_d(\text{mm})$
<b>8982</b>	17.5	14.5	12.5	11.0	12.5	16.5	23.5	15.4
	18.5	15.0	12.0	12.5	12.5	15.5	24.0	15.7
	16.5	12.0	11.0	11.0	11.0	12.5	18.5	13.2
<b>8983</b>	21.5	16.5	15.0	14.5	15.0	22.0	29.0	19.1
	26.5	21.5	16.0	16.5	16.5	19.5	24.5	20.1
	22.5	16.0	13.0	13.0	13.5	15.5	24.0	16.8
<b>8985</b>	30.0	22.0	20.0	19.5	22.0	27.0	32.5	24.7
	25.5	20.5	18.5	17.5	16.5	19.5	28.0	20.9
	27.0	22.0	21.0	19.5	24.0	27.5	33.5	24.9
<b>8986</b>	26.0	18.0	16.0	15.5	16.5	17.5	23.5	19.0
	28.0	20.0	18.5	14.5	16.0	16.5	28.5	20.3
	24.0	18.5	15.0	14.0	14.5	17.5	25.0	18.4
<b>8986N</b>	29.0	19.0	17.0	15.0	17.5	20.0	29.0	20.9
	31.0	20.0	18.5	18.5	19.0	19.0	25.0	21.6
	25.5	20.0	19.5	16.5	18.0	21.0	28.5	21.3
<b>8988</b>	22.5	18.0	14.5	14.0	15.0	16.5	23.0	17.6
	20.5	15.0	14.5	12.0	14.0	26.5	21.0	17.6
	20.0	15.5	14.0	13.0	14.0	14.5	18.5	15.6
<b>8989</b>	22.0	16.5	15.0	14.0	13.0	16.5	20.0	16.7
	29.0	19.5	18.5	19.0	18.0	24.0	30.0	22.6
	27.5	18.0	14.5	14.0	15.0	17.5	23.0	18.5
<b>Promedio</b>	26.1	20.7	18.2	17.5	18.2	20.9	26.4	21.1

Tabla C.5: Resultados finales (1)

Muestra	$D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	Promedio $D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	Interpretación <b>RILEM</b>
<b>8970</b>	11.9 10.6 12.6	11.7	normal
<b>8971</b>	9.5 11.5 9.3	10.1	normal
<b>8972</b>	6.3 5.5 5.8	5.9	good
<b>8973</b>	11.7 12.5 12.8	12.3	normal
<b>8974</b>	9.0 10.3 13.7	11.0	normal
<b>8975</b>	11.6 9.4 9.5	10.2	normal
<b>8976</b>	11.3 12.5 11.8	11.8	normal
<b>8978</b>	18.0 16.2 15.1	16.4	poor
<b>8979</b>	13.0 13.0 11.2	12.4	normal
<b>8980</b>	8.6 9.0	8.8	normal
<b>8981</b>	5.8 5.6 7.2	6.2	good

Tabla C.6: Resultados finales (2)

<b>Muestra</b>	$D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	<b>Promedio</b> $D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	<b>Interpretación</b> <b>RILEM</b>
<b>8982</b>	6.6 6.0 6.0	6.2	good
<b>8983</b>	8.9 8.9 7.3	8.4	normal
<b>8985</b>	11.5 10.0 11.2	10.9	normal
<b>8986</b>	8.4 9.3 8.0	8.6	normal
<b>8986N</b>	7.9 8.4 8.3	8.2	normal
<b>8988</b>	7.2 7.2 5.9	6.8	good
<b>8989</b>	7.8 10.0 8.2	8.7	normal
	<b>Promedio</b>	9.7	

Tabla C.7: Resultados finales MODIFICADOS (1), valores en rojo: cambiaron interpretación con respecto a datos originales

Muestra	$x_d(\text{mm})$	$D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	Promedio $D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	Interpretación <b>RILEM</b>
<b>8970</b>	22.0	12.1	11.4	normal
	19.3	10.6		
	20.7	11.3		
<b>8971</b>	16.2	7.2	8.1	normal
	20.8	9.4		
	18.2	7.7		
<b>8972</b>	11.3	4.9	4.6	good
	9.6	4.1		
	12.8	4.8		
<b>8973</b>	20.0	9.2	10.2	normal
	22.0	9.8		
	25.2	11.6		
<b>8974</b>	16.7	7.6	9.6	normal
	21.3	9.4		
	24.8	11.9		
<b>8975</b>	20.8	10.8	9.0	normal
	18.0	8.1		
	17.5	8.0		
<b>8976</b>	20.7	9.0	9.7	normal
	21.5	9.9		
	21.8	10.1		
<b>8978</b>	30.0	17.0	15.1	normal
	31.5	14.5		
	28.7	13.7		
<b>8979</b>	19.0	10.6	10.5	normal
	20.2	11.3		
	20.5	9.5		
<b>8980</b>	17.3	7.4	7.2	good
	16.7	7.1		
<b>8981</b>	12.2	5.2	5.4	good
	12.8	4.8		
	14.3	6.3		

Tabla C.8: Resultados finales MODIFICADOS (2), valores en rojo: cambiaron interpretación con respecto a datos originales

<b>Muestra</b>	$x_d$ (mm)	$D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	<b>Promedio</b> $D_{nssm} \times 10^{-12}$ ( $m^2/s$ )	<b>Interpretación</b> <b>RILEM</b>
<b>8982</b>	12.0	5.0	4.9	good
	12.3	4.6		
	11.0	4.9		
<b>8983</b>	14.8	6.8	6.5	good
	16.3	7.1		
	13.2	5.6		
<b>8985</b>	20.5	9.4	9.1	normal
	17.5	8.2		
	21.5	9.6		
<b>8986</b>	16.0	7.0	6.9	good
	16.3	7.4		
	14.5	6.2		
<b>8986N</b>	16.5	6.1	6.8	good
	18.7	7.2		
	18.0	6.9		
<b>8988</b>	14.5	5.8	5.4	good
	13.5	5.4		
	13.7	5.1		
<b>8989</b>	14.0	6.5	7.0	good
	18.5	8.1		
	14.5	6.3		
		<b>Promedio</b>	8.2	