



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**EVALUACIÓN DEL ENSAYO DE VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES COMO
MÉTODO PARA CALIFICAR EL GRADO DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN
PROYECTADO (SHOTCRETE)**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

VENUS DANISA MUÑOZ MORALES

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JACQUES BORNAND ARAYA
DAVID CAMPUSANO BROWN**

**SANTIGO DE CHILE
2016**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil
POR: Venus Danisa Muñoz Morales
FECHA: 12/07/2016
PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Aristía

EVALUACIÓN DEL ENSAYO DE VOLUMEN DE VACÍOS PERMEABLES COMO MÉTODO PARA CALIFICAR EL GRADO DE DURABILIDAD DEL HORMIGÓN PROYECTADO (SHOTCRETE)

La durabilidad del hormigón está definida según el comité ACI 221 como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, ciclos de congelamiento, ataques químicos, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Esta propiedad representa una de las condiciones relevantes en las etapas de diseño, especificación y control de calidad de obras de infraestructura de hormigón. Los ensayos utilizados normalmente para calificar el desempeño en durabilidad en el caso de estructuras de hormigón se centran en la evolución de la resistencia que opone el hormigón al ingreso de agentes agresivos, causantes, ya sea de la corrosión de la armadura, o bien del ataque químico a la matriz del hormigón.

En esta investigación se busca la validación de un método que permita evaluar durabilidad del hormigón proyectado. El hormigón proyectado (shotcrete) es una técnica ampliamente utilizada en la construcción del revestimiento estructural en obras de túneles por lo que debe ser diseñado para satisfacer aparte de las condiciones de trabajabilidad, resistencia normal y durabilidad compatibles con los requerimientos del proyecto a ser utilizado.

Los ensayos de durabilidad que normalmente se utilizan en la construcción con hormigón estándar en sitio no cuentan con la necesaria validación para el caso del shotcrete, por lo que este tipo de hormigón no tiene ensayos específicos, más bien son adaptaciones de ensayos generados para hormigón estándar. La experiencia internacional avala la utilización de métodos asociados a la determinación de la capacidad de adsorción de agua, como ensayo para calificar la durabilidad del hormigón proyectado por esta razón se escogió el ensayo de volumen de vacíos permeables como posible método para evaluar la durabilidad del hormigón shotcrete.

Para esto se realizaron ensayos de Volumen de Vacíos Permeables junto con el ensayo de Penetración de Ion Cloruro utilizado regularmente para evaluar durabilidad en hormigón estándar en sitio. Estos ensayos se realizaron en una obra nacional y se contrastaron estos valores con dos obras extranjeras.

A mi Madre que ha sido el faro en mis tinieblas y puerto en mis naufragios; el sitio seguro donde siempre puedo acampar.

A Nicolas fuente de amor y fuerza, de dulzura y generosidad, cimiento de mi vida, alivio en la adversidad, manantial de aguas tranquilas donde siempre encuentro la paz.

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ALCANCE.....	1
1.2. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.3. METODOLOGÍA.....	2
1.3.1. Antecedentes.....	2
1.3.2. Caracterización del Hormigón	2
1.3.3. Ensayo Volumen de Vacíos Permeables	2
1.3.4. Ensayo de Penetración de Ion Cloruro	2
1.3.5. Discusión y Conclusiones	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN PROYECTADO	4
2.1.1. Materiales constituyentes	4
2.1.2. Microestructura del hormigón.....	6
2.1.3. Procesos de colocación.....	11
2.1.4. Características del proceso de proyección del hormigón bajo presión neumática	14
2.2. MÉTODOS PARA CALIFICAR EL GRADO DE DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN	15
2.2.1. Ensayo de Volumen de Vacíos Permeables (VPV)	16
2.2.2. Durabilidad del hormigón proyectado, clasificación de Morgan (D.R. Morgan 1987).....	17
2.2.3. Ensayo de Resistencia a la Penetración del Ion Cloruro (RCPT).....	18
2.2.4. Ensayo de resistividad eléctrica	19
3. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN	21
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN UTILIZADO	21
3.2. INSPECCIÓN VISUAL	21
4. ENSAYO VOLUMEN DE VACIOS PERMEABLES (VPV)	25
4.1. MÉTODO DE ENSAYO VPV (SEGÚN ASTM C642)	25
4.1.1. Procedimiento VPV	25
4.1.2. Instrumentación utilizada para realizar el ensayo VPV.....	28
4.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO VPV	28
5. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE IÓN CLORURO (RCPT)	37
5.1. MÉTODO DE ENSAYO RCPT	37
5.1.1. Procedimiento RCPT.....	37
5.1.2. Montaje para ensayo RCPT	39
5.2. RESULTADOS Y ANALISIS DEL ENSAYO RCPT	39
5.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN EN EL ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	40
5.3.1. Procedimiento de ensayo.....	40
5.3.2. Montaje para realizar el ensayo de resistividad eléctrica.....	42
5.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	42
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	44
6.1. DISCUSIÓN.....	44
6.2. CONCLUSIONES.....	46
7. BIBLIOGRAFÍA	47

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ALCANCE

En este trabajo se implementó el ensayo de volumen de vacíos permeables en hormigones (VPV), ASTM C642 en una de las obras de ampliación de la red de Metro de Santiago, Línea 3 de metro, en la cual se utilizó hormigón proyectado en obras de estabilización de túneles y piques, adicionalmente se determinó en forma comparativa el comportamiento del hormigón (shotcrete) utilizando el ensayo de penetración al ion cloruro, ASTM C1202. Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados teniendo como referencia dos obras de sostenimiento y estabilidad que utilizaron esta misma tecnología en Canadá, en las cuales se utilizó hormigón proyectado.

El objetivo de esta investigación es evaluar el ensayo de Volumen de Vacíos Permeable (VPV) como método para calificar el grado de durabilidad del hormigón proyectado. Esta evaluación se realiza en base a resultados obtenidos del ensayo VPV en una obra nacional y contrastado con otro ensayo de evaluación de durabilidad en esta misma obra. Adicionalmente, se quiere conocer las diferencias de los resultados del ensayo VPV en una obra nacional comparado con el obtenido o exigido en obras internacionales.

1.2. INTRODUCCIÓN GENERAL

El hormigón proyectado, según la definición entregada por el comité ACI 506 (American Concrete Institute) se refiere a shotcrete como *“Técnicas de colocación del hormigón, donde la mezcla es transportada a través de una manguera y neumáticamente proyectada a alta velocidad contra una superficie, alcanzando una alta calidad de compactación in situ. Se obtiene hormigón de alta densidad, con baja relación a/mc (agua/material cementicio), baja permeabilidad y alto contenido de material cementicio”*. Este método es muy adecuado en aplicaciones de revestimiento para superficies verticales e irregulares, en general para obras donde la aplicación es sobre-cabeza o de alta complejidad. Entre las propiedades características de este hormigón se encuentra su alta adherencia a las superficies de diversos sustratos contra las cuales se aplica, lo que le da ventajas al momento de rehabilitar una estructura de hormigón por sobre las técnicas convencionales con el hormigón estándar en sitio donde se requiere de moldajes especiales.

Las primeras aplicaciones de esta tecnología en Chile se remontan a mediados de los años 70's en obras de CODELCO División el Teniente, cercano a la localidad de Rancagua, VI región. En esas obras se trabajó con hormigón proyectado vía seca. En la

actualidad el desarrollo de esta tecnología ha permitido su introducción en las obras civiles de mayor envergadura con nuevos equipos, procesos y materiales. Como referente a este cambio tecnológico a gran escala se puede hacer mención al desarrollo de las líneas del Metro de Santiago.

Si bien, como ya se ha señalado el hormigón proyectado actualmente es utilizado de manera frecuente no se han incorporado metodologías de evaluación de durabilidad para este tipo de hormigón, por lo que la motivación principal es encontrar un método para calificar el grado de durabilidad que se alcanza mediante esta técnica de colocación del hormigón. Para esto se recurrió al método de Volumen de Vacíos Permeable (VPV), el cual ya es utilizado en otros países para calificar hormigón proyectado, y complementarlo con el ensayo de Penetración de Ion Cloruro (RCPT) utilizado regularmente en hormigón estándar en sitio.

1.3. METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación se divide en las siguientes partes:

1.3.1. Antecedentes

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte de la tecnología del hormigón proyectado en obras subterráneas, principalmente en revestimiento de túneles, de modo de poder contar con una base que permita explicar las particularidades que lo distinguen del hormigón estándar en sitio. Además se hace una descripción de los métodos actuales para la evaluación de la durabilidad del hormigón.

1.3.2. Caracterización del Hormigón

Se hace una descripción del hormigón utilizado en este trabajo, especificando dosificaciones y lugares de extracción de testigos. Junto a lo anterior se inspeccionan y describen los testigos de forma visual, ya que sus características representan la colocación regular que tuvo este tipo de hormigón en la obra.

1.3.3. Ensayo Volumen de Vacíos Permeables

Se describe la metodología del ensayo de Volumen de Vacíos Permeables (VPV), ensayo realizado según la norma ASTM C642. Posteriormente se realiza el análisis de los resultados de los ensayos efectuados a testigos extraídos del hormigón proyectado en Línea 3 de Metro de Santiago.

1.3.4. Ensayo de Penetración de Ion Cloruro

Se especifica el alcance y procedimientos del ensayo de Penetración del Ion Cloruro (RCPT), realizado según la norma ASTM C1202. Adicionalmente, se describe la realización del ensayo de Resistividad Eléctrica que se utilizó, en forma

complementaria, para explicar la discordancia entre los métodos VPV y RCPT de evaluación de durabilidad.

1.3.5. Discusión y Conclusiones

Finalmente se sintetizan y discuten los resultados obtenidos, para luego concluir sobre los objetivos del proyecto.

2. ANTECEDENTES

2.1. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN PROYECTADO

A continuación se hace una revisión de los aspectos característicos de la tecnología del hormigón proyectado, abordando tanto sus materiales constituyentes, microestructura, formas de colocación, entre otros.

2.1.1. Materiales constituyentes

El hormigón está compuesto básicamente por cemento, áridos y agua. Cuando se habla de hormigón proyectado, esta mezcla pasa necesariamente a un sistema de cuatro componentes (cemento, áridos, aditivos y agua), los cuales deben ser considerados para poder alcanzar las propiedades que hacen posible la aplicación por proyección neumática del hormigón.

A continuación se puntualizan los aspectos relevantes de cada uno de estos componentes:

Cemento: Es un conglomerante hidráulico que actúa como matriz aglomerante de las partículas de áridos del hormigón y es el principal responsable de las propiedades mecánicas del hormigón en su conjunto. En el cemento se pueden distinguir 4 componentes principales los que constituyen más del 90% del peso de cemento. Cada uno de los cuatro compuestos contribuye en el comportamiento del mismo. El conocimiento básico de la contribución de cada uno de estos componentes durante la hidratación del cemento permite seleccionar el tipo y grado de cemento para producir las propiedades deseadas del hormigón proyectado.

Los compuestos que se forman en el proceso de cocción (clinkerización) en el horno rotatorio de cemento son:

- Silicato tricálsico - $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$: Es el que produce el desarrollo de resistencia del cemento Portland hidratado en las primeras semanas. Pasa del fraguado inicial al final en unas cuantas horas desprendiendo una gran cantidad de calor por el carácter exotérmico de las reacciones de hidratación.
- Silicato bicálsico - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$: Es el causante principal de la resistencia posterior, más allá de los 28 días, de la pasta de cemento Portland. Debido a que la reacción de hidratación avanza con lentitud, con una menor contribución al calor de hidratación.

- Aluminato tricálsico – $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$: Presenta en el cemento Portland un fraguado más rápido (instantáneo al hidratarse) que debe ser controlado incorporando una pequeña cantidad de yeso al cemento, del orden de 3 a 5 % de la masa de clinker. No representa aporte a la resistencia, pero si tiene efectos negativos para la durabilidad del hormigón.
- Ferroaluminato tetracálsico – $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$: Se hidrata con rapidez y su aporte a la resistencia es relativamente bajo. No obstante, al contrario del aluminato tricálsico, no interfiere en el proceso de fraguado.

El cemento en el hormigón proyectado debe ser de alta velocidad de reacción para permitir de forma rápida tener una buena adherencia y alta resistencia inicial. El contenido de cemento es en general, para este tipo de aplicación, de 300 a 450 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ dependiendo del proceso de colocación y de los requerimientos de la proyección.

Áridos: Los áridos (arena y grava) componen aproximadamente el 75% del volumen de hormigón. Las características de los áridos influyen en las propiedades y manejo del hormigón en estado fresco y en sus propiedades después de endurecido, por ello es muy importante caracterizar el tipo de árido que será utilizado. Si la composición granulométrica de los áridos es inadecuada, influirá en la trabajabilidad de la mezcla lo que puede provocar que el hormigón no posea las características necesarias para ser bombeable y favorecer la segregación en el proceso de proyección.

Agua: El agua juega un rol importante ya que aparte de ser determinante para desencadenar las reacciones de hidratación del cemento, controla junto con los aditivos la consistencia de la mezcla de hormigón proyectado. Habitualmente se utilizan agua potable, aguas de fuentes naturales o industriales adecuadamente tratadas, las cuales deben poseer la aptitud que establecen las normas respectivas que controlan el contenido de sustancias nocivas, tales como aceites, cloruros, sulfatos, azúcar, sal, entre otros.

Aditivos: Los aditivos químicos intervienen en las reacciones de hidratación permitiendo alcanzar niveles de trabajabilidad (nivel y duración de la fluidez) y mejorar las propiedades del hormigón que no puedan ser controladas por el cemento, los agregados o el agua, como son la reología, la resistencia temprana, durabilidad, entre otros.

Los aditivos se añaden en el material como un porcentaje del cemento o del peso del aglutinante en una dosis normalmente menor al 2% del peso de cemento. Los aditivos se añaden al hormigón durante su producción con excepción de los acelerantes de fraguado, que son añadidos justo a la salida de la boquilla de proyección y que representan el papel más relevante, en esta tecnología de colocación por proyección neumática del hormigón.

Los aditivos en el hormigón proyectado se utilizan para cumplir requerimientos específicos. A modo de ejemplo, para estabilizar se utiliza un aditivo que incremente la capacidad de retención de agua, como lubricante se utiliza un aditivo que reduzca la presión de la bomba durante la aplicación, etc.

Refuerzo: los refuerzos, armaduras convencionales, son los que proporcionan resistencia de tracción a los elementos de hormigón, normalmente barras de acero de refuerzo o armadura. La alta alcalinidad del agua en los poros del hormigón ($\text{pH} > 12,5$) conduce a la formación de una capa pasivante en el acero que reduce el ataque corrosivo a valores mínimos. La pasividad de las barras de acero se pierde cuando por sustancias como cloruros y sulfatos, actúan mecanismos de deterioro ligados a la carbonatación del hormigón de recubrimiento o la penetración del ión cloruro.

2.1.2. Microestructura del hormigón

Hidratación Cemento Portland

Al mezclar cemento y agua se forma una pasta de cemento plástica, cohesiva y moldeable. La mezcla se mantiene con estas características por un cierto tiempo, período plástico, que depende del tipo y contenido de material cementicio usado y de la temperatura de la mezcla. Pasado ese periodo plástico comienza a aumentar su rigidez al tiempo que libera calor, este es el momento que se considera como principio del fraguado y a partir del cual no es susceptible a deformaciones.

Durante la hidratación del cemento portland por reacción con agua de amasado sus componentes se hidratan dando origen a los siguientes productos de hidratación:

- Aluminato tricálcico + agua + yeso \rightarrow sulfoaluminatos de calcio (etringita)
- Silicato tricálcico + agua \rightarrow CSH + hidróxido de calcio
- Silicato dicálcico + agua \rightarrow CSH + hidróxido de calcio
- Ferroaluminato tetracálcico + agua + hidróxido de calcio \rightarrow hidrato de ferroaluminato tetracálcico
- Aluminato tricálcico + agua + hidróxido de calcio \rightarrow hidrato de aluminato tricálcico

Los compuestos hidratados del tipo CSH (silicato cálcico hidratado/gel de tobermorita), es el principal compuesto aglomerante de la pasta de cemento, responsable principal de las propiedades del hormigón porque liga o aglutina entre sí a todos los componentes y le confiere su resistencia mecánica.

Adicionalmente al compuesto CSH en la hidratación se produce hidróxido de calcio o portlandita que le otorga un pH alto a la solución, creando un medio apropiado para la estabilidad de la armadura del hormigón armado, en desmedro de su durabilidad frente a ataques químicos.

La rapidez de las reacciones de hidratación es afectada, además de la composición y tipo de cemento, por su finura, la cantidad de agua agregada y la temperatura de la mezcla. Para lograr una hidratación más rápida, los cementos se llevan a altos niveles de finura ($> 5000 \text{ [cm}^2/\text{g]}$. Método Blaine). El aumento de la temperatura de curado y la

presencia de una cantidad suficiente de agua con el aditivo acelerante contribuyen a la rapidez de las reacciones.

Porosidad del hormigón

La fase porosa de la matriz del hormigón se puede dividir en cuatro tipos: los poros de gel, los poros capilares, las burbujas de aire atrapadas y los vacíos propios de la colocación.

Los poros de gel y los poros capilares tienen relación directa con el contenido de agua de la mezcla. A medida que pasa el tiempo los productos de hidratación generados disminuyen la porosidad total de la matriz, mientras que simultáneamente por tensiones internas de atracción puede aparecer microfisuraciones que conectan los poros y debilita a la matriz.

Poros de gel son aquellos que tienen el tamaño más pequeño con un diámetro menor a 2 nanómetros. Durante la hidratación, los poros de gel aparecen como espacios entre las partículas del gel de CSH (poros interlaminares). Constituyen aproximadamente el 28% de la pasta de cemento hidratada, independientemente de la relación agua/cemento o las condiciones de hidratación, como se muestra en el modelo (imagen 2.1)

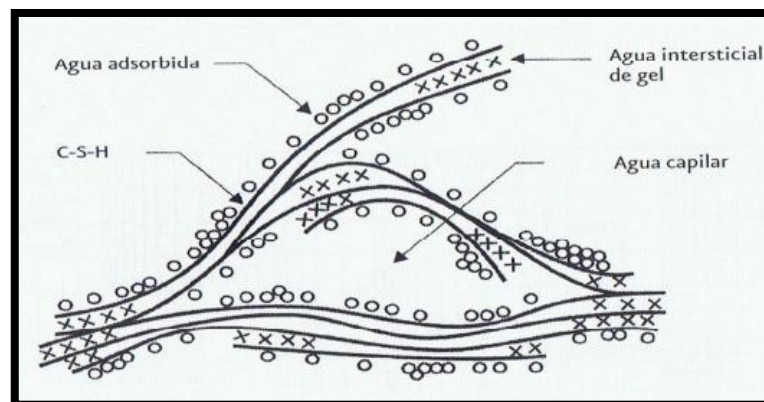


Imagen 2.1: Diferentes tipos de agua en la pasta de cemento hidratada.

Los poros capilares son producto del exceso del agua inicial incorporada la cual no interviene en las reacciones de hidratación. Este exceso de agua queda como solución intersticial de poros, la cual está directamente relacionada con la relación agua/cemento de la mezcla. Los poros forman un sistema o estructura de poros interconectados distribuidos al azar en la masa. Este sistema de poros capilares es la principal influencia en las características responsables de la durabilidad del hormigón como la permeabilidad de la pasta endurecida, resistencia mecánica y su vulnerabilidad a la congelación-descongelación, entre otros.

En una escala más amplia de observación se encuentran otros dos tipos de vacíos en la pasta de cemento. Las burbujas de aire atrapado en la pasta de cemento, generadas durante el amasado y por el uso del incorporador de aire, como una red de burbujas

distribuido aleatoriamente con diámetros que van desde 10 [micras] a 1 [mm]. Por último, los poros de aire mayores se crean debido a la compactación insuficiente o inadecuado diseño de mezcla. Encontrándose en variadas formas, sus diámetros pueden alcanzar el centímetro dependiendo del tamaño del agregado (ver imagen 2.2).

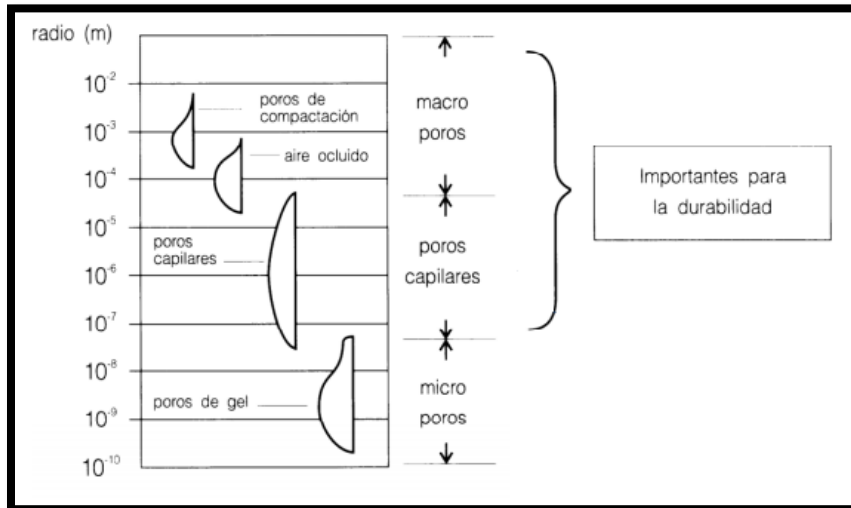


Imagen 2.2: Relación entre tipo y tamaño de poro.

Mecanismos de transporte

El movimiento de fluidos por la matriz del hormigón es relevante, ya que sus interacciones con los materiales constituyentes del hormigón pueden provocar un cambio en las propiedades y en la estructura de los poros de la pasta de cemento hidratado, conduciendo generalmente al deterioro o debilitamiento del hormigón a lo largo de la vida de servicio de la estructura.

Los movimientos de flujos por la matriz de hormigón ocurren por diferentes mecanismos como: gradientes de presión de agua, gradientes de humedad y concentración de sales solubles, diferencias de temperaturas en soluciones, etc. Estos mecanismos son los determinantes de los fenómenos de transporte en el hormigón. Se genera un flujo en un material permeable al existir un gradiente de presión hidráulica entre dos secciones adyacentes. Otros mecanismos de transporte serían la absorción capilar, que corresponde al transporte de líquidos en los poros debido a la tensión superficial y la difusión que es un fenómeno que se produce cuando, entre dos puntos, existe una diferencia de concentración del elemento que se difunde (Basheer, 2001).

A continuación se describen los principales mecanismos de transporte de fluidos en el hormigón, difusión, permeabilidad y absorción.

- Difusión:

La difusión es el proceso de transporte de una sustancia (iones) dentro de un medio poroso saturado desde una zona con mayor concentración hacia la zona de menor concentración. El parámetro que describe la capacidad de transporte por este mecanismo se denomina coeficiente de difusión del sólido poroso.

La difusión de iones es significativa sólo cuando el hormigón está relativamente saturado. Para los efectos de calificar la durabilidad del hormigón, los iones que más nos interesan son los cloruros y sulfatos. Comparado con otros procesos de transporte la difusión es el proceso más lento, pero si hablamos del efecto en la durabilidad de una estructura es el de mayor responsabilidad.

La difusión iónica en el hormigón, como todo proceso de difusión, puede ser descrita mediante la primera ley de Fick (Ecuación 2.1). Según esta ley, el flujo de una sustancia a través de una sección definida es proporcional al gradiente de concentración medido en la dirección perpendicular a la sección del paso.

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde J es la velocidad de transferencia, D es el coeficiente de difusión, C es la concentración de la sustancia que se difunde y X es la variable de posición en el sentido normal a la sección. Esta ecuación es aplicada en estados estacionarios, cuando esta condición no se cumple, es decir, cuando la concentración cambia con el tiempo se debe recurrir a la segunda ley de Fick (Ecuación 2.2) que incluye esta variación de concentración en el tiempo.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

En general, las leyes de Fick suponen una situación ideal en la que la penetración se debe a un mecanismo de difusión puro. Sin embargo la penetración de cloruros, u otras sustancias contenidas en la solución de poros del hormigón, se puede deber al efecto conjunto de diversos mecanismos como capilaridad o permeabilidad. Teniendo en cuenta esto se puede seguir aplicando la segunda ley de Fick de difusión, pero utilizando un coeficiente de difusión aparente que engloba la interacción entre los distintos mecanismos.

- Permeabilidad:

El transporte de un fluido en un medio poroso como el hormigón está controlado por la permeabilidad de la red de capilares y se efectúa cuando existe una diferencia de presión hidrostática entre dos secciones adyacentes que provoca o induce el movimiento del fluido.

La ley de Darcy, en su forma más general, constituye una formulación básica para la descripción y cálculo de la permeabilidad aplicada al flujo de un fluido en un medio poroso (ecuación 2.3).

$$u = -k \frac{\partial p}{\partial l} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde u es la velocidad media del flujo, k coeficiente de permeabilidad del material y $\frac{\partial p}{\partial l}$ es la variación de la presión en la longitud l .

- Absorción capilar:

La absorción capilar es un caso especial de transporte inducido por la tensión superficial del agua que actúa sobre los capilares del hormigón. Este es un fenómeno físico de penetración y movimiento del agua líquida dentro de un material poroso debido a las fuerzas electro-moleculares, tensión superficial del agua y presión atmosférica. El ascenso capilar será mayor cuanto menor sea el radio de los poros y la densidad del líquido capilar, y se puede expresar mediante la siguiente ecuación.

$$h = \frac{2\gamma}{rg\rho} \cos(\theta) \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde la altura (h) que se eleva o desciende el líquido en un capilar es directamente proporcional a su tensión superficial (γ), y está en razón inversa a la densidad del líquido (ρ) y al radio del tubo (r) (ver imagen 2.3).

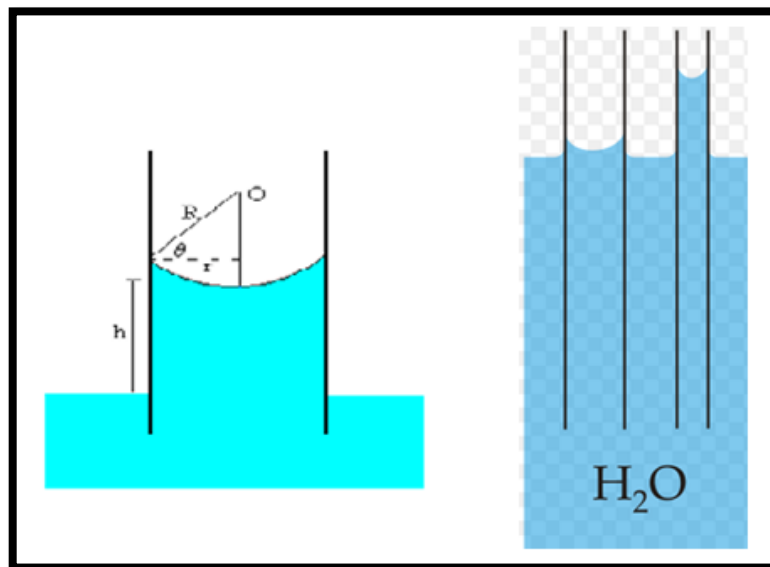


Imagen 2.3: Imágenes referenciales del efecto de la ascensión capilar.

Materiales Cementicios Suplementarios (MCS)

También llamados adiciones minerales, son materiales sílico-aluminosos de estructura amorfa que cuando se muelen finamente y se combina con cemento Portland, contribuyen a las propiedades del hormigón por medio de una reacción puzolánica. Las puzolanas pueden ser de origen natural o artificial. La ceniza volcánica o depósitos minerales naturales y las de procesos industriales como humo de sílice, ceniza volante o escoria. Uno de estos productos, o incluso una combinación de los mismos, se puede utilizar para reemplazar una parte del cemento portland en una matriz cementicia. Además de los beneficios ambientales, la razón principal para la incorporación de aditivos minerales en el hormigón es que traen varias ventajas técnicas. Por ejemplo, la incorporación de cenizas volantes y escoria de alto horno reduce la demanda de agua y mejora la trabajabilidad de las mezclas de hormigón estándar y más importante aún inhiben reacciones expansivas como la reacción álcali-sílice o DEF (formación de etringita retardada) responsables de fallas prematuras.

En el caso del hormigón proyectado la incorporación de microsílice tiene el efecto de reducir el hidróxido de calcio en la hidratación del cemento portland, produciendo más partículas de gel de CSH, esto mejora la cohesión, por lo que disminuye la permeabilidad ya que el hormigón proyectado obtiene una microestructura más densa y una porosidad más fina. Esto se observa particularmente en la reducción de vías de alta permeabilidad asociadas a la zona de transición de interfase, lo que se traduce en una disminución significativa en la penetración de agentes agresivos en el hormigón proyectado.

2.1.3. Procesos de colocación

La técnica del hormigón proyectado consiste, como se ha indicado anteriormente, en proyectar hormigón a gran velocidad sobre una superficie que sirve de soporte al elemento estructural hormigonado. La manguera de proyección puede controlarse ya sea manualmente o bien con la ayuda de un asistente automático. Existen dos métodos principales para la ejecución de obras de hormigón proyectado: por vía seca o por vía húmeda.

Hormigón proyectado por Vía Seca

El proceso de proyección vía seca se caracteriza porque la mezcla entre los materiales sólidos y el agua se produce en la boquilla de proyección (ver imagen 2.4). La mezcla consistente de áridos, cemento y aditivos sólidos se vierte en la tolva, y es impulsada a través de una manguera por medio de aire comprimido. Por medio de un dosificador de agua y aditivo acelerante de fraguado situado en la boquilla, se le añade las cantidades requeridas para crear la mezcla final que se proyecta sobre la superficie.



Imagen 2.4: Representación colocación vía seca.

Las principales ventajas y desventajas del proceso de hormigón proyectado vía seca por sobre el método de proyección vía húmeda son:

- Menores relaciones de agua/cemento.
- Maquinaria más económica.
- Mantenimiento más económica.
- Mayores pérdidas por rebote de partículas y emisión de polvo.

Hormigón proyectado vía húmeda

En este caso lo que se vierte en la tolva ya es hormigón, es decir, antes de que realice la proyección la mezcla ya ha sido amasada, incorporando áridos, cemento, aditivos y agua (ver imagen 2.5). La impulsión del hormigón por la manguera puede ser por aire comprimido o por transporte por bombeo.



Imagen 2.5: Representación colocación vía húmeda.

Las principales ventajas del proceso de hormigón proyectado vía húmeda por sobre el método de proyección vía seca son:

- Alto rendimiento.
- Mejoras sustanciales de las condiciones de trabajo en el área de proyección ya que reduce la producción de polvo y el rebote del material.
- Mayor durabilidad debido al control de la cantidad de agua de la mezcla.

El periodo plástico del hormigón es una variable a considerar durante la producción, el hormigón proyectado debe aplicarse dentro de este lapso de tiempo, en caso contrario habrá un desperdicio de mezcla.

2.1.4. Características del proceso de proyección del hormigón bajo presión neumática

El uso principal del hormigón proyectado es la estabilización de taludes u obras subterráneas. También es común usarlo para relleno de cavidades en superficies como rocas, suelos o reparación de estructuras de hormigón, por lo que es importante que tenga una resistencia inicial alta.

Al proyectar el hormigón dentro de los primeros minutos la tensión adhesiva de contacto hormigón/sustrato y la cohesión interna en la masa son decisivas. En esto tiene gran relevancia la dosificación adecuada (presión de aire, aditivos, entre otros) en la proyección y el espesor de la capa de hormigón (tasa de aplicación). La consecuencia de la insuficiencia en la presión de aire es una menor velocidad de proyección con la consiguiente menor compacidad del mortero colocado, que a su vez influye negativamente en la resistencia final del material.

Un exceso en la presión de aire puede provocar exceso de rebote de la mezcla al impactar con la superficie, lo que disgrega el material y provoca pérdidas del mismo. Las partículas de cemento y acelerantes que se pierden debido al rebote son componentes importantes para el desarrollo óptimo de la resistencia. La emisión de polvo (en el caso de colocación por vía seca) también se debe evitar en la medida de lo posible por razones de higiene en el trabajo (protección de la salud).

El espesor de capa durante la aplicación del hormigón queda controlada por las propiedades reológicas de la mezcla, por la rugosidad y la capacidad de absorción del sustrato, por lo que la resistencia inicial (por la tracción) de la capa colocada determina la velocidad de avance.

Una resistencia a la compresión susceptible de medición en obra para efectos de control de calidad se obtiene después de aproximadamente 1 hora (en casos especiales o en la estabilización inmediata después de sólo unos pocos minutos). Este desarrollo de la resistencia determina el ritmo de avance del frente de colocación del hormigón.

2.2. MÉTODOS PARA CALIFICAR EL GRADO DE DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN

La técnica del hormigón proyectado representa una práctica reconocida dentro de la tecnología del hormigón, por lo tanto el diseñador como el mandante deben velar por los agentes que puedan afectar negativamente su durabilidad. Como por ejemplo: daños por corrosión del acero de refuerzo, deterioro por ciclos hielo-deshielo, ataques químicos, reacción álcali-árido, entre otros.

Existen diferentes ensayos para evaluar la aptitud del hormigón a éstos agentes de deterioro. Estos ensayos se conocen como ensayos de comportamiento y se caracterizan por la propiedad que se ha elegido como indicador de durabilidad y normalmente se dividen en dos tipos:

Los que miden propiedades de transporte del hormigón

- Absorción de agua
- Permeabilidad
- Porosidad
- Resistividad eléctrica

Los que miden directa o indirectamente la aptitud del hormigón para resistir el tipo de ataque relacionado

- Resistencia a la carbonatación
- Resistencia al ingreso de cloruros

Se puntualizaron la resistencia a la carbonatación y la resistencia al ingreso del ion cloruro ya que en la corrosión del acero los procesos más importantes corresponden al ataque de cloruros y carbonatación. Este tipo de daño se puede presentar de diferentes formas, desde una corrosión generalizada hasta un ataque severo del tipo puntual (picadura). La corrosión debida a los iones cloruros presenta picaduras, distribuidas aleatoriamente a lo largo de las barras de acero, en cambio los ataques por carbonatación es una corrosión generalizada de la barra (ver imagen 4.6).

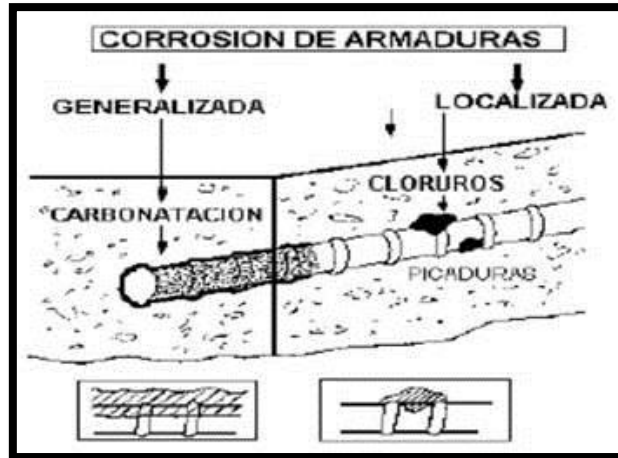


Imagen 2.6: Corrosión de armaduras.

La mayoría de los modelos de vida útil asociados a la corrosión del acero de refuerzo en hormigón armado siguen el modelo introducido por Tutti (1982), donde se modela el fenómeno de corrosión como un proceso de dos etapas:

- Período de iniciación, durante el cual el acero permanece en un estado normal de pasivación. El inicio de la corrosión corresponde a la despasivación de refuerzo debido al ingreso de iones cloruro en la capa de refuerzo del acero, la que alcanza la concentración crítica a nivel de la armadura.
- Período de propagación, durante el cual la estructura se deteriora como resultado de la pérdida de área transversal y la acumulación de productos de corrosión alrededor de la superficie de la barra que da origen a deslaminaciones del recubrimiento.

2.2.1. Ensayo de Volumen de Vacíos Permeables (VPV)

La prueba de absorción capilar se recomienda a menudo en las especificaciones Norteamericanas y Europeas, reconociendo que es la porosidad permeable la que controla el correcto comportamiento en términos de durabilidad. Esta prueba permite determinar el volumen de vacíos permeables en elementos de hormigón.

Los procesos de transporte asociado a la durabilidad de un hormigón dependen de su estructura de poros, ya que una gran cantidad de los procesos de deterioro están ligados a la penetración de agentes agresores a través del agua en los poros capilares de la matriz de hormigón, de ahí que este ensayo de volumen de vacíos permeable sea utilizado como indicador de la durabilidad del material. Cabe destacar además, que se trata de un procedimiento de ensayo relativamente simple, rápido, y no requiere de equipo costoso.

En Estados Unidos, este método de ensayo está incorporado como norma ASTM C642, el procedimiento a grandes rasgos se reduce a las siguientes etapas:

- Secado de la muestra (testigos) en el horno a 120 °C por 24 horas.
- Inmersión de la muestra en agua a 21 °C hasta su saturación.
- Someter a ebullición en agua la muestra durante 5 horas, para luego dejar enfriar por 14 horas.
- Obtener peso seco de la muestra al aire y en agua (peso sumergido).

El proceso de saturación en agua en ebullición se explica por la mayor capacidad de penetración del vapor de agua en la red capilar permeable. Durante el período de ebullición el agua en los poros se convierte en vapor de agua y se expande. Esta expansión genera presión y la expulsión del aire atrapado. Al enfriarse el vapor que llena los poros se convierte de nuevo en agua, creando una contracción volumétrica aspirando el agua en la que está sumergida la probeta hacia los poros más finos de la red. El movimiento de agua en el espacio poroso restablece el equilibrio lo que provoca el aumento de agua absorbida (Wilson et al. 1999).

Los parámetros que influyen en el volumen de poros y en la capacidad de absorción de agua del hormigón aparte de la relación agua/cemento, son el tratamiento de curado del hormigón, la inclusión de materiales cementicios suplementarios en la mezcla y las condiciones de colocación y consolidación del hormigón.

2.2.2. Durabilidad del hormigón proyectado, clasificación de Morgan (D.R. Morgan 1987)

Un indicador de calidad desarrollado por Morgan (D.R. Morgan 1987) se basa en la información acumulada de ensayos realizados en obras de hormigón proyectado utilizando el método VPV, para determinación del volumen de vacíos permeables. Este modelo de clasificación cualitativo es utilizado dado que no resultan aplicables los criterios de aceptación que se consideran para el hormigón estándar en sitio por la significativa mayor porosidad del shotcrete. Esto se debe a que la compactación que se logra en el hormigón proyectado es distinta a la obtenida en el hormigón convencional moldeado, por esta razón se recurre a este indicador al momento de evaluar las características de calidad del hormigón proyectado.

En la publicación antes señalada se entregan los resultados de cientos de pruebas de absorción con agua en ebullición en hormigones de obras sostenimiento con hormigón proyectado existentes en Canadá y Estados Unidos. El modelo de clasificación adoptado representa gráficamente la absorción de los testigos después de la inmersión y ebullición (en porcentaje), junto con los valores de Volumen de Vacíos Permeables (VPV en porcentaje) asociados a cada muestra (ver imagen 2.7). A partir de este gráfico el autor elaboró una clasificación para el grado de durabilidad del hormigón proyectado.

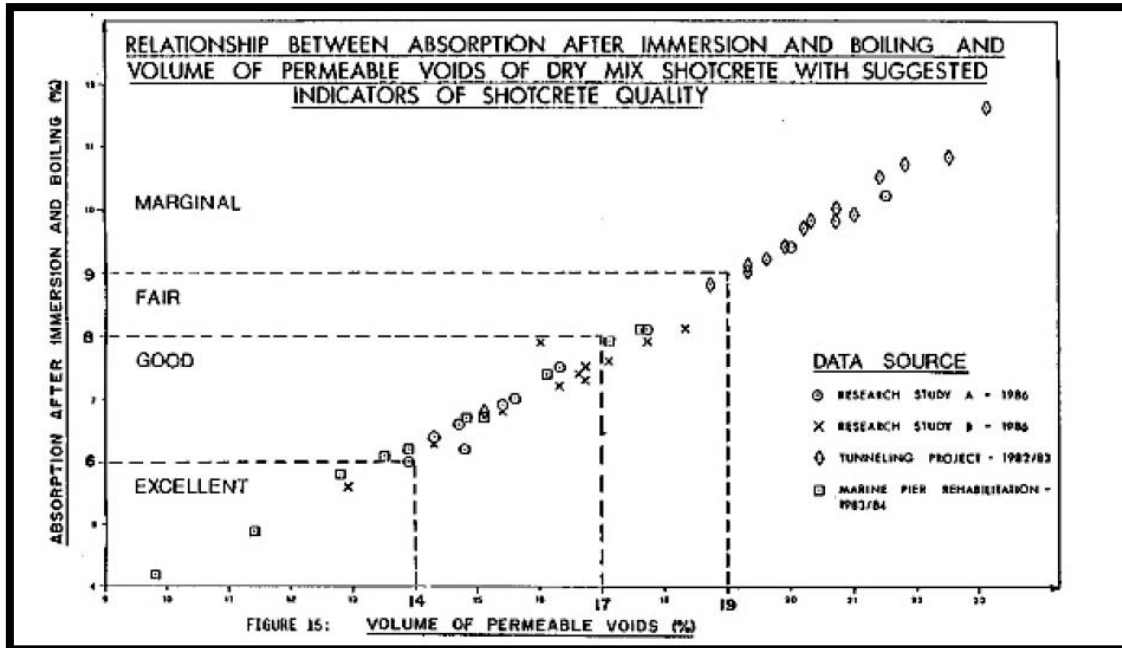


Imagen 2.7: Clasificación para la calidad del hormigón proyectado en función de las propiedades de absorción de agua (D.R. Morgan 1987).

2.2.3. Ensayo de Resistencia a la Penetración del Ion Cloruro (RCPT)

Las barras de acero embebidas en el hormigón están protegidas debido a la formación de una película de óxido insoluble adherido que protege al acero (pasivación). Sin embargo la interacción con el medio ambiente provoca que esta protección se vea disminuida con el tiempo.

El ion cloruro junto con el CO₂ del aire, son de los principales agentes que destruyen la condición de pasividad del acero. Estos agentes provocan que la corrosión se desencadene sobre la armadura al alcanzar cierto umbral crítico de concentración generando la formación de productos de corrosión en la interface acero-hormigón, generando fisuración y desprendimiento o deslaminación a nivel de la interface acero-hormigón. Es por lo tanto relevante evaluar la velocidad de penetración del ion cloruro en el hormigón, de modo de poder estimar la vida de servicio de la estructura.

En esta investigación se ha considerado efectuar el ensayo de resistencia a la penetración del ion cloruro (RCPT), correspondiente a la norma ASTM C1202 a las mismas muestras de hormigón, utilizadas en el ensayo VPV, obtenidas del revestimiento del tramo Línea 3 de Metro de Santiago. En este método de migración, se somete a las probetas saturadas a la penetración de iones cloruro a través de la solución de poros, por la aplicación de un potencial eléctrico de 60 Volt entre la fuente de iones cloruro y el hormigón, por medio de dos electrodos como se muestran en la imagen 2.8. Se utiliza un potencial eléctrico para que el campo eléctrico acelere el

movimiento de iones a través del hormigón sin cambiar en lo fundamental el proceso de difusión.

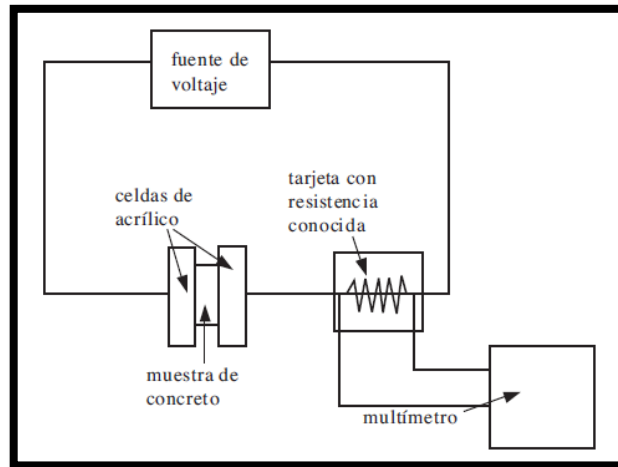


Imagen 2.8: Esquema del circuito que conforma el equipo de permeabilidad rápida de cloruros.

La cantidad de carga eléctrica total que pasa se relaciona con la permeabilidad del hormigón evaluado, de acuerdo al criterio de evaluación que especifica la norma (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1: penetrabilidad del ión cloruro (ASTM 1202).

Carga total (Coulombs)	Penetrabilidad del ión cloruro
> 4.000	Alta
2.000 - 4.000	Moderada
1.000 - 2.000	Baja
100 - 1.000	Muy baja
<100	Ninguna

2.2.4. Ensayo de resistividad eléctrica

La resistividad es una medida de la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y conducir las corrientes de corrosión generadas en las celdas galvánicas a lo largo de las barras. En sí, es el grado de dificultad que encuentran los iones portadores en su desplazamiento. Su valor describe el comportamiento de un material poroso saturado frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de su mayor o menor calidad conductora. Un valor alto de resistividad indica que el material es un mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor.

En un medio poroso como el hormigón, la resistividad refleja la capacidad de transportar carga eléctrica en los iones disueltos en la fase acuosa de un determinado volumen, se asumen a los áridos como eléctricamente inertes, ya que su resistividad resultan varios órdenes de magnitud superior a la de la matriz cementicia.

En la imagen 2.9 se presenta el efecto de un campo eléctrico sobre las cargas eléctricas de los iones disueltos en la fase acuosa de los poros del hormigón (poros gel y microporos). La corriente eléctrica suministrada por la fuente de poder es conducida a través de la red de poros. De esta manera es posible estudiar la difusión acelerada monitoreando la resistividad eléctrica de la probeta. En este caso, la conductividad depende del conjunto de los iones disueltos naturalmente en la solución de poros de hormigón.

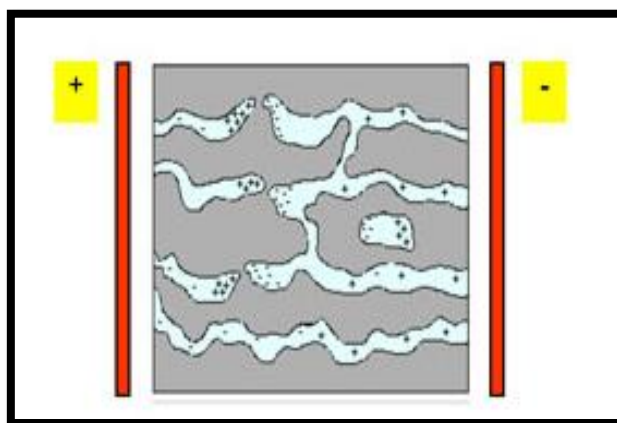


Imagen 2.9: Efecto del campo eléctrico sobre la solución iónica de poros en el hormigón.

En este ensayo se utilizó la norma ASTM G187-12. Si bien esta norma está referenciada a ensayos de suelos, esta metodología es aplicable a rocas y hormigón. El proceso consiste a grandes rasgos en colocar dos electrodos en las caras planas opuestas de un testigo de hormigón (un cátodo y un ánodo) y pasar corriente a través de éste, midiendo la corriente que pasa a través del hormigón a una diferencia de potencial dado. Para analizar los resultados obtenidos se utilizó el criterio de Polder (Polder R.B. et al. 2001, tabla 2.2) ya que tiene los criterios más exigentes para interpretar las medidas de resistividad en el hormigón.

Tabla 2.2: criterios para interpretar las medidas de resistividad en hormigones según (Polder, R.B. 1995).

Resistividad	Clasificación de la corrosión.
>100 [KΩcm]	Riesgo de corrosión despreciable
50 a 100 [KΩcm]	Riesgo de corrosión bajo
10 a 50 [KΩcm]	Riesgo de corrosión moderado
< 50 [KΩcm]	Riesgo de corrosión alto

3. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN UTILIZADO

El hormigón proyectado utilizado en la bóveda del túnel y de donde se extrajeron las muestras para los ensayos corresponde a un SH30.0(90)10. De acuerdo a la notación utilizada en obras esto significa que es un hormigón shotcrete (SH) que resiste 30 [MPa] a compresión (medido en un cubo de 20 [cm] de arista) a los 28 días ($f_{c 28}$), con un 90% de nivel de confianza (NC) y tamaño máximo de áridos (T_{max}) de 10 [mm].

En este hormigón se utilizó una dosis de 450 [Kg/m³] y se especificó una relación de agua/cemento de 0,45.

Para mantener la uniformidad de las propiedades del hormigón proyectado, la dosificación está constituida por dos tipos de áridos: una arena tamaño máximo 5 [mm] y una arena gruesa de tamaño máximo 10 [mm] mezcladas en proporciones adecuadas para cumplir con la banda de trabajo especificado.

Para bajar la permeabilidad se utilizó microsílíce en el hormigón proyectado, este material cementicio suplementario se dosificó al 5% respecto al peso de cemento.

La mezcla se colocó por vía húmeda utilizando un aditivo acelerante del tipo Tamshot 70 AFC. Se midió el espesor del hormigón proyectado a partir de los testigos obtenidos en los piques en estudio, registrando valores que varían entre los 40 [cm] y 70 [cm], con densidades entre 2,15 [kg/dm³] y 2,3 [kg/dm³]. Este hormigón fue proyectado entre los meses de diciembre del año 2014 a abril del año 2015.

3.2. INSPECCIÓN VISUAL

Los testigos fueron extraídos del banco del túnel (zonas laterales de la bóveda, ver imagen 3.1) de cuatro piques de la Línea 3 de Metro de Santiago. Por cada uno de estos sectores (piques) se obtuvieron aproximadamente 30 testigos para tener una muestra referencial del hormigón proyectado de una obra típica de shotcrete con tecnología nacional. Los piques de los cuales se obtuvieron las muestras corresponden a: Pantaleón, Cortijo, Granada y Teniente Mery.

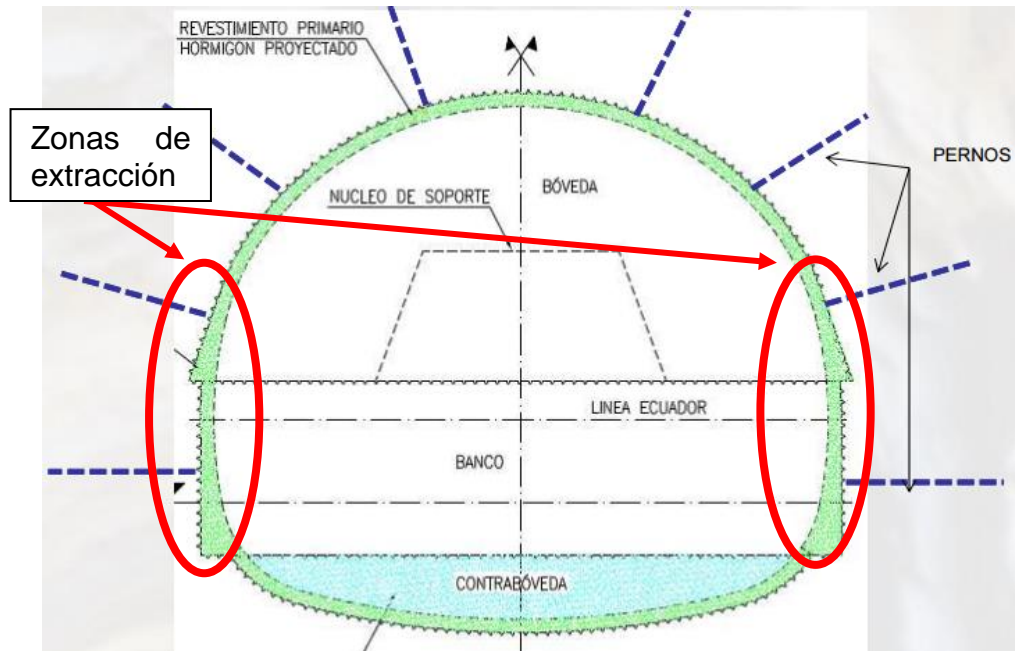


Imagen 3.1: referencia de zonas del túnel.

Al observar los testigos se constata que la mayoría de éstos presentan porosidad (imágenes 3.2 y 3.3), oquedades (imágenes 3.4 a 3.6), laminaciones y armadura, ya sea alambres o fierros.

Los sectores con gran porosidad y oquedades se atribuyen principalmente a la técnica de proyección utilizada, así como también a la presión neumática de proyección del equipo. Estas irregularidades se suelen producir por las siguientes maneras:

- Si se trabaja con una presión menor a la necesaria, el hormigón no logra adherirse lo suficiente a la superficie de soporte del elemento estructural.
- Si se trabaja con una sobre presión el hormigón proyectado rebota en la superficie, lo que distribuye de mala manera la mezcla.

Las laminaciones se atribuyen principalmente a excesos de aditivo acelerador no homogenizado con la mezcla, que queda entre las capas de hormigón proyectado provocando planos débiles. Un ejemplo de este fenómeno se puede observar en la figura 3.3 donde existe un plano más débil, transversal al testigo, con gran porosidad.

El hormigón proyectado al no contemplar una compactación posterior (vibrado) a su aplicación su homogeneidad suele depender de la maestría del pitonero (persona encargada de la proyección del hormigón) por lo que resulta probable encontrar las características anteriormente mencionadas

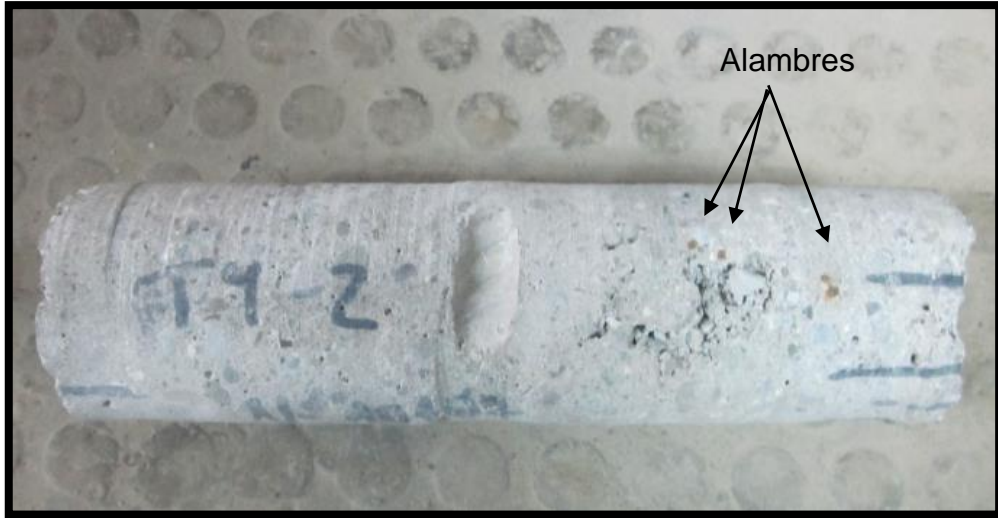


Imagen 3.2: Testigo con oquedad y armadura.

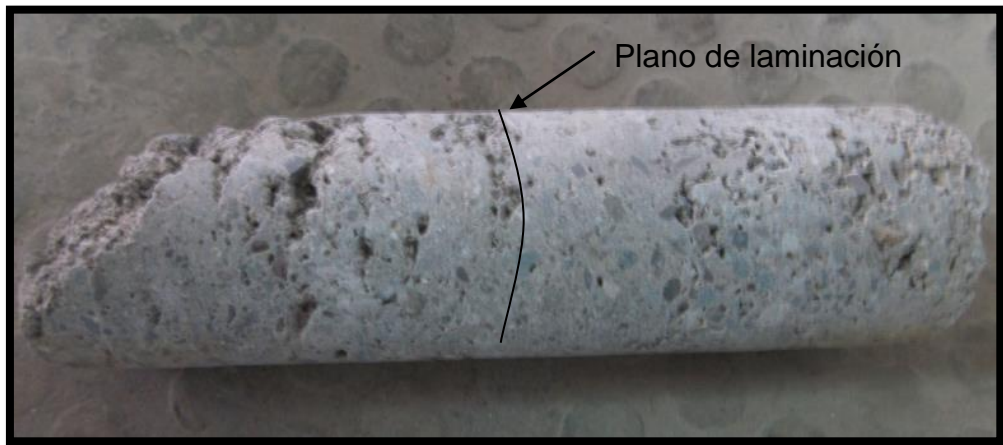


Imagen 3.3: Testigo con laminación y mucha porosidad.



Imagen 3.4: Testigo con oquedades y gran porosidad.



Imagen 3.5: Testigo con oquedad.



Imagen 3.6: Testigo con armadura y oquedad.

4. ENSAYO VOLUMEN DE VACIOS PERMEABLES (VPV)

4.1. MÉTODO DE ENSAYO VPV (según ASTM C642)

4.1.1. Procedimiento VPV

Este método de ensayo permite obtener dos de los parámetros que califican el hormigón: el porcentaje de absorción de agua y el porcentaje de vacíos en el hormigón endurecido.

Se prepararon para este ensayo 120 probetas. Según la norma utilizada deben tener en cuenta consideraciones mínimas, por lo que el primer paso fue la elección de probetas a partir de un stock de testigos extraídos en el período noviembre 2014 - abril 2015. Éstas no deben contener armaduras ni fisuras, a los testigos que se les encontraron estas irregularidades se procedió a cortar la sección defectuosa. Además, las probetas deben poseer una masa mínima de 800 gramos. Cada probeta fue rotulada por el sector y marco al cual pertenece.



Imagen 4.1: Muestras utilizadas en el ensayo VPV

Una vez las probetas están arregladas se registró su masa y se colocaron en el horno a 105 °C en donde se dejaron por más de 24 horas. Luego de ese lapso se volvieron a pesar las muestras, si la diferencia obtenida entre los dos valores de masa es mayor al 0,5% se repite esta operación. En caso contrario se registra este valor al que denominaremos como "A".



Imagen 4.2: muestras secando en el horno.

Una vez registrada la masa, los testigos se sumergen en agua a una temperatura de aproximadamente 21°C por un período no menor de 48 horas hasta que dos valores sucesivos de masa de la muestra saturada con superficie seca (superficie secada con una toalla) tengan una diferencia menor al 0,5%, en caso contrario se deja otras 24 horas hasta que se cumpla con la restricción antes indicada. Una vez se cumple esta restricción se registra la masa del testigo saturado con superficie seca como “B”.

Los testigos una vez saturados y registrados se hierven en agua potable por un periodo de 5 horas, luego se dejan enfriar de forma natural por no menos de 14 horas hasta que su temperatura sea alrededor de 20°C para posteriormente secarlas con una toalla y registrar su masa, valor al cual se denomina como “C”.



Imagen 4.3: Muestras en proceso de ebullición por 5 horas.

Después de su inmersión en agua y posterior ebullición, se determina su masa sumergida aparente, para esto los testigos se pesan suspendidos dentro del agua en una rejilla. Este valor se designa como “D”.

Los valores de volumen de vacíos permeable y absorción después de la inmersión y ebullición se obtienen de la siguiente manera:

Volumen de vacíos (espacio de poros permeables), %

$$\left(\frac{C-A}{C-D}\right) * 100 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Absorción después de la inmersión y ebullición, %

$$(C - A) * 100 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Dónde:

A = Masa de muestra secada al horno, luego dejada enfriar al aire, en gramos.

B = Masa de muestra saturada con superficie seca después de la inmersión, en gramos.

C = Masa de muestra saturada con superficie seca después de inmersión y ebullición, en gramos.

D = Masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición, en gramos.

4.1.2. Instrumentación utilizada para realizar el ensayo VPV

Para realizar este ensayo se necesitan:

- Horno de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ con capacidad suficiente para secar los testigos.
- Estanque para sumergir los testigos en agua a temperatura aproximada de 21°C
- Balanza para pesar los testigos con una precisión de 0,5 g.
- Recipiente para hervir los testigos por 5 horas.
- Toalla para secar los testigos.

4.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL ENSAYO VPV

Los resultados que se presentan a continuación se referencian por el pique del cual fueron extraídos los testigos.

En los gráficos 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se puede apreciar como varía el ensayo VPV por sector. Al analizar estos resultados se puede ver que el volumen de vacíos permeables se mueve entre 15% y 20%, lo cual es muy superior al valor esperado para un hormigón estándar en sitio (entre 5 y 10 %). El ensayo VPV, como se explicó anteriormente no ha sido calibrado para el hormigón proyectado, solo para hormigones estándar en sitio. Esto es de gran relevancia ya que en el hormigón shotcrete aparecen otros factores como la técnica de proyección, la presión de aire en la colocación y el exceso de aditivo que se pueda ocasionar en algunos sectores. Todos estos factores aumentan la porosidad del hormigón utilizado. Para analizar los resultados de este ensayo se utilizó el modelo de Morgan, el cual fue calibrado para hormigón proyectado.

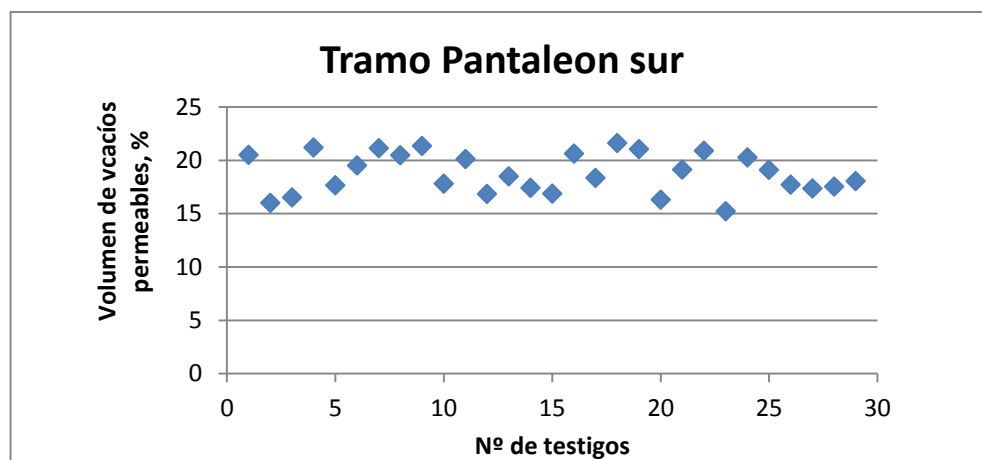


Gráfico 4.1: Volumen de vacíos permeable Pantaleón sur.

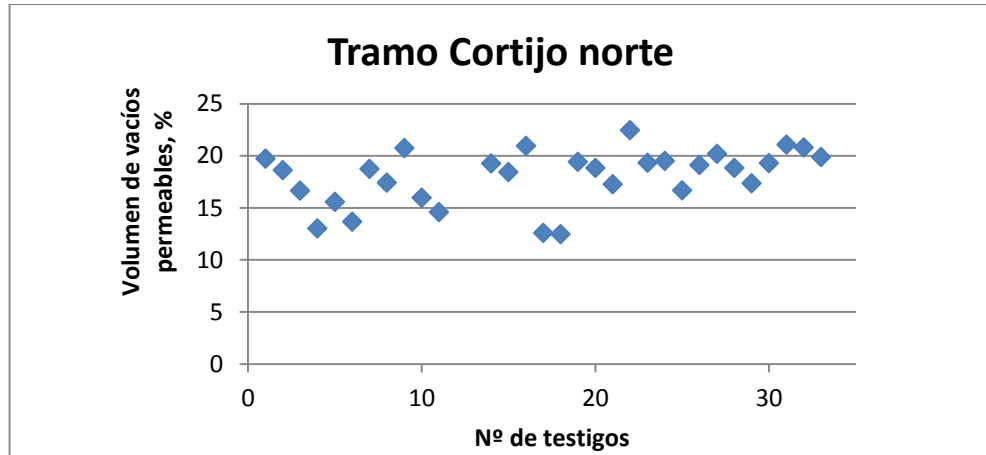


Gráfico 4.2: Volumen de vacíos permeable Cortijo norte.

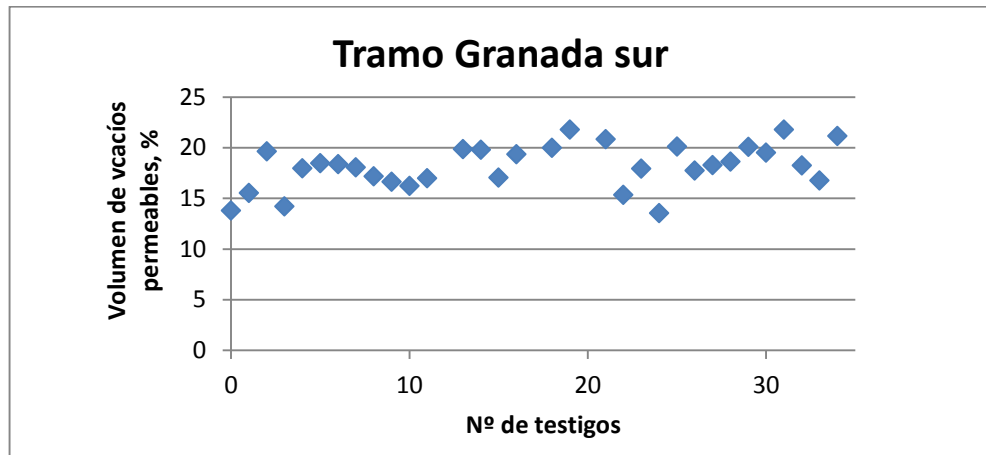


Gráfico 4.3: Volumen de vacíos permeable Granada sur.

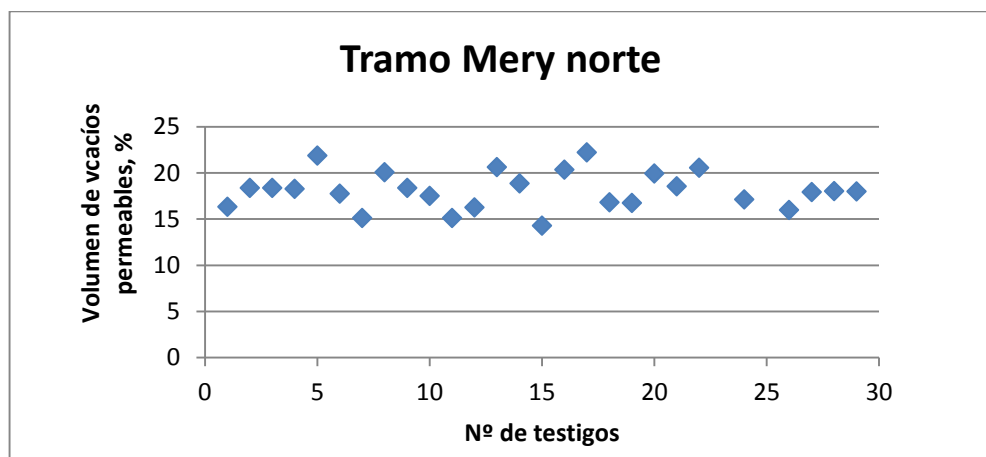


Gráfico 4.4: Volumen de vacíos permeable Mery norte.

A continuación se presentan los resultados de la absorción después de la inmersión y ebullición, parámetro necesario para calificar al hormigón en base al índice de Morgan. Teóricamente se sabe que al realizar el ensayo VPV se deben hervir las muestras para aumentar la absorción (ver en capítulo 2.2.1), por lo que se aprovecha de comparar la absorción antes y después de la ebullición para así poder ver la relevancia de este proceso.

Se puede observar que el rango de absorción después de la inmersión y ebullición se mueve entre 6% y 10%. Además, se observa que la diferencia entre la condición con ebullición (puntos azules) y la absorción sin ebullición (puntos rojos) es de aproximadamente un 5%. Dado esto se puede decir que al hervir las probetas aumenta la absorción.

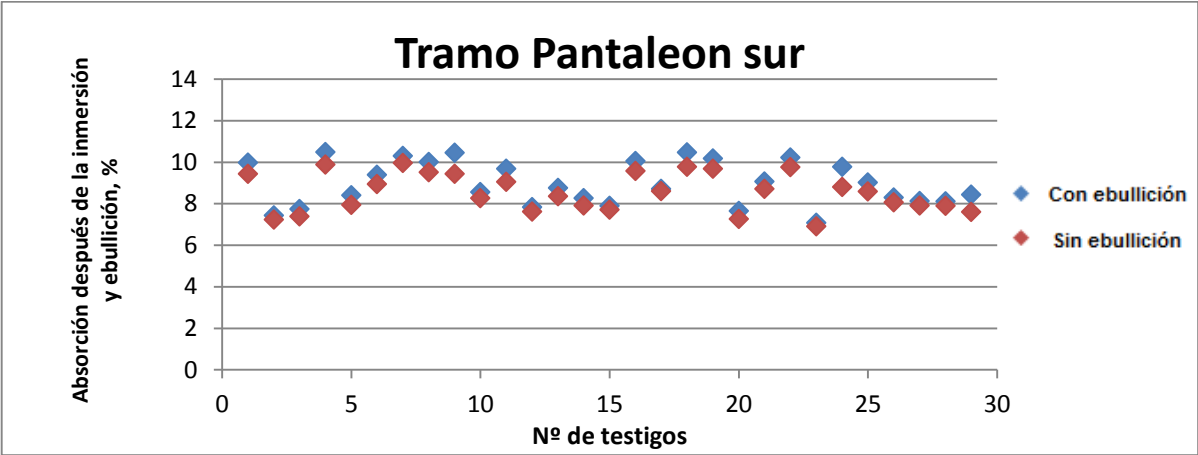


Gráfico 4.5: Absorción después de la inmersión y ebullición, Pantaleon sur.

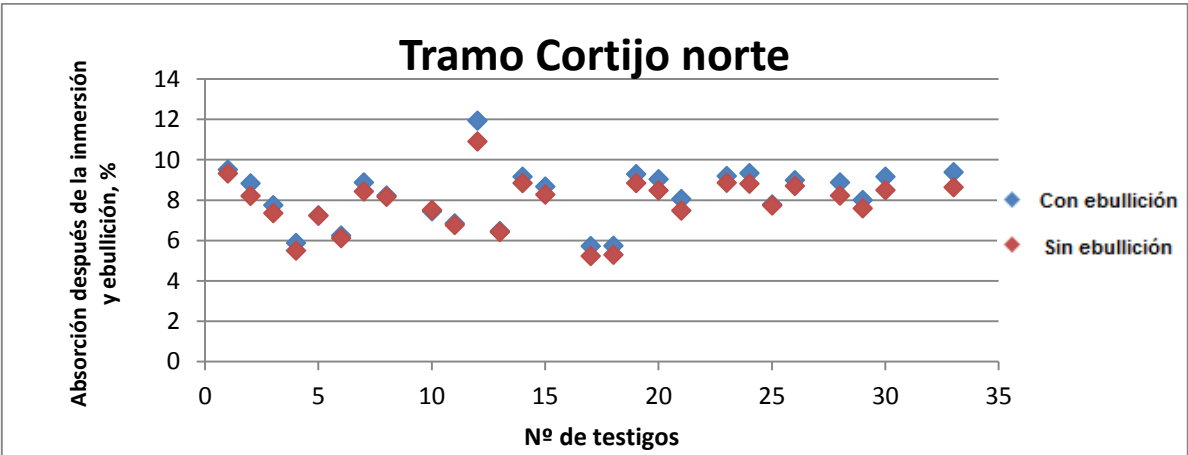


Gráfico 4.6: Absorción después de la inmersión y ebullición, Cortijo norte.

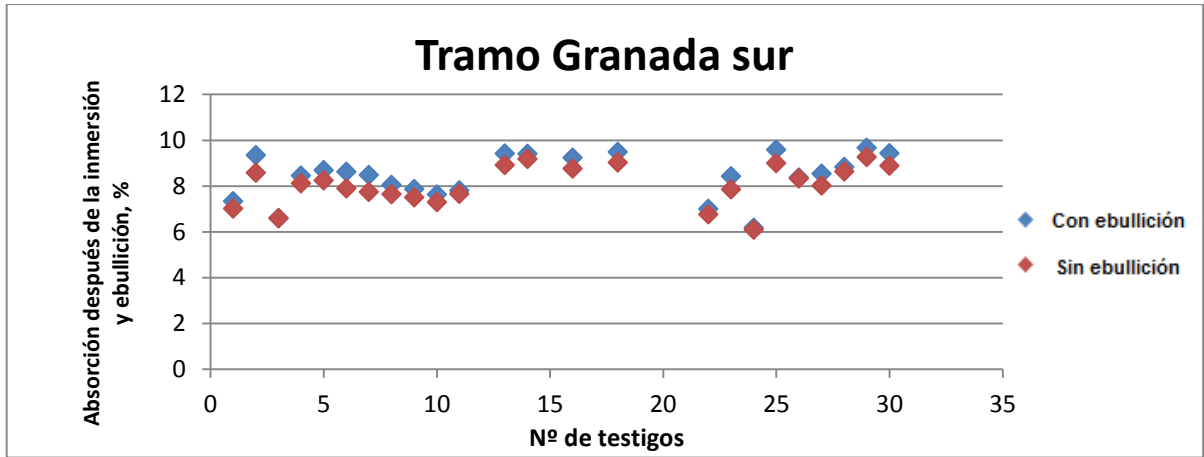


Gráfico 4.7: Absorción después de la inmersión y ebullición, Granada sur.

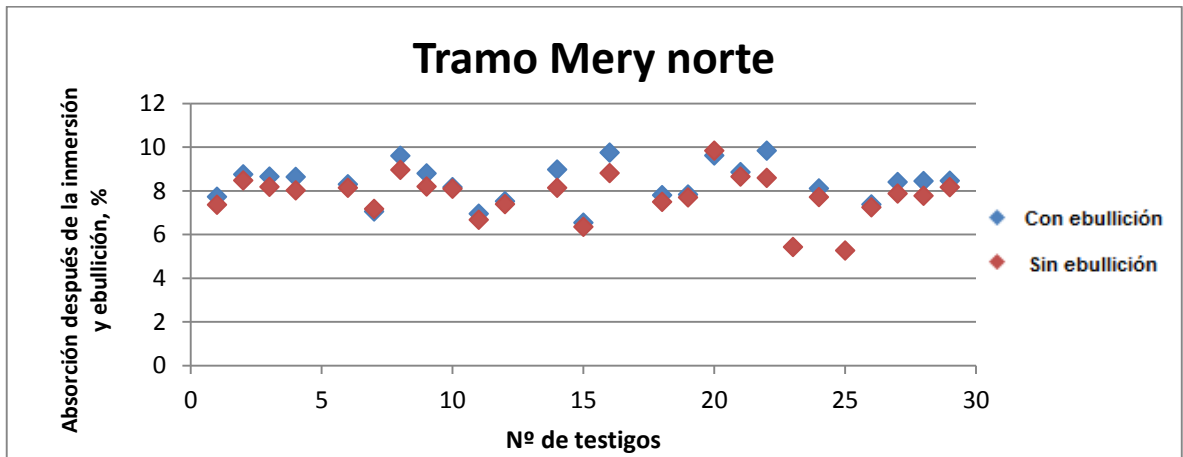


Gráfico 4.8: Absorción después de la inmersión y ebullición, Mery norte.

A continuación, en la tabla 4.1 se presentan los valores promedios y desviaciones estándar de los ensayos volumen de vacíos permeables y absorción después de la inmersión y ebullición. Esta tabla separa los resultados por los tramos analizados, al comparar se observa que los resultados no tienen grandes diferencias según los tramos.

Tabla 4.1: Promedios Ensayo VPV por tramo.

TRAMO	VPV %	σ VPV %	Absorción post ebullición (B. A.) %	σ B. A. %
Pantaleón sur	18,4	1,7	8,8	1,0
Cortijo norte	17,3	2,4	8,3	1,4
Granada sur	17,6	1,9	8,4	1,0
Mery norte	17,7	1,7	8,3	0,9

Para calificar el hormigón en base a los valores del ensayo VPV se utiliza el índice de Morgan el cual relaciona el volumen de vacíos permeables con la absorción después de la inmersión y ebullición.

Se puede observar en el gráfico 4.9, gráfico que contiene el promedio de cada tramo analizado, que en base a la calificación de Morgan este hormigón se considera o califica como estándar, dado que los promedios de las cuatro zonas están en esta categoría.

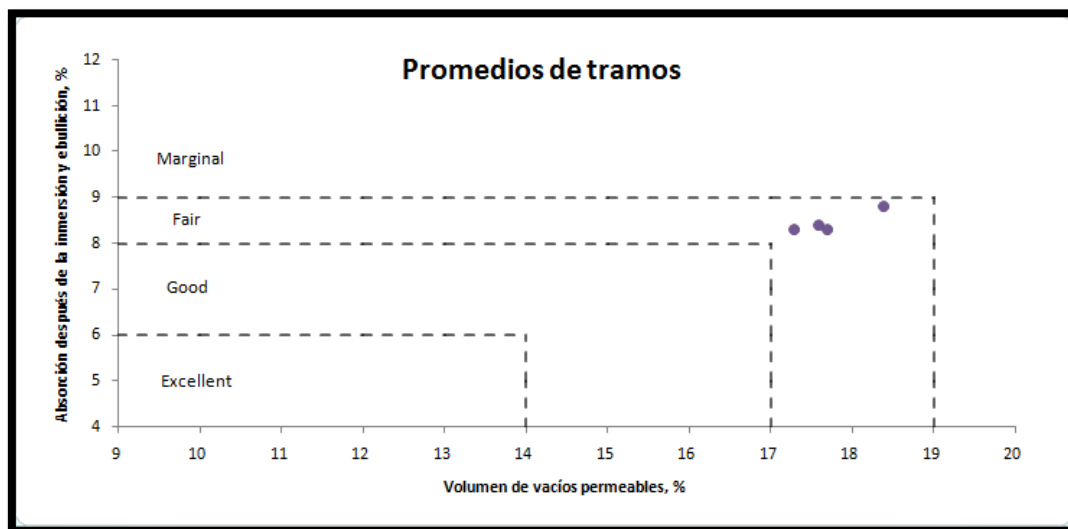


Gráfico 4.9: Calificación según índice de Morgan a los promedios de los tramos.

Si se analizan los gráficos 4.10; 4.11; 4.12 y 4.13 se puede concluir que este resultado no debe considerarse sin antes analizar la situación particular, ya que podría darse el caso en el cual el promedio no sea representativo a la realidad, como sería el caso de un promedio donde cada dato de la muestra se encuentra en uno de los dos extremos de la tendencia (marginal y excelente).

Analizando el caso particular de cada tramo se puede apreciar lo siguiente:

- Para Pantaleón sur los resultados varían entre bueno y marginal, pero se acumulan principalmente entre estándar y marginal (gráfico 4.10).
- Para Cortijo norte se puede apreciar una acumulación en marginal pero esta no llega a ser representativa de la zona ya que existe una cantidad no menor de datos repartidos entre excelente y bueno sin ninguna preponderancia clara (gráfico 4.11).
- En el tramo Granada sur se puede ver que la tendencia está en estándar, aunque los valores se distribuyen entre bueno y marginal (gráfico 4.12).
- Finalmente para el tramo Mery norte si bien hay una distribución entre bueno y marginal se observa una acumulación importante en la calificación de estándar (gráfico 4.13).

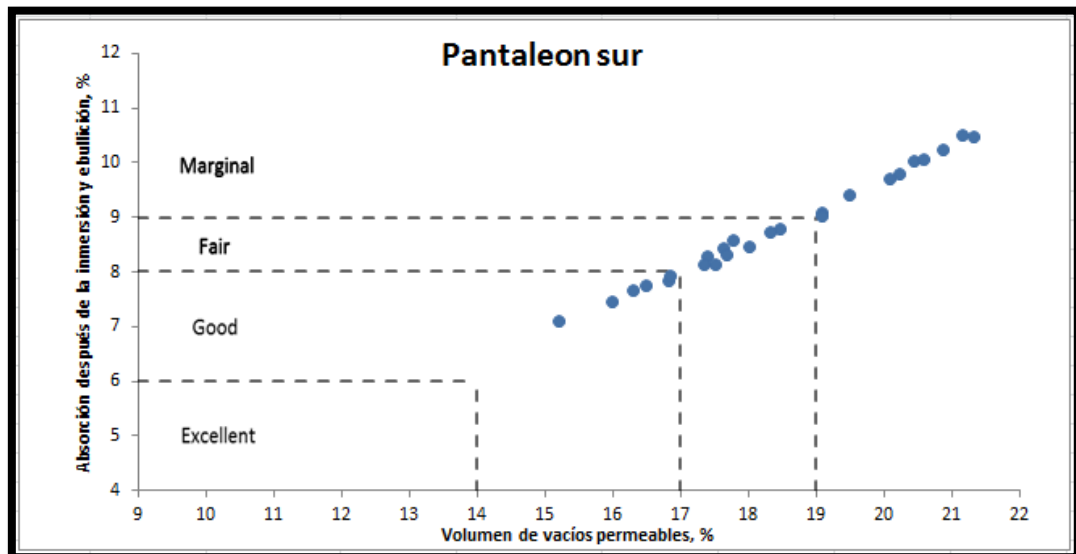


Gráfico 4.10: Calificación según índice de Morgan a tramo Pantaleón sur.

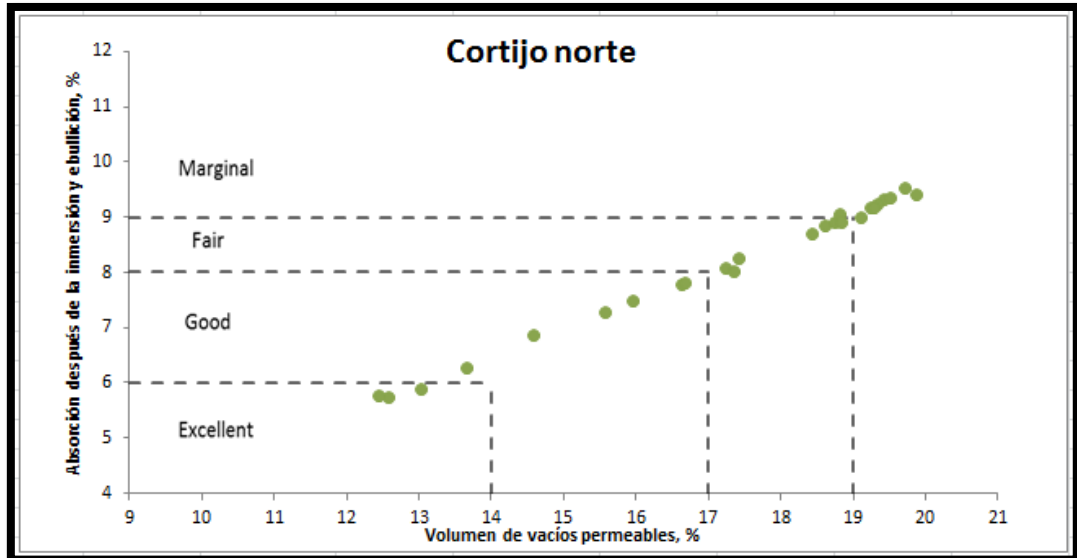


Gráfico 4.11: Calificación según índice de Morgan a tramo Cortijo norte.

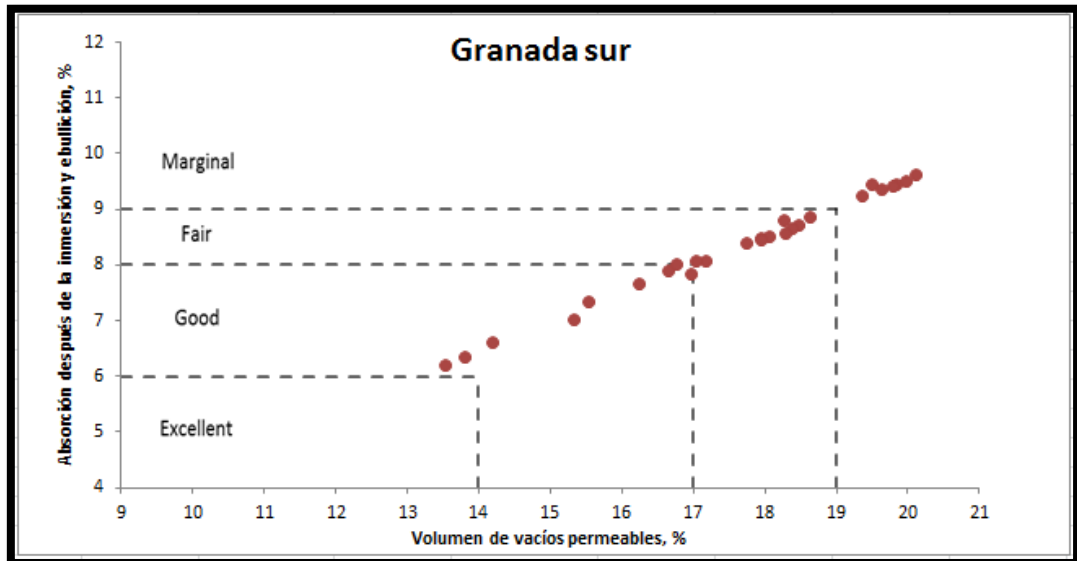


Gráfico 4.12: Calificación según índice de Morgan a tramo Granada sur.

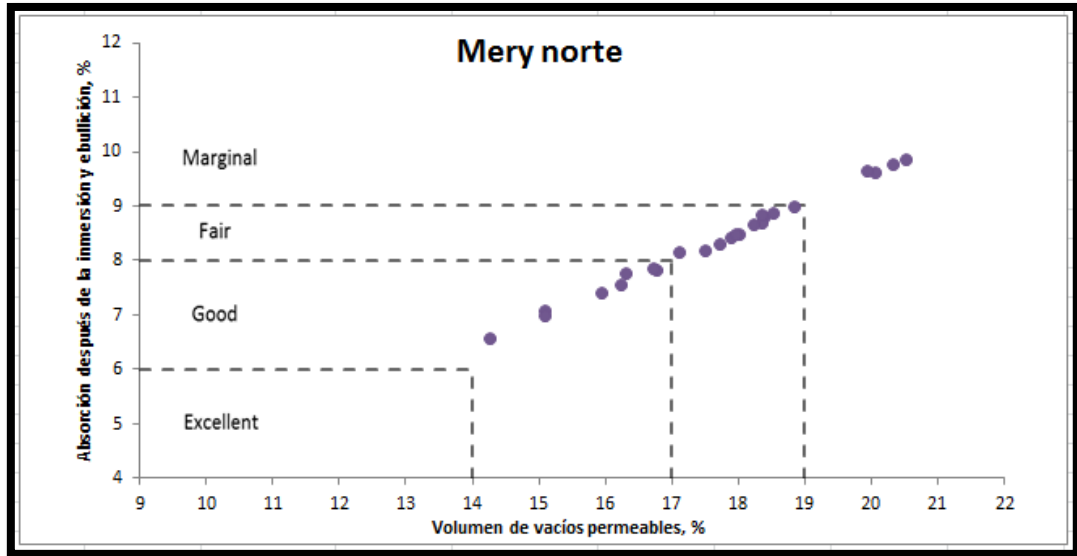


Gráfico 4.13: Calificación según índice de Morgan a tramo Mery norte.

Al analizar el gráfico 4.14, gráfico que considera los 4 tramos con todos los datos, se puede observar que en general muy pocos datos logran la calificación de excelente y que los datos se acumulan entre las calificaciones estándar y marginal, aun así con mayor preponderancia por estándar.

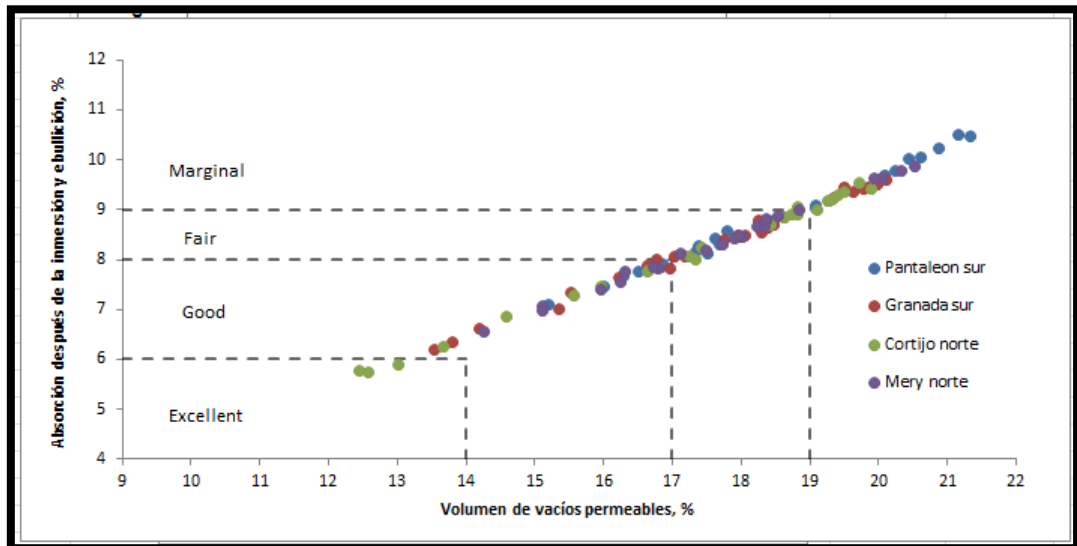


Gráfico 4.14: Calificación según índice de Morgan a los cuatro tramos.

Para referenciar los resultados obtenidos podemos evaluar nuestros resultados según las especificaciones utilizadas en obras internacionales como la New Afton Mine y la obra de rehabilitación del muro rompeolas del parque Stanley en Vancouver, BC. En la obra New Afton Mine (New Underground Gold Mine in British Columbia) se utiliza como máximo valor para el VPV 18% y para la absorción después de la inmersión y ebullición 9%. En la obra de rehabilitación del muro rompeolas del parque Stanley en Vancouver, BC, Canadá con shotcrete reforzado con fibra sintética. Utilizaron como valores máximos 17% de VPV y para la absorción después de la inmersión y ebullición un 8%. De esto concluimos que en general nos encontramos ligeramente sobre el límite que ellos utilizan.

5. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE IÓN CLORURO (RCPT)

5.1. MÉTODO DE ENSAYO RCPT

5.1.1. Procedimiento RCPT

Este ensayo entrega resultados que permiten calificar la penetrabilidad al ion cloruro del hormigón.

Para este ensayo se utilizaron 15 probetas. La preparación de éstas se inicia con el corte de las muestras, testigos se dejan con dimensiones de 10 [cm] de diámetro y 5 [cm] de largo (idealmente cortadas del centro de testigos que tenga tamaños mayores). Luego se recubre el manto cilíndrico con una resina epóxica que permita confinar el flujo y mantener la condición de saturación de la probeta.

Tras secarse el epóxico de recubrimiento la probeta se somete a vacío a una presión de 1 [mm] de mercurio durante 3 horas. Posteriormente, se satura la muestra inundando con agua destilada el recipiente hermético (deseCADOR) en cuyo interior se genera el vacío (imagen 5.1). Manteniendo el desecador sellado herméticamente, se introduce el agua a través de una manguera. Una vez incorporada el agua se mantiene la condición de vacío por 1 hora más.

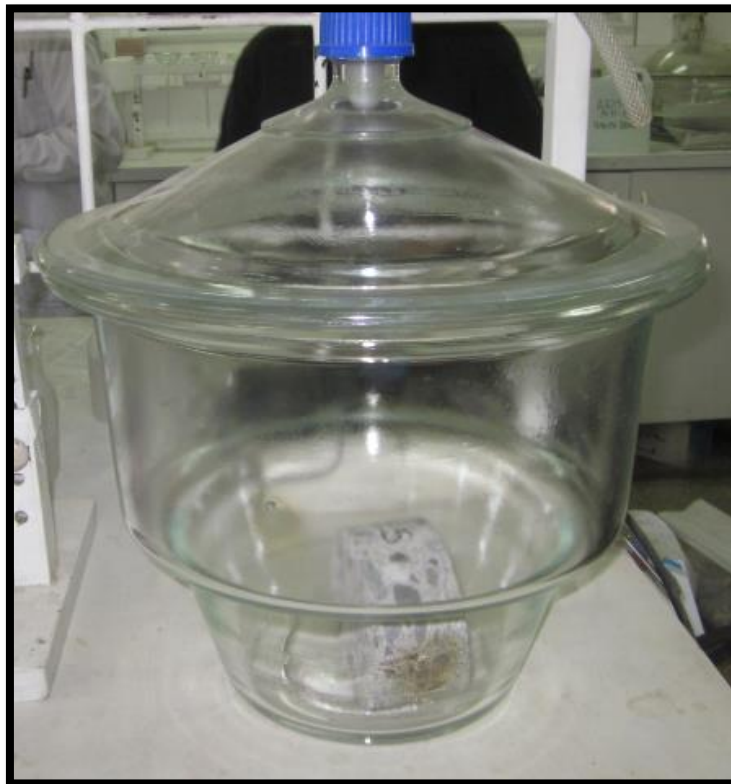


Imagen 5.1: Probetas colocadas en bomba de vacío.

Posteriormente, se extraen las probetas del agua y se procede a su ensayo en el equipo RCPT (imagen 5.2), fijando las probetas a las celdas para que las soluciones no filtren.

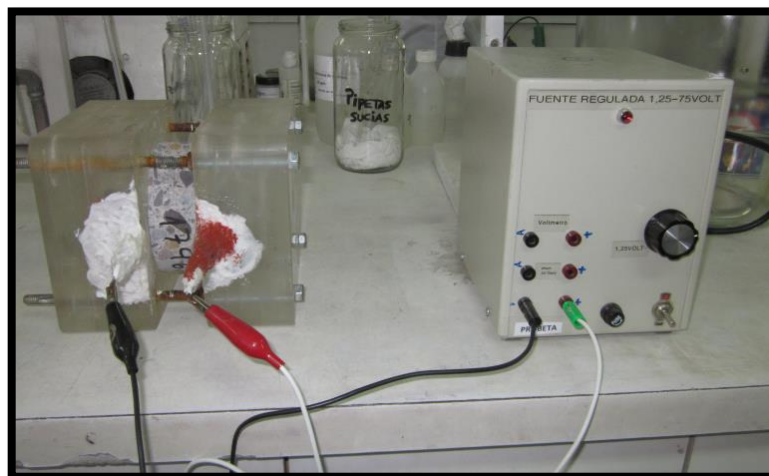


Imagen 5.2: Equipo de permeabilidad rápida de cloruros.

Una vez fijadas las probetas a las celdas se introduce, en una de ellas, cloruro de sodio al 3% (NaCl), y a la otra se le introduce hidróxido de sodio al 0.3% N (NaOH) eliminando el aire en su totalidad. Luego se realizan las conexiones eléctricas de ambos electrodos y se aplica un voltaje de 60 Volt. por 6 horas.

Durante el ensayo el principal parámetro de medición es la corriente a través de la probeta, registrando también el voltaje y la temperatura. Estas mediciones se efectúan cada media hora durante todo el ensayo. La carga total medida en coulombs, es determinada como el área bajo la curva de corriente versus tiempo, valor que se utiliza para clasificar la penetrabilidad al ion cloruro del hormigón de acuerdo con la tabla 5.1:

Tabla 5.1: penetrabilidad al ión cloruro del hormigón.

Carga total (Coulombs)	Penetrabilidad
> 4.000	Alta
2.000 - 4.000	Moderada
1.000 - 2.000	Baja
100 - 1.000	Muy baja
<100	Nula

5.1.2. Montaje para ensayo RCPT

Para realizar este ensayo se requiere disponer lo siguiente:

- Un impermeabilizante (resina epoxica) para recubrir el manto cilíndrico de la probeta.
- Solución acuosa de cloruro de sodio al 3 %.
- Solución acuosa de hidróxido de sodio, 0,3% N.
- Empaquetaduras de goma usada como sello entre las celdas del equipo y la probeta.
- Celdas para las soluciones que intervienen en el ensayo con sus electrodos.
- Fuente de poder capaz de mantener un voltaje de 60 ± 0.1 V.
- Dos multímetros (amperímetro) para medir corriente y voltaje.

5.2. RESULTADOS Y ANALISIS DEL ENSAYO RCPT

El ensayo se realizó, siguiendo estrictamente el procedimiento normalizado, a un total de 16 probetas las que no obstante haber sido adecuadamente saturadas y montadas en el equipo previamente calibrado no acusaron movimiento de carga eléctrica en el ensayo.

Si bien no resulta explicable, dada la porosidad del hormigón, que se tengan valores de corriente nulos para el ensayo de penetración del ion cloruro, existen antecedentes (Bolduc 2009) que indican que para un hormigón proyectado con adición de microsílíce los valores del ensayo RCPT son muy bajos por lo que se puede suponer que en estos ensayos los valores de corriente están bajo el umbral de medición del instrumento o bien se estaría en presencia de un hormigón de alta resistencia eléctrica. Para corroborar estas hipótesis se realizó el ensayo de resistividad eléctrica a 4 testigos, método también usado para evaluar la habilidad de los cloruros para penetrar el hormigón.

5.3. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN EN EL ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

5.3.1. Procedimiento de ensayo

Este ensayo permite conocer la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y conducir las corrientes iónicas del proceso de corrosión de las armaduras embebidas. En este caso interesa confirmar la hipótesis de una alta resistividad de las probetas ensayadas según el método RCPT.

Inicialmente se corta una probeta de hormigón de 5 [cm] de largo y 10 [cm] de diámetro. Luego se procede a saturar la muestra en agua bajo condiciones iguales a las del ensayo RCPT, y posteriormente se le aplica grafito a ambas caras de las muestras, esto para facilitar el contacto eléctrico hormigón/placa del equipo de ensayo de resistividad, luego se conectan los electrodos (placas) a las caras paralelas y se conecta la fuente de poder, como se muestra en las imágenes 5.3 y 5.4.



Imagen 5.3: Probeta con grafito es las caras basales de probeta tratada con recubrimiento epóxido en el manto.

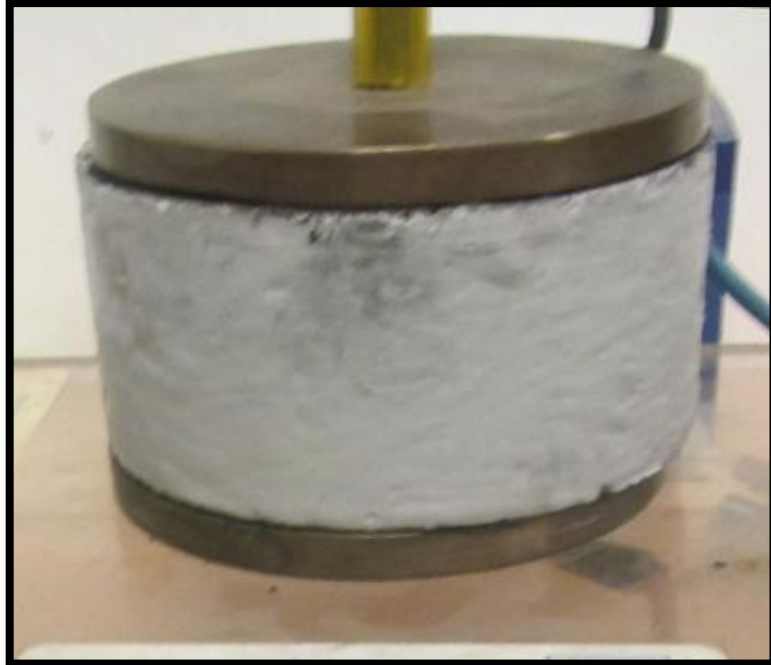


Imagen 5.4: Probeta conectada a los electrodos del equipo de resistividad eléctrica.

Se aplica un voltaje a las probetas el cual se incrementa de forma paulatina, en donde para cada nivel de voltaje inducido se registra la corriente medida con un multímetro (amperímetro).

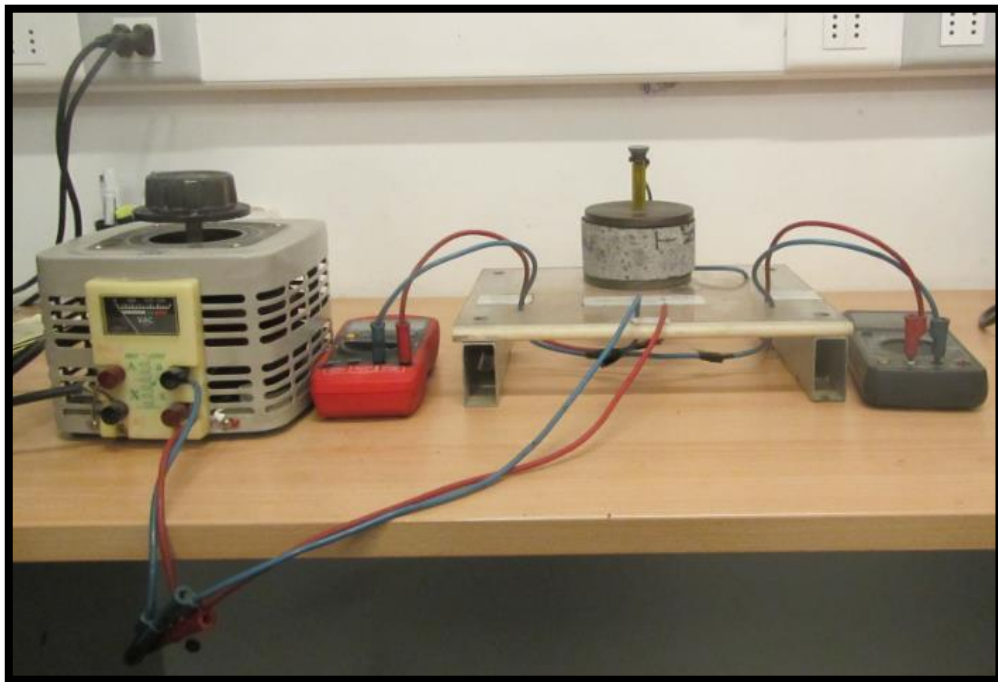


Imagen 5.5: Equipo de resistividad eléctrica.

5.3.2. Montaje para realizar el ensayo de resistividad eléctrica

Para realizar el ensayo de resistividad eléctrica se requiere disponer lo siguiente:

- Electrodos (placas) para las caras paralelas de las probetas
- Fuente de poder (transformador)
- 2 multímetro, uno para medir voltaje y otro para medir corriente.
- Grafito en polvo para mejorar contacto eléctrico probeta/placas.

5.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Los resultados obtenidos del ensayo de resistividad realizado a 4 testigos (2 secos y 2 saturados) se presentan a continuación en la tabla 5.2, junto con el criterio aceptado para calificar el riesgo de corrosión asociado.

Tabla 5.2: Resultados de ensayo de resistividad eléctrica.

TESTIGOS DE HORMIGÓN		
MUESTRA	RESISTIVIDAD [KΩ*cm]	CRITERIO RIESGO
Saturada 1	418	Poco Riesgo
Seca 1	6.670	Poco Riesgo
Saturada 2	178	Poco Riesgo
Seca 2	7.296	Poco Riesgo

Se puede observar que estos valores son mayores a los 100 [KΩ*cm], considerado por Polder, R. (2000) como el valor mínimo de la resistividad para considerar al riesgo de corrosión como despreciable. Junto con esto se puede ver la gran diferencia en la resistividad medida para las condiciones secas y saturadas, en donde tal como se esperaría teóricamente al estar saturada se vuelve más fácil para los electrones desplazarse por la matriz de hormigón o dicho de otra manera al estar saturado se ve una importante disminución de la resistividad.

Si bien en la condición saturada baja considerablemente la resistividad incluso en estas condiciones se tienen valores de resistividad que clasifican al testigo con riesgo despreciable a la corrosión.

El bajo o nulo movimiento de carga eléctrica en el ensayo RCPT se pueden explicar por la conductividad eléctrica inferior de la solución de los poros, que es proporcional a la carga iónica total en la solución de poro intersticial (poros gel y poros capilares) en la presencia de electrolitos.

Este fenómeno y sus consecuencias prácticas se han discutido en la literatura existente para el hormigón tradicional (Cabrerá et al., 1989; Stanish et al., 1997; Ozyildirim, 1994). Se explica que debido a las propiedades puzolánicas de microsilíce y cenizas volantes, el calcio y los iones de hidróxido en solución se consumen en la reacción. Como el calcio y los iones de hidróxido constituyen una porción importante de la solución iónica, este proceso disminuye la conductividad eléctrica de la solución.

Dado lo anterior se puede entender que si bien se tiene una alta porosidad se tenga una alta resistividad y una baja penetración de cloruros.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1. DISCUSIÓN

En general el hormigón proyectado estudiado (muestras provenientes de los piques Pantaleón, Granada, El Cortijo y Teniente Mery) presentan las deficiencias típicas debidas al proceso de proyección, como alta porosidad, oquedades y laminaciones, defectos recurrentes y previsibles en estos hormigones. Si bien estos defectos no impiden la obtención de los niveles de resistencia mecánica especificados, es relevante considerarlas al momento de decidir el método de ensayo a utilizar para evaluar su desempeño frente a sollicitaciones que pueden afectar su durabilidad especialmente la corrosión de las armaduras.

Al comparar los resultados obtenidos mediante los ensayos de Penetración de Ion Cloruro (RCPT) y Volumen de Vacíos Permeables (VPV), en testigos provenientes del mismo tipo de hormigón proyectado, se puede concluir que los resultados obtenidos en los ensayos de absorción VPV (ASTM C642) están muy débilmente correlacionados con los resultados de los ensayos RCPT (ASTM C1202).

Esta discrepancia de resultados entre ambos métodos para el hormigón proyectado se presentan anteriormente en las conclusiones de Bolduc (2009), quien afirma que, dependiendo de los métodos considerados para analizar las muestras (los ensayos escogidos), un material de pobres características puede ser aceptado por los resultado del ensayo, mientras que un buen material puede ser rechazado sobre la base de un resultado no conforme. En cada caso, se llega a la conclusión de que para evaluar durabilidad en hormigón proyectado es relevante considerar la representatividad de la muestra o los resultados pueden no ser confiables.

La presencia de microsílíce en el hormigón proyectado evidencia una disminución de los coeficientes de conductividad y de difusión de iones en el ensayo de migración de cloruros. Debido a esto, se debe tener cuidado con la interpretación de los resultados de las pruebas RCPT cuando las mezclas contienen este material cementicio suplementario. De la inspección visual de las probetas se puede observar mucha oquedad y porosidad lo que debería facilitar la penetración del ion cloruro lo que se contradice con los resultados obtenidos del ensayo RCPT, dado lo anterior se puede inferir que la porosidad es discontinua en la matriz de hormigón. El ensayo VPV en cambio, se acomoda más a la realidad a la hora de analizar hormigón proyectado ya que éste utiliza una masa de muestra más representativa por las porosidades y defectos propios de este tipo de hormigón.

Para los resultados del ensayo VPV es importante no solo estudiar los datos promedio, si no que se debe tener en cuenta también a los valores individuales, ya que los datos promedios pueden no ser representativos a los valores reales.

Al realizar el ensayo VPV al hormigón proyectado en una obra nacional como la construcción de la Línea 3 del Metro de Santiago, se calificó el hormigón proyectado como de calidad estándar según la clasificación de Morgan. Si bien las muestras se

calificaron con calidad estándar, los resultados del ensayo VPV comparados con las obras investigadas bordea los límites de sus especificaciones.

De este estudio se deriva la necesidad de estudiar la anomalía de la nula permeabilidad a cloruro del hormigón proyectado en el ensayo RCPT, ya que las causas no son claras pudiendo éstas corresponder a limitaciones asociadas al ensayo o a las propiedades de las mezclas utilizadas para hormigón proyectado. Si bien existen antecedentes (Bolduc 2009) donde indican que la incorporación de material cementicio suplementario microsílíce), sería la causa de alta resistencia en este ensayo, por lo que se sugiere investigar en forma sistemática la influencia del aditivo acelerador de fraguado o por la estratificación del hormigón proyectado que pudiera dificultar la obtención de saturación total de las probetas, condición necesaria para el correcto funcionamiento de este ensayo.

6.2. CONCLUSIONES

A partir del análisis de resultados de ensayos a muestras de hormigón proyectado, tecnología empleada en la construcción de revestimiento de los túneles del Metro de Santiago, Particularmente los obtenidos con el método de ensayo ASTM C642, que permite determinar el volumen de vacíos permeables del hormigón, (VPV por sigla en inglés), se evaluó la posibilidad de utilizar esta propiedad como índice de durabilidad para ese tipo de hormigón (shotcrete), que actualmente no cuenta con una caracterización de desempeño frente a agentes de deterioro que actúan por penetración a través de la red capilar de poros del hormigón.

Teniendo como referencia los criterios de evaluación propuestos por D. R. Morgan, Hardy BBT Limited, para evaluar la durabilidad del hormigón proyectado, se comprueba que los resultados de las muestras ensayadas por los resultados VPV, en esta investigación, son comparables y pueden ser clasificadas como de durabilidad regular (estándar) según el criterio canadiense.

Por otra parte al comparar estos resultados con los exigidos en obras extranjeras de sostenimiento con shotcrete se puede concluir que los valores de VPV en el país se encuentran ligeramente fuera de los límites exigidos en sus especificaciones extranjeras. Cabe destacar que las exigencias de estas obras según el índice de Morgan son evaluadas de bueno a excelente.

Adicionalmente, se evaluó el desempeño de este tipo de hormigón en el ensayo de penetración al ion cloruro de la norma ASTM C1202 (RCPT por sigla en inglés), en éste se obtiene una muy baja penetración de acuerdo a la carga eléctrica registrada en el ensayo, lo que no se relaciona con la calificación observada en el ensayo VPV. Lo anterior hace suponer que existirían otras variables propias del hormigón proyectado, ensayado, que interfieren y hacen no factible la aplicación de este método de migración de cloruro para evaluar la durabilidad, derivándose como recomendación investigar las causas que explican el comportamiento del hormigón proyectado en este ensayo.

7. BIBLIOGRAFÍA

ACI-506.R-05 (2005), *Guide to Shotcrete*, ACI International.

ACI-506.R-05 (2005), *Guide to Durable Concrete*, ACI International.

ANDRADE C., WHITING D., Comparison of AASHTO T-277 and AASHTO T-259 Results, RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete. Saint-Remyles- Chevreuse, France 1995.

ASTM (2012), *C 1152 - Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete* Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, Vol. 04.02, ASTM, Philadelphia.

ASTM (2006), *C 642 - Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, Vol. 04.02, ASTM, Philadelphia.

ASTM (2012), G187 - 12a- Standard Test Method for Measurement of Soil Resistivity Using the Two-Electrode Soil Box Method, ASTM, Philadelphia.

Andrews-Phaedonos, F. (1996), *Establishing the Durability Performance of Structural Concrete*, Vic Roads, Material Technology Department, Australia, 59 pages.

Bolduc, L.-S. (2009), *Étude des propriétés de transport du béton projeté*, Masters thesis, Department of Civil engineering, Laval University, Canada, 167 pages.

Cabrera, J.G. and Claisse, P.A. (1990), Measurement of Chloride Penetration into Silica Fume Concrete, *Cement and Concrete Composites* **12**, pp. 157-161.

Lewis, L.-O. (2003), *Durability concept; pore structure and transport processes*, Advanced Concrete Technology, Éd. Butterworth-Heinemann, 28 pages.

Morgan, D.R., McAskill, N., Neill, J. and Duke, N.F. (1987). "Evaluation of silica fumeshotcrete", *Proc. International Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete*, Montreal, Canada, 34 pages.

Neville, A.M. (2000), *Concrete properties*, 806 pages.

Nilsson, L.-O. (2003), *Durability concept; pore structure and transport processes*, Advanced Concrete Technology, Éd. Butterworth-Heinemann, 28 pages.

Ozyildirim, C., "Rapid Chloride Permeability Testing of Silica-Fume Concrete", *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGPD, Vol. 16, No. 1, pp. 53-56, 1994.

Polder, R.B. Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment.

Stanish KD, Hooton RD, Thomas MDA (1997), Testing the chloride penetration resistance of concrete: a literature review, University of Toronto, Toronto, ON, Canada.

Tuutti, Kyösti . (1982) Corrosion of Steel in concrete.468 pages.

Wilson, M., Carter, M. and Hoff, W. (1999), British standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation, Materials and Structures, 32(8), p. 571-578.

D.R Morgan, M. Ezzet and C. Pfohl, AMEC Eart and environmental limited. Burnaby. BC. Canada, Rehabilitation of the seaweall at Stanley Park Vancouver, BC, Canada whit syntetic fibre reinforced shotcrete, 2004

Dudley R. Morgan, AMEC EArt and environmental, Sotcrete for Africa Conference Shotcrete Quality control and testing for an Underground Mine In Canada, 2009