



**Universidad de Chile**  
**Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas**  
**Departamento de Ingeniería Civil**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ENTRE LA  
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL HORMIGÓN Y SU  
RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORURO**

**MEMORIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**ALVARO MAURICIO GONZÁLEZ SERSEN**

**PROFESOR GUÍA:**  
**Sr. Federico Delfín Ariztía**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**  
**Sr. Víctor Águila Olave**  
**Sr. Gustavo Arriagada Sepúlveda**

**SANTIAGO DE CHILE**  
**AGOSTO 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: ALVARO GONZÁLEZ SERSEN  
FECHA: 04/08/2011  
PROF. GUÍA: Sr. FEDERICO DELFÍN A.

## **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DEL HORMIGÓN Y SU RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DE IONES CLORURO**

El objetivo del presente trabajo es estudiar la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro. La importancia del tema tratado se enmarca dentro de la necesidad de encontrar un procedimiento rápido y no destructivo de inspección, que permita evaluar in situ la vulnerabilidad de una estructura de hormigón armado a la penetración de iones cloruro, para poder adoptar oportunamente las medidas preventivas que se requieran para resistir los ataques de los agentes que la deterioran. La metodología empleada se basa en medir la migración de iones bajo un campo eléctrico, con los métodos que especifican las normas ASTM G5795a y ASTM C1202, correspondientes a:

- 1) La resistividad mediante el Método de Wenner que mide la conductividad eléctrica de la solución de poros a partir de los iones que están disueltos naturalmente en el hormigón.
- 2) La penetración de iones cloruro introducidos externamente en la solución de poros.

Para abordar la investigación, se compararon 12 series de hormigón con distinta permeabilidad (A/C 0.45 y 0.55) y distintos tipos de cemento (Portland puro, Portland Puzolánico y Portland Siderúrgico). También se consideró como variable la temperatura de colocación del hormigón (15 y 30 °C) para verificar la posible alteración en la permeabilidad del hormigón. Los resultados obtenidos permitieron verificar el buen comportamiento de los hormigones con materiales puzolánicos. A su vez, los resultados muestran que la reducción en permeabilidad debido al uso de adiciones minerales es muy superior al efecto observado en resistencia mecánica. Es por esto que las principales variables que se deben manejar para obtener un hormigón durable serían las correspondientes a la microestructura de los productos de hidratación (porosidad e interconectividad de poros). Finalmente, el estudio muestra que la resistividad eléctrica del hormigón se puede relacionar de buena manera con la resistencia a la penetración de iones cloruro con una función exponencial del tipo  $Res=K \cdot Pen^n$ , que corresponde en parte a la solución de los procesos de migración.

A mis padres, maestros y amigos...

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>8</b>
1.1	Aspectos generales.....	8
1.2	Objetivos.....	12
1.2.1	Objetivos generales.....	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
<b>2</b>	<b>Antecedentes.....</b>	<b>13</b>
2.1	El hormigón.....	13
2.1.1	Proceso de hidratación de la pasta de cemento.....	14
2.1.1.1	Hidratación del cemento con adición puzolánica.....	18
2.1.2	Microestructura de la pasta cementicia.....	19
2.1.2.1	Sólido.....	20
2.1.2.2	Porosidad.....	23
2.1.2.3	El agua en la pasta de cemento endurecida.....	26
2.1.3	Microestructura de la zona interfacial.....	28
2.1.4	Desarrollo de la hidratación.....	30
2.2	Mecanismos de transportes en el hormigón.....	32
2.2.1	Introducción.....	32
2.2.2	Difusión.....	33
2.2.3	Migración/Conducción.....	37
2.2.4	Convección.....	40
2.2.5	Permeabilidad.....	40
2.2.6	Succión/Absorción capilar.....	41
2.2.7	Procesos de transporte combinados.....	42

2.3	Corrosión del acero en el hormigón.....	43
2.3.1	Introducción.....	43
2.3.2	Definición de corrosión.....	43
2.3.3	Corrosión del acero.....	44
2.3.3.1	Diagrama de Pourbaix.....	47
2.3.3.2	Tipo de corrosión en las armaduras y causas de desprotección.....	49
2.3.4	Mecanismos de corrosión.....	50
2.3.5	Procedencia y tipos de cloruro.....	53
2.3.6	Penetración de iones cloruro en el hormigón.....	54
2.3.7	Velocidad de penetración de iones cloruro.....	56
2.3.8	Contenido crítico de cloruros.....	56
2.3.9	Resistividad eléctrica.....	57
2.4	Antecedentes de evaluación.....	62
2.4.1	Método de resistividad eléctrica.....	63
2.2.4	Método de migración de iones introducidos externamente.....	64
2.5	Trabajos que motivan esta investigación.....	67
<b>3</b>	<b>Planteamiento de la Investigación.....</b>	<b>69</b>
3.1.	Variables a estudiar.....	69
3.1.1	Razón agua-material cementicio (A/C).....	69
3.1.2	Tipo de cemento.....	69
3.1.3	Temperatura inicial.....	70
3.1.4	Condiciones de curado.....	71
3.2	Programa de ensayos.....	73
3.3	Descripción de los ensayos.....	74
3.3.1	Método de Wenner.....	74

3.3.1.1	Limitaciones del ensayo.....	76
3.3.2	Ensayo de penetración de iones cloruro.....	78
3.3.2.1	Limitaciones del ensayo.....	81
<b>4</b>	<b>Desarrollo experimental.....</b>	<b>83</b>
4.1	Caracterización de los materiales.....	83
4.1.1	Cemento.....	83
4.1.2	Áridos.....	84
4.1.3	Agua de amasado.....	86
4.1.4	Dosificación.....	86
4.2	Ensayos de caracterización de comportamiento.....	88
4.2.1	Ensayos de hormigón fresco.....	88
4.2.1.1	Asentamiento de cono.....	88
4.2.1.2	Densidad.....	89
4.2.1.3	Contenido de aire.....	89
4.2.2	Ensayo de hormigón endurecido.....	90
4.2.2.1	Resistencia a compresión de probetas cúbicas.....	90
<b>5</b>	<b>Resultados de los ensayos.....</b>	<b>91</b>
5.1	Caracterización de los hormigones estudiados.....	91
5.2	Ensayo de resistividad eléctrica.....	92
5.3	Ensayo de penetración de iones cloruro.....	94
<b>6</b>	<b>Análisis de los resultados y discusión.....</b>	<b>96</b>
6.1	Ensayo de resistencia a compresión.....	96

6.2	Ensayo de resistividad eléctrica.....	98
6.3	Ensayo de penetración de iones cloruro.....	101
6.4	Correlaciones obtenidas.....	107
6.4.1	Regresión obtenida en los ensayos de permeabilidad.....	107
6.4.2	Regresión obtenida en los ensayos de migración de iones.....	108
<b>7</b>	<b>Conclusiones Finales.....</b>	<b>110</b>
<b>8</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>114</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>116</b>
<b>10</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>122</b>
A	Ensayo a compresión a los 28 días.....	122
B	Ensayo ASTM C1202.....	126
C	Método de Wenner.....	133

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Aspectos generales

La corrosión de las armaduras del hormigón se ha convertido en el principal problema económico de las construcciones civiles, poniendo en duda la efectividad de las herramientas de diseño que se han venido utilizando y provocando que muchas estructuras diseñadas para una vida útil de 50 a 100 años presenten graves patologías luego de 10 a 30 años de servicio.

En condiciones normales, el hormigón provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad ( $\text{pH} > 12$ ) hace que el acero se encuentre en un estado denominado *pasivo*, siendo su velocidad de corrosión despreciable. Sin embargo, la presencia de agentes agresivos (cloruros, sulfatos, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), etc.) en la superficie de las armaduras puede causar la pérdida de pasividad del acero y crear condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras. Los iones cloruro son los principales causantes de la corrosión de las armaduras en estructuras expuestas a ambientes marinos, climas fríos donde se usan sales de deshielo y en estructuras construidas con hormigones contaminados. En los primeros casos los iones cloruros pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros del hormigón y en el último, se incorporan al hormigón como contaminantes de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.). En ese sentido, existen 3 mecanismos principales que son la base para determinar la penetrabilidad del hormigón. Ellos son [19]:

- **Permeabilidad:** Transporte de sustancias a través de la estructura de poros del hormigón por gradientes de presión (*Ley de Darcy*).
- **Succión capilar:** Captación de líquidos por fuerzas capilares debido a la diferencia de presión entre el agua y el aire (*Capacidad de absorción*).
- **Migración de iones:** Transporte de iones debido a la acción simultánea de un gradiente de concentración y un campo eléctrico como fuerzas de conducción (*Ecuaciones de Nernst-Planck*).

Para medir la migración de iones existen 2 métodos distintos que son: resistividad (medida de la conductividad eléctrica de la solución de poros del hormigón, con iones disueltos naturalmente en el hormigón) y la penetración de iones introducidos externamente en la solución de poros bajo un campo eléctrico. Las características del campo eléctrico pueden ser distintas: para medir la resistividad el voltaje aplicado puede ser de 10 [v] e incluso inferior, para la migración de iones introducidos externamente el voltaje aplicado esta en el rango de 60 a 80 [V].

Las mediciones de resistividad in-situ se llevan a cabo comúnmente con el método de Wenner, que es una adaptación de un método de ensayo para medir la resistividad del suelo (ASTM G-57-95<sup>a</sup> [1]). El ensayo presenta el atractivo de ser un método no destructivo de inspección que permite conocer la conductividad eléctrica o su recíproco, la resistividad en forma instantánea, lo cual presenta un importante ahorro de tiempo al momento de evaluar la durabilidad de servicio. La repetición de los valores de resistividad se expresa como un coeficiente de variación en el rango de 20% para condiciones de laboratorio, 30% in-situ y no se especifica un acondicionamiento previo del hormigón. En algunos instrumentos disponibles en el mercado (Figura 1.1), la proporción de corriente que pasa a través del hormigón se puede medir con respecto a una probeta nominal. Este índice proporciona información sobre la confiabilidad de las mediciones; con gran precisión en las mediciones cuando la proporción es mayor o igual que un 90%.



Figura 1.1: Mediciones de resistividad in-situ utilizando el Método de Wenner.

Entre los ensayos para medir la migración de iones introducidos externamente bajo un campo eléctrico, se encuentra el ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruro [3]. Este ensayo que especifica la norma ASTM C1202 (equivalente AASHTO T-277) es uno de los tantos ensayos que tienen por objeto estudiar los mecanismos de transporte de los iones cloruro dentro del hormigón. El método presentado en la norma consiste en generar un flujo no estacionario de iones cloruro (Non Steady State Migration Test) a través del hormigón mediante la aplicación de un potencial eléctrico externo de 60V. De esta manera, los iones cloruro son forzados a migrar desde la celda catódica (que contiene una solución de NaCl al 3% peso en volumen) hacia la celda anódica (que contiene Na(OH) con una concentración 0.3N). En la Figura 1.2 se muestra un esquema del ensayo con la migración de iones introducidos externamente en la solución de poros del hormigón.

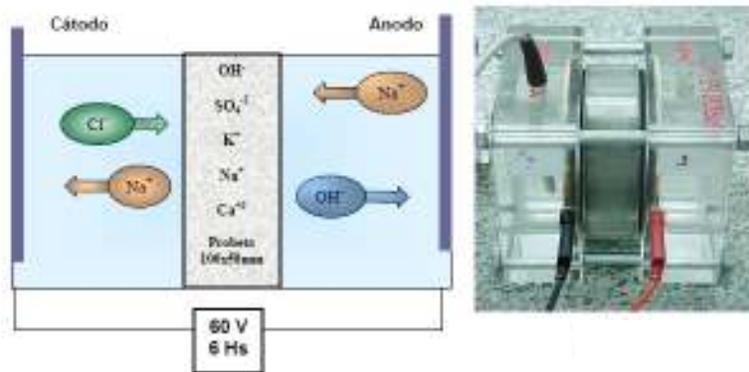


Figura 1.2: Migración de iones cloruro de acuerdo a la norma ASTM C1202.

El transporte de iones en el hormigón es un proceso muy complejo, que involucra los fenómenos de difusión, succión capilar, flujos convectivos que transportan flujos de agua, campos eléctricos, etc., acompañado de fenómenos físicos y químicos.

En la presente investigación se considera solamente 2 mecanismos de transporte: difusión y campos eléctricos.

Con respecto a los procesos de difusión, la determinación de un verdadero coeficiente de difusión es un trabajo complicado, incluso en condiciones de laboratorio. Es más, determinar un coeficiente de difusión es una labor que consume bastante tiempo que lo hace inconveniente para investigaciones in-situ.

Como un campo eléctrico puede en gran medida acelerar el movimiento de iones a través del hormigón sin cambiar en lo fundamental el proceso de difusión, se utilizó este fenómeno para estudiar la relación entre los dos métodos no destructivos más comunes que se utilizan para medir la migración de iones, que pueden ser utilizados tanto en laboratorio como en terreno.

De esta manera, el presente estudio aborda dos métodos distintos que especifican las normas ASTM G-57-95<sup>a</sup> “Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method” y ASTM C1202 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”, para medir la migración de iones bajo un campo eléctrico en la solución de poros del hormigón:

- Método de resistividad eléctrica.
- Método de penetración de iones cloruro.

## **1.2 Objetivos**

Para realizar estimaciones de durabilidad del hormigón, actualmente se ejecutan ensayos acelerados de desempeño, los cuales simulan en laboratorio las condiciones a las que estará sometida una estructura durante su vida útil. Por lo antes señalado, se pretende investigar en el presente estudio el transporte de sustancias al interior del hormigón y en particular de los iones cloruro. Si bien se conocen una diversidad de factores relevantes en el comportamiento del hormigón, se considera como parámetro a controlar la resistividad eléctrica para unas condiciones de ensayo que permita relacionarlo con la migración/conducción de iones cloruro introducidos externamente en la solución de poros bajo un campo eléctrico.

### ***1.2.1 Objetivos generales***

Estudiar la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

- Estudiar la migración/conducción de iones en la solución de poros del hormigón.
- Investigar la influencia de la calidad del hormigón (tipo de cemento, relación agua-material cementicio y tipo de curado) en el transporte de sustancias iónicas.
- Conocer los beneficios de agregar adiciones minerales al clinker.
- Estudiar el efecto de la temperatura inicial del hormigón sobre las propiedades de permeabilidad.

## 2 ANTECEDENTES

### 2.1 El hormigón

Desde un punto de vista macroscópico, el hormigón es un material poroso que se compone de dos fases, de una matriz de pasta de cemento y de partículas de árido. A nivel microscópico, la complejidad del sistema aumenta, porque ambas fases no están distribuidas homogéneamente una respecto a la otra, ni son homogéneas en sí mismas.

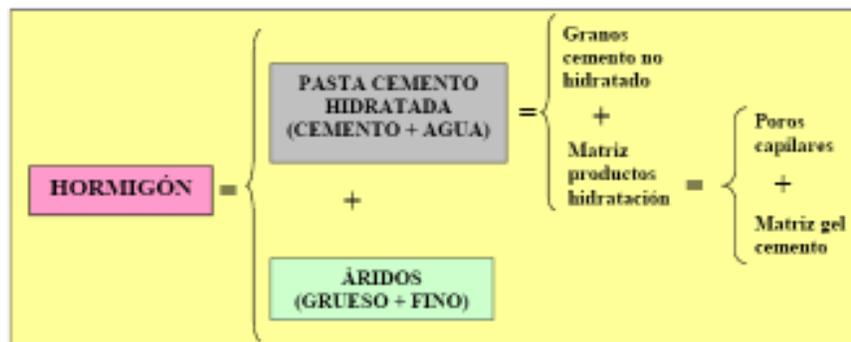


Figura 2.1 Fases del hormigón

Puesto que el hormigón se puede modelar como un material compuesto de partículas de árido dispersas en una matriz de pasta de cemento endurecida, resulta lógico pensar que las características de tal material son el resultado de sumar las propiedades independientes de cada uno de los componentes y de la naturaleza de la interacción entre ellos o, lo que es lo mismo, de la naturaleza de la interfaz. Sin embargo, en la actualidad está ampliamente reconocido que la estructura de la matriz de cemento en las proximidades de los áridos es muy distinta a la del resto de la pasta, aunque dicha microestructura de la zona interfacial es variable en función de la naturaleza del cemento, del tipo de árido, de las condiciones de curado, etc.

De esta manera, por tratarse de un material bastante complejo, heterogéneo y cambiante en el tiempo, es importante, en el estudio de sus propiedades, conocer el proceso de hidratación de la pasta de cemento (incorporación de agua al cemento para formar una

pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire) y las fases que componen la microestructura del hormigón una vez endurecido.

### 2.1.1 Proceso de hidratación de la pasta de cemento

El cemento hidráulico más comúnmente usado para hacer hormigón es el cemento portland, que está constituido básicamente por calcio, sílice, alúmina y óxido de hierro. Durante su producción estos componentes reaccionan entre ellos formando productos más complejos, llamados fases del clinker. La Tabla 2.1 presenta los constituyentes fundamentales del clinker. Las proporciones de los óxidos elementales de los diversos elementos presentes en los cementos varían dentro de unos límites, tal y como se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.1. Principales compuestos del cemento Portland

Nombre del Compuesto	Composición Óxidos	Abreviatura	%	Evolución calor hidrat.	Resistencia y endurec.
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	<b>C<sub>3</sub>S</b>	42 - 60	Rápido	Mediano plazo (primeras 4 sem.)
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	<b>C<sub>2</sub>S</b>	14 - 35	Lento	Largo plazo (4 sem. →)
Aluminato tricálcico (*)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	<b>C<sub>3</sub>A</b>	6 - 13	Muy rápido	Corto plazo (1-3 días)
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	<b>C<sub>4</sub>AF</b>	5 - 10	Muy lento	Largo plazo (primeros meses)

\* sensible a ataques de sulfatos

+ otros como ser (MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, etc.)

Tabla 2.2. Composición química y características usuales del cemento Portland

Componentes Principales	Notación Química	Origen	Proporción (%)	Características
CaO (cal)	<b>C</b>	Carbonato de calcio (caliza)	60 - 67	- Componente principal - Prop. mecánicas aumentan con cantidad de cal - Cal libre, encima de ciertos límites, perjudica estabilidad de volumen
SiO <sub>2</sub> (sílice)	<b>S</b>	Arcillas	17 - 25	- Por combinación con la cal resultan los compuestos más importantes del cemento
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (alúmina)	<b>A</b>	Arcillas	3 - 8	- Fundente - Acelera fraguado cemento - Reduce resistencia a los sulfatos
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de hierro)	<b>F</b>	Arcillas	0,5 - 6	- Fundente más energético - Junto con alúmina facilita producción comercial de cemento con alto % de cal sin tener cal libre
SO <sub>3</sub> (sulfatos)	<b>S</b>	Sulfato de calcio (yeso)	≤ 3	- Retarda fraguado - En exceso produce sulfoaluminato que perjudica estabilidad de volumen
MgO (Magnesia)		Caliza o arcilla	0,1 - 4	- En grandes cantidades actúa como expansivo
K <sub>2</sub> O y Na <sub>2</sub> O (álcalis)		Caliza o arcilla	0,2 - 1,3	- Fundente - Provee alcalinidad al hormigón - Acelerador fraguado - Reacción alcali-agregado (expansión)
TiO <sub>2</sub> - MnO <sub>3</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				
Residuo insoluble		Impurezas yeso	≤ 0,5	- Medida adulteración cemento
Pérdidas al fuego			2	- Medida carbonatación e hidratación de cal y magnesio libre por exposición atmosférica
H <sub>2</sub> O	<b>H</b>			

Los silicatos y aluminatos presentes en el cemento Portland forman productos de hidratación al mezclarse con agua, los cuales son los responsables de que, con el paso del tiempo, la pasta se transforme en una masa firme y resistente.

#### **- Hidratación de los silicatos**

Los silicatos tricálcico (C<sub>3</sub>S) y dicálcico (C<sub>2</sub>S) son los componentes principales, que están presentes en mayor proporción en el cemento Portland, y cuyos productos de hidratación son los responsables de las propiedades mecánicas y del desarrollo de la resistencia del hormigón a lo largo del tiempo [6].

Las ecuaciones de reacción entre los silicatos y el agua pueden escribirse como se muestra a continuación.

**Para C<sub>3</sub>S**



Silicatos tricálcico + Agua → Gel tobermorita + Hidróxido de calcio

**Para C<sub>2</sub>S**



Silicatos dicálcico + Agua → Gel tobermorita + Hidróxido de calcio

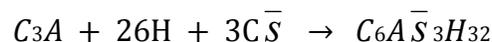
Ambos silicatos no se hidratan al mismo tiempo y se sabe que el C<sub>3</sub>S reacciona primero, con lo cual le contribuye resistencia mecánica a corto y mediano plazo al cemento. Por su parte el C<sub>2</sub>S le concede al cemento resistencia mecánica a mediano y largo plazo.

Los productos de ambas reacciones son similares, el C<sub>3</sub>S<sub>2</sub>H<sub>3</sub> es conocido como gel de tobermorita (llamado así por poseer una estructura aparentemente similar al mineral tobermorita) y el otro producto es el Ca(OH)<sub>2</sub> (conocido como portlandita), el cual es la cal liberada como hidróxido de calcio [6].

**- Hidratación de los aluminatos**

Las ecuaciones de hidratación de los aluminatos son las siguientes:

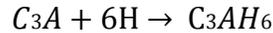
**Para C<sub>3</sub>A**



Aluminato tricálcico + Agua + Yeso → Etringita



Aluminato tricálcico + Agua + Yeso → Monosulfoaluminato



Aluminato tricálcico + Agua  $\rightarrow$  Hidrato de aluminato tricálcico

**Para C<sub>4</sub>AF**



Ferroaluminato tetracálcico + Hidróxido de calcio + Agua  $\rightarrow$  Hidrato de ferroaluminato tetracálcico

El aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) y el ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF) son considerados los aluminatos del cemento. Están presentes en el cemento en menores proporciones y actúan durante la fabricación como fundentes, de modo tal que logran reducir la temperatura de cocción del clinker, facilitando la combinación de cal y sílice [6].

En el proceso de hidratación, el aluminato tricálcico reacciona casi inmediatamente con el agua, es por este motivo que se agrega yeso, el cual actúa como un retardante. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico y forma etringita (C<sub>6</sub>A $\bar{S}$ 3H<sub>32</sub>) y monosulfoaluminato (C<sub>4</sub>AS $\bar{H}$ <sub>12</sub>) [6].

Los productos del ferroaluminato tetracálcico al reaccionar con el yeso poseen estructuras similares a la etringita y al monosulfoaluminato. Al disminuir en la pasta la concentración de sulfato, la concentración de aluminato sube lo que provoca que la etringita se vuelva inestable y se convierta gradualmente en monosulfoaluminato [6].

Cabe destacar que la alcalinidad del hormigón que protege al acero de refuerzo, se debe principalmente a los álcalis provenientes del cemento y del hidróxido de calcio (portlandita) generado en la hidratación de los silicatos.

$$\frac{\text{ALCALINIDAD DEL HORMIGON}}{\text{ALCALINIDAD DEL CEMENTO}} = \frac{(K_2O + Na_2O)}{\text{PORTLANDITA}} + \frac{(Ca(OH)_2)}{\text{PORTLANDITA}}$$

De esta manera, la pasta de cemento finalmente endurecida queda compuesta por productos hidratados de diversos componentes, denominados genéricamente de gel, cristales de  $\text{Ca(OH)}_2$ , etringita, algunos compuestos menores, cemento no hidratado, y espacios residuales llenos de agua en pasta fresca [6]. La tendencia con el paso del tiempo es la de que los productos hidratados continúen llenando los poros y que la porosidad, a su vez, disminuya hasta alcanzar valores que van a depender de factores intrínsecos del material y del medio exterior que influyen en el grado de hidratación, como: la composición del cemento, la finura, la relación agua/cemento, la compactación, el curado en las primeras edades, la edad y la existencia de adiciones minerales (escorias siderúrgicas, puzolanas, etc.).

#### 2.1.1.1 Hidratación del cemento con adición puzolánica

Una puzolana es un material natural (cenizas volcánicas) o artificial (subproductos industriales o agrícolas) que contiene fundamentalmente silicio o silicio y aluminio. Esto les da un carácter ácido y por lo tanto una gran afinidad por la cal (tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente).

La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño. Sin embargo, cuando una puzolana se usa en combinación con el cemento Portland, reacciona con el hidróxido de calcio de este a través de una reacción secundaria a la reacción de hidratación de los componentes del cemento, para formar compuestos cementantes.

Cuando hay puzolana dentro de los materiales cementíceos, esta actúa de la siguiente forma:



Donde:

C-S-H: Silicatos de calcio hidratados de estequiometría no definida.

Básicamente, un cemento Portland en el proceso de hidratación produce gel de tobermorita e hidróxido de calcio (portlandita). Un cemento con adición puzolánica hace lo mismo, pero el hidróxido de calcio, producto de la reacción con los silicatos, es consumido por el material puzolánico produciendo más gel de tobermorita; este fenómeno otorga características adicionales al cemento con adición que no tiene el cemento Portland puro.

La generación de silicatos de calcio a partir de la reacción puzolánica contribuye a densificar la microestructura del hormigón y disminuir la porosidad de la pasta, ya que los poros capilares son eliminados o reducidos en tamaño, y los densos cristales de hidróxido de calcio son sustituidos por C-S-H adicional de una densidad menor, lo que mejora las características de durabilidad del hormigón [6].

A continuación se abordará los aspectos relacionados con la microestructura del material cementicio endurecido formada en el proceso de hidratación.

### 2.1.2 Microestructura de la pasta cementicia

La fase pasta de cemento del hormigón es el resultado directo de la hidratación del cemento Portland con una cantidad determinada de agua.

Desde el contacto del cemento con el agua, se desarrollan en cuestión de minutos u horas diferentes compuestos que experimentan cambios continuos en su estructura cristalina. A medida que va pasando el tiempo, estos cambios se van haciendo más lentos; aunque en la mayoría de los sistemas cementíceos los procesos de hidratación rara vez se completan en la práctica. Esto quiere decir que incluso después de transcurridos años se producen transformaciones de productos de hidratación que originan cambios microestructurales.

De este modo, una pasta de cemento que se está hidratando genera no una microestructura simple, sino una sucesión de microestructuras en las distintas etapas de su desarrollo. Además hay que añadir que para una pasta dada a una edad determinada, algunos aspectos microestructurales varían de una zona a otra de la pasta, debido a las variaciones en su composición y en la distribución de las distintas fases.

En un modelo microestructural simplificado de la matriz de base del cemento se distinguen los siguientes componentes: pasta de cemento, áridos, interfase árido-pasta e interfase acero-pasta (si es armado). La pasta de cemento endurecida, componente principal de la microestructura desde el punto de vista de la durabilidad, se divide básicamente en tres fases (sólido, porosidad y la fase acuosa) sobre los cuales se comenta a continuación.

#### 2.1.2.1 Sólido

Los principales componentes de la fase sólida de la pasta son: el cemento anhidro, el gel de silicatos cálcicos hidratados o tobermorita (gel de C-S-H), el hidróxido cálcico o portlandita (CH) y los sulfoaluminatos cálcicos hidratado (fases AF<sub>t</sub> y AF<sub>m</sub>).

Todos estos compuestos, junto con los granos del cemento no hidratado, forman la fase microestructural sólida de la pasta de cemento.

##### 2.1.2.1.1 Cemento anhidro

Aún después de años, parte del clinker puede permanecer en estado anhidro o sin agua por razones diversas. Una de las razones es la concentración de los productos de hidratación que restringe la movilidad de los granos de cemento hasta que la pasta se endurece, o debido a la adición de una cantidad de agua inferior a la necesaria para la completa hidratación del cemento [39].

#### 2.1.2.1.2 Gel de Tobermorita (C-S-H)

La hidratación de  $C_2S$  y  $C_3S$  da lugar al compuesto C-S-H, que generalmente contiene pequeñas cantidades de Al, Fe, Mg y otros iones. Es el principal compuesto aglomerante de los productos de hidratación de la pasta de cemento, pues ocupa el orden del 50 al 60% del volumen de sólidos si la hidratación es completa y liga o aglutina entre sí a todos los componentes.

La estructura cristalina del CSH es de gran importancia, ya que es ésta la que determina las fuerzas de enlace, y por lo tanto su cohesión interna y propiedades. En la actualidad existe un desacuerdo evidente en relación a la estructura del CSH; aunque existe coincidencia en cuanto a que es predominantemente amorfa.

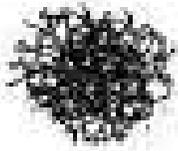


Figura 2.2 Gel de Tobermorita (C-S-H)

#### 2.1.2.1.3 Cristales de Portlandita (CH)

Los cristales de portlandita (CH) ocupan del 20 al 25% del volumen total de sólidos de la pasta endurecida totalmente hidratada. Más del doble de la cantidad de hidróxido de calcio  $Ca(OH)_2$  es generado por la hidratación del  $C_3S$ .

Por el gran tamaño de los cristales, y por tanto, por su baja superficie específica, las fuerzas de enlace entre los cristales de C-H o entre cristales de éstos con otros sólidos son relativamente débiles. Esto hace que comparado con el C-S-H, la contribución de los cristales de C-H a la resistencia de la pasta del hormigón sea mínima y algunos autores basan la debilidad de la interfase árido-pasta y acero-pasta en la precipitación de placas de portlandita en estas zonas.. Por otra parte, altos contenidos de hidróxido cálcico en la pasta de cemento hidratado puede tener un efecto adverso para la durabilidad del hormigón, debido a la elevada solubilidad del C-H en medios acuosos.

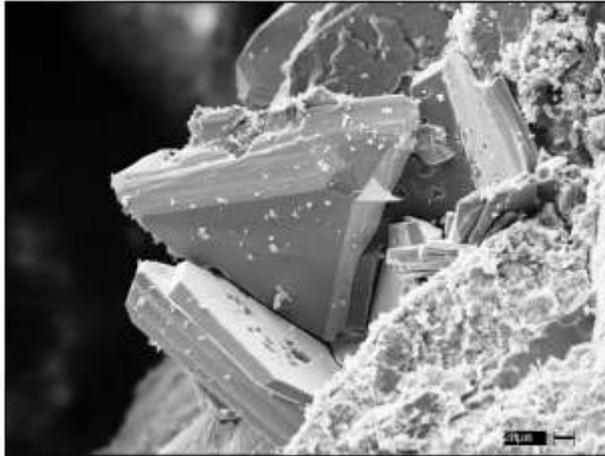


Figura 2.3 Cristales de Portlandita (CH) [5]

#### 2.1.2.1.4 Sulfoaluminatos Cálcidos (fases AF<sub>t</sub> y AF<sub>m</sub>)

Los sulfoaluminatos cálcicos suponen entre un 15 y 20 % del volumen de sólidos en la pasta de cemento. Ambas fases aportan características de gran significado para explicar el desarrollo de la microestructura de la pasta de cemento, y muy especialmente en algunos cementos especiales, como los cementos expansivos, aunque contribuyen en muy pequeña proporción a las resistencias del producto final.

En las primeras etapas del proceso de hidratación se produce la formación de la fase AF<sub>t</sub> ( $C_6\bar{A}\bar{S}_3H_{32}$ ), denominada etringita, que se presenta en forma de agujas prismáticas. En la Figura 2.4 se muestra una micrografía con la morfología de los cristales de AF<sub>t</sub>.

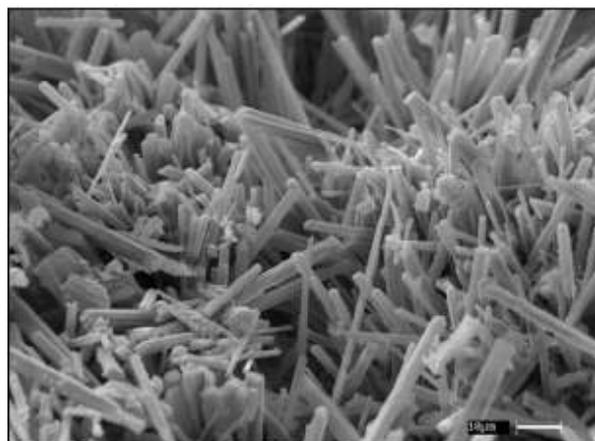


Figura 2.4 Cristales de Etringita (C-A-S-H) [5]

La etringita puede, en condiciones determinadas (descenso de la concentración de iones  $SO_4^{-2}$  ó  $Ca^{+2}$  en la fase acuosa de la pasta), transformarse en monosulfoaluminato  $C_4A\bar{S}H_{12}$  (fase AFm), que se manifiesta en forma de cristales hexagonales (ver Figura 2.5). La presencia de este hidrato en el hormigón lo hace vulnerable al ataque por sulfatos.

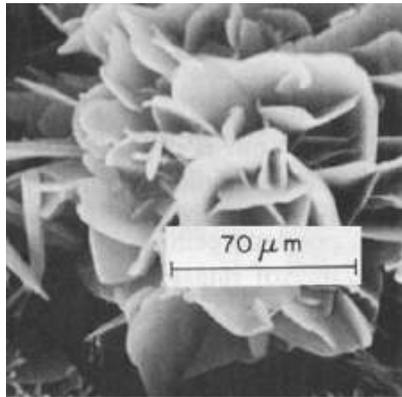


Figura 2.5. Cristales de monosulfoaluminato cálcico hidratado [5]

#### 2.1.2.2 Porosidad

Además de las fases sólidas ya descritas, la pasta de cemento contiene varios tipos de poros que disminuyen con el tiempo debido a los procesos de hidratación. Sin embargo, el volumen de vacíos sigue existiendo en el material, por lo que la distribución del tamaño y la conectividad van a influir en la transferencia de materia en el medio poroso. Según Powers [40], los poros de la pasta endurecida pueden ser clasificados en dos distintos grupos que difieren por el tamaño: poros de gel y poros capilares. Existen, además, los poros de aire y, eventualmente, macroporos atribuibles a defectos de compactación.

#### 2.1.2.2.1 Poros de gel C-S-H

En el modelo de Powers [40], los espacios interlaminares se denominan poros de gel y constituyen una porosidad intrínseca del gel que representa el orden del 28% del volumen de este, con un diámetro submicroscópico que puede variar entre 5 y 20 Å. Por ello, sobre su superficie puede quedar adsorbida una película de agua de como máximo 3-4 moléculas de espesor.

El tamaño de estos poros es tan pequeño que no influye en las resistencias y la capacidad de transporte del material. Además, al ser los poros de gel intrínsecos a la estructura de la pasta, su volumen absoluto aumenta a medida que crece el de los productos de hidratación, es decir, el grado de hidratación [6], contrariamente a lo que sucede con los poros capilares.

#### 2.1.2.2.2 Poros capilares

De manera simplificada, los poros capilares representan el volumen de huecos ocupado por el agua libre de la pasta de cemento. El volumen y tamaño de estos poros viene determinado por la relación agua/cemento y el grado de hidratación del cemento. Para una cierta razón agua/cemento, el volumen de poros capilares de la pasta se reduce a medida que el material cementíceo se hidrata.

En pastas 100 % hidratadas de distinta razón agua/cemento para un volumen dado, todas presentan igual cantidad de productos de hidratación, sin embargo el volumen de poros capilares aumenta desde la relación agua/cemento 0.4 a la relación agua/cemento 0.7.

En pastas bien hidratadas y con relaciones agua/cemento bajas, del orden de 0.4, los poros capilares tienen tamaños entre 10 y 50 [nm]. En pastas con altas relaciones agua/cemento y en las primeras edades de la hidratación, los poros capilares pueden estar sobre los 3 a 5 [ $\mu\text{m}$ ].

Los poros capilares de tamaño superior a 50 [nm] tiene efectos negativos sobre la resistencia e impermeabilidad, mientras que los inferiores a 50 [nm] influyen más sobre la estabilidad dimensional del hormigón.

Los poros capilares son los más importantes desde el punto de vista de la durabilidad ya que son los que controlan el transporte de materia en el interior del hormigón, debido, por un lado, a las fuerzas capilares y de tensión superficial de estos huecos, y por otro, a que son el medio por donde penetran y difunden los agresivos externos.

#### 2.1.2.2.3 Poros de aire

Estos poros, que son generalmente de forma esférica, pueden ser de dos tipos:

- Los que se generan durante el amasado de la pasta fresca, cuyo tamaño suele estar en torno a los 3 [mm].
- Los que se introducen con aditivos específicos, que pueden tener un tamaño entre 20 y 500 [ $\mu\text{m}$ ].

Tanto unos como otros pueden tener efectos adversos sobre la resistencia y la impermeabilidad de la pasta, no obstante, los últimos mejoran significativamente el comportamiento del hormigón frente a ciclos de congelamiento y deshielo.

En la Figura 2.6 se muestra un modelo simplificado de la estructura de la pasta. Los puntos sólidos representan las partículas del gel, los espacios intersticiales son poros del gel y los espacios tales como los marcados con C son cavidades capilares. El tamaño de los poros del gel se muestra exagerado [6].

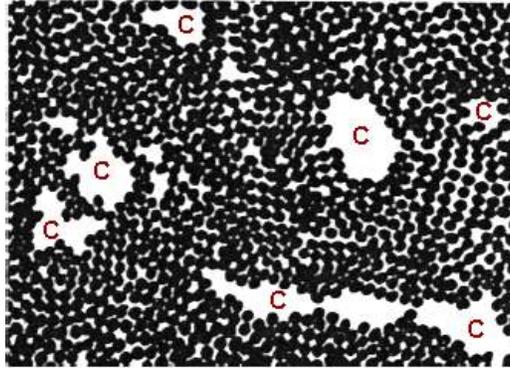


Figura 2.6 Modelo simplificado de la estructura de la pasta de cemento hidratada [6].

### 2.1.2.3 El agua en la pasta de cemento endurecida

En el agua presente en la matriz de pasta de cemento endurecida se encuentran disueltos tanto los iones provenientes del cemento ( $OH^-$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ) como los que hubieran podido penetrar desde el exterior ( $Cl^-$ ), en concentraciones dadas por su equilibrio con las fases sólidas.

Al igual con lo que sucede con la parte sólida y los poros, el agua de la pasta de cemento se puede encontrar en varias formas, que se clasifican según el mayor o menor grado de energía para ser eliminada. Según Powers [39], el agua presente en los poros se divide en dos categorías: no evaporable y evaporable. Por otro lado, algunos autores [5] clasifican el agua presente en la pasta de acuerdo a la facilidad o dificultad que existe para evaporar o desplazar esa agua, dando origen a diferentes tipos de agua en la pasta.

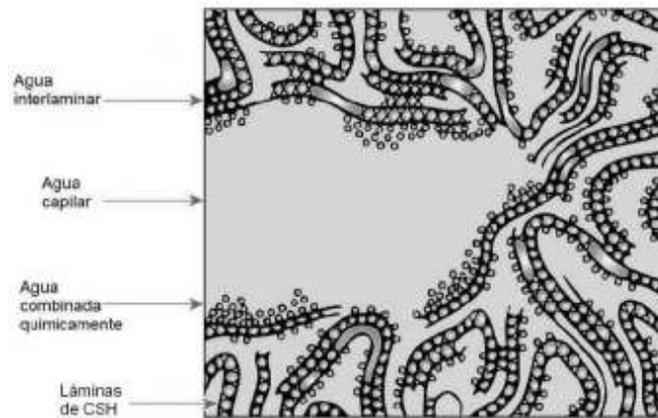


Figura 2.7 Distintos tipos de agua en el cemento hidratado

#### 2.1.2.3.1 Agua capilar

Es el agua presente en los poros con tamaño superior a 50 Å. Desde el punto de vista de su comportamiento, esta agua se puede subdividir en:

- El agua contenida en poros de tamaño superior a 50 [nm], que se puede considerar como agua libre, y su eliminación no altera el volumen.
- El agua contenida en poros de tamaño entre 5 - 50 [nm], que está ligada por la tensión capilar. Su eliminación puede originar inestabilidad volumétrica (retracción).

#### 2.1.2.3.2 Agua adsorbida

Esta agua está ligada a la superficie del sólido por fuerzas moleculares atractivas. La energía de enlace de las moléculas individuales de agua decrece con la superficie del sólido. Así, una gran proporción de agua adsorbida puede ser eliminada secando la pasta hasta un 30 % de humedad relativa. La pérdida del agua adsorbida es la principal responsable de la retracción de la pasta de cemento.

#### 2.1.2.3.3 Agua interlaminar

Es el agua asociada a la estructura del gel de CSH. Hay teorías que dicen que entre dos capas CSH hay una capa de moléculas de agua fuertemente retenida por enlaces de hidrógeno. El agua interlaminar sólo se pierde por un secado muy intenso (por debajo de un 11% de humedad relativa) y cuando esto ocurre la estructura del CSH se retrae considerablemente.

#### 2.1.2.3.4 Agua combinada químicamente

Este agua forma parte integral de la estructura de varios de los productos de hidratación del cemento. No se pierde por secado sino por descomposición de los productos a los que está ligada.

En cuanto a la durabilidad, es el contenido de agua en su estado libre (o evaporable) la que influye en los procesos de deterioro relacionado con la corrosión, y su volumen varía en función de la temperatura (T) y de la humedad relativa (HR) interior.

En la Figura 2.8 se muestra los diferentes tipos de agua en la pasta de cemento hidratada

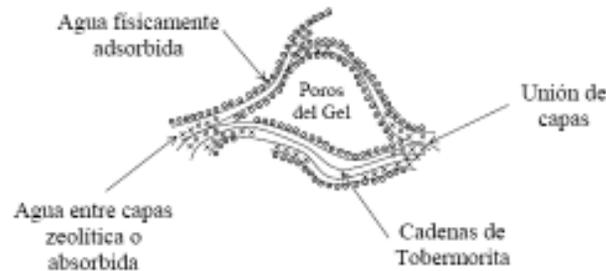


Figura 2.8. Estructura probable de los silicatos hidratados [6]

### 2.1.3 Microestructura de la zona interfacial

En la actualidad, es comúnmente aceptado que en las proximidades del árido se desarrolla una microestructura de la pasta de cemento con un espesor de unos 30 a 50 [ $\mu\text{m}$ ], diferente a la del resto del volumen de la pasta, aun en ausencia de reacciones químicas superficiales.

Esta zona de interacción próxima a la superficie de contacto con los áridos, corresponde al 30% de pasta, lo que es relevante, si se toma en cuenta que puede ser la zona que controla la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón, cuyas propiedades dependen de la razón agua/cemento, la granulometría de los áridos y la distribución de éstos en el hormigón [48].

En estudios preliminares se denominó a esta zona como zona de transición o aura de transición. La región se caracteriza por tener una relación agua/cemento superior a la existente en el resto del volumen de la pasta, debido a efectos de exudación superficial en las caras de los áridos y pequeñas fisuras interconectadas. Se destaca además por su elevada porosidad y elevado contenido en CH, que además posee una orientación preferencial con su eje perpendicular a la superficie del árido.

La pasta de cemento está formada por flóculos, cuasiesféricos de algunos cientos de micras, que son suficientemente fuertes como para resistir la dispersión por agitación mecánica mientras se amasa. En consecuencia, los granos de cemento se unen pobremente a las superficies de los áridos, dejando áreas extensas de alto contenido en agua tanto dentro de los flóculos como entre ellos.

Por la rápida sobresaturación del agua en iones  $Ca^{+2}$  y  $OH^{-}$ , se produce un depósito de una capa de CH sobre la superficie del árido, de un espesor de 0.5 [ $\mu\text{m}$ ]. Esta capa de CH no aumenta de espesor con el tiempo, probablemente debido a la presencia de  $\text{SiO}_2$  disuelto en el agua. Esto produce el segundo depósito que es de gel fibroso de CSH, con fibras perpendiculares a la superficie, y de un espesor de 0.5 [ $\mu\text{m}$ ]. A estas dos capas se le conoce con el nombre de película dúplex.

Después de 2 ó 3 días, una segunda capa de CH, con un espesor de 3 [ $\mu\text{m}$ ], se deposita en el dúplex. Son cristales de CH apilados de modo paralelo con su eje orientado perpendicularmente a la citada película. Al mismo tiempo, se generan cristales más largos y tubulares de CH de eje paralelo a la película dúplex. Estos cristales de CH se extienden hacia la pasta y sólo gradualmente dan lugar a la microestructura usual del gel de CSH y CH de la pasta.

El espesor de la zona de transición prácticamente no cambia con el tiempo, ya que sólo depende del espesor de la capa del líquido que inicialmente mojaba al árido.

Mehta y Monteiro indican que la formación de etringita en las zonas próximas al árido juega un papel destacado en el desarrollo microestructural de la interfaz. Según estos autores, a 1 día de hidratación aparecen pronunciados depósitos de etringita en las regiones próximas a los áridos, disminuyendo su contenido según aumenta la distancia al árido.

En la Figura 2.9 se muestra la representación esquemática de la morfología de la interfaz árido - pasta de cemento [5].

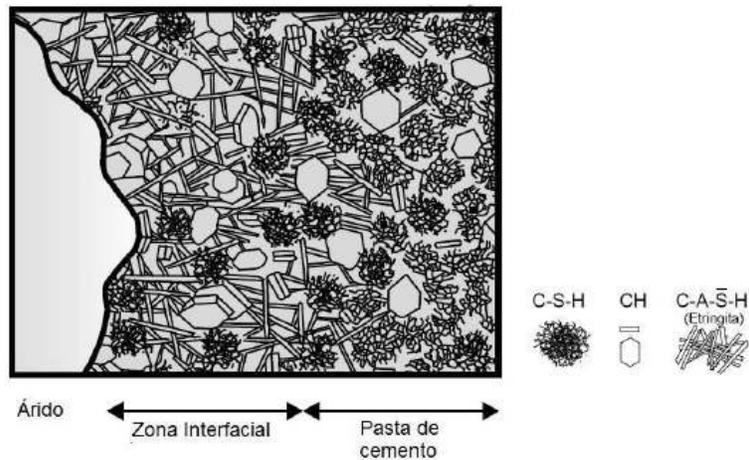


Figura 2.9. Interfaz árido- pasta de cemento

#### 2.1.4 Desarrollo de la hidratación

El desarrollo de la estructura de los productos de hidratación se puede dividir en tres etapas fundamentales:

- i) Etapla inicial: el foco de actividad está fundamentalmente concentrado en la superficie de granos de cemento y en el agua de mezcla más cercana a estas superficies.
- ii) Etapla intermedia: los productos de hidratación se desarrollan y depositan en las superficies de los granos de cemento y en el interior de los espacios inicialmente rellenos de agua, y comienza a conformarse una estructura coherente.
- iii) Etapla final: el esqueleto estructural se rellena con productos de hidratación que provienen del interior de los granos de cemento por un mecanismo de difusión del agua a través de los productos de hidratación.

Las dos primeras etapas se dan durante las primeras horas de hidratación, mientras que la última comprende la mayoría del período real de hidratación activa.

Un esquema de estas tres etapas puede ser visualizado en la Figura 2.10.

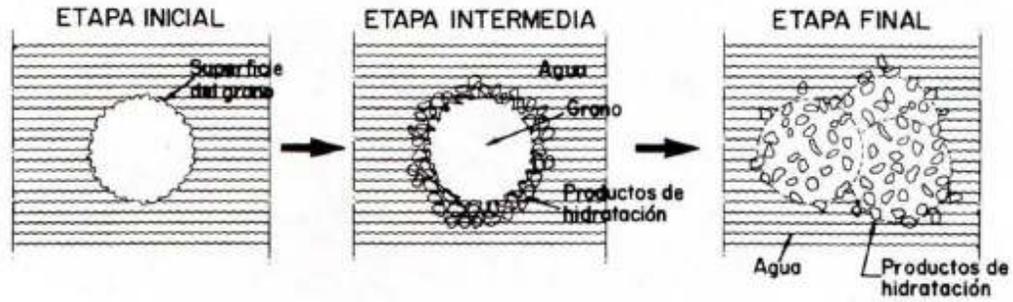


Figura 2.10. Etapas en la hidratación del cemento [47]

En la Figura 2.11 se muestra una visión general de la microestructura y del desarrollo de la hidratación de la pasta de cemento.

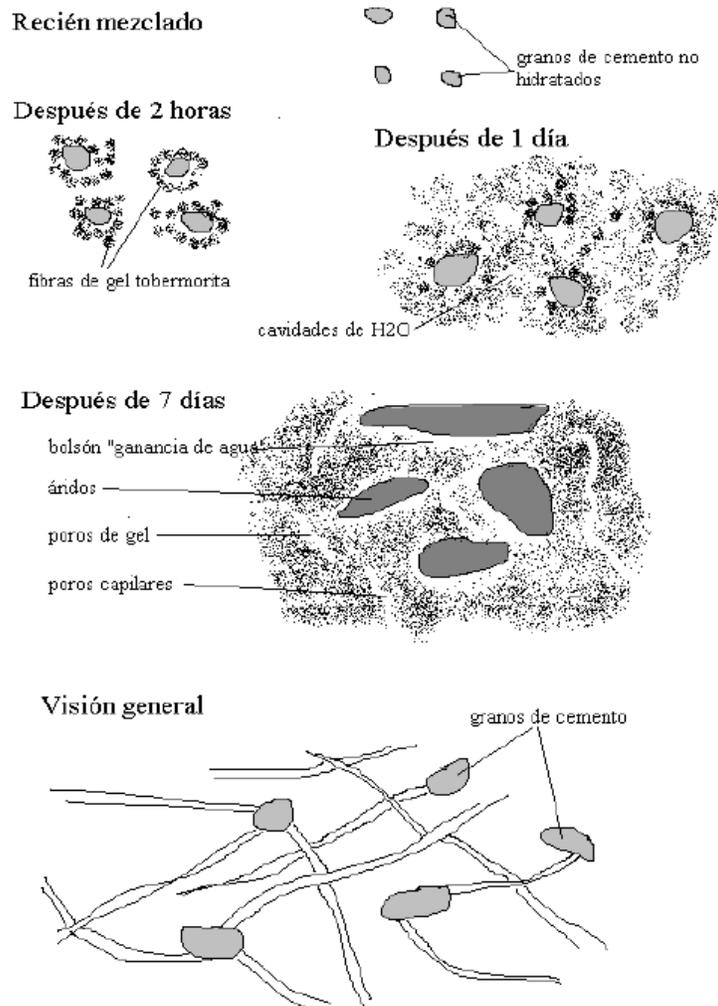


Figura 2.11. Microestructura y desarrollo de la hidratación de la pasta de cemento

## **2.2 Mecanismos de transportes en el hormigón**

### **2.2.1 Introducción**

Las propiedades de transporte son la clave para predecir la durabilidad del hormigón, ya que los mecanismos de deterioración como la corrosión, lixiviación (extracción de sustancias de un sólido mediante un disolvente líquido) o carbonatación están relacionados con la facilidad con la cual un fluido o ión se puede mover a través de la microestructura del hormigón. El paso de especies potencialmente agresivas está influenciado primordialmente por la penetrabilidad del hormigón. La penetrabilidad se define a grandes rasgos como el grado en el cual un material permite el transporte de gases, líquidos o especies iónicas. En este sentido, abarca los conceptos de permeabilidad, absorción, difusión y migración/conducción que son cuantificables en parámetros de transporte [22]. Para una estructura de hormigón armado, limitar el movimiento de fluidos es uno de las funciones que hay que cumplir.

Los procesos envueltos en los fluidos y en el movimiento de iones incluyen los distintos mecanismos de succión capilar, flujo de un fluido bajo presión, flujo bajo un gradiente de concentración y el movimiento por la aplicación de un campo eléctrico. Estos mecanismos están caracterizados por las propiedades del material con su capacidad de absorción, permeabilidad, difusión y migración/conducción respectivamente [23]. La permeabilidad del hormigón está influenciada primordialmente por la permeabilidad de la pasta de cemento, especialmente en la interfase con las partículas del agregado.

Los parámetros de transporte del hormigón relacionan a los mecanismos de difusión, migración/conducción, permeabilidad (succión capilar), absorción y convección (movimiento de moléculas dentro de un fluido). En los siguientes apartados se describen los principales mecanismos de transporte en el hormigón.

### 2.2.2 Difusión

La difusión describe el libre movimiento de átomos, iones o moléculas que resultan en un flujo de masa de regiones de alta concentración a regiones de baja concentración. El flujo por unidad de área de un plano perpendicular al flujo  $q$  es:

$$q = \frac{dm}{dt} \frac{1}{A} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

$q$ : Flujo de masa [ $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$m$ : Masa del fluido de la sustancia [m]

$t$ : tiempo [s]

$A$ : área [ $\text{m}^2$ ]

El concepto de difusión está ligado a la transferencia de masa de un lugar a otro por un gradiente de concentración  $dc/dx$  como una fuerza de conducción para el transporte y al coeficiente de difusión  $D$ . Esta relación se expresa de acuerdo a la primera ley de Fick:

$$q = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde:

$D$ : Coeficiente de difusión [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$C$ : Concentración de un fluido [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$x$ : distancia [m]

El prefijo negativo denota que el flujo ocurre en un gradiente de concentración negativo y la concentración  $c$  se refiere a la fase en que el transporte ocurre, por ejemplo, la cantidad de moléculas de gas en un volumen total de gas, la cantidad de iones disueltos en el volumen total de un líquido, etc. El coeficiente de difusión  $D$  describe el movimiento de las especies en la fase del fluido.

En términos prácticos, la ecuación de Fick es solamente útil después de una condición de flujo permanente, es decir, cuando no existe un cambio de concentración en el tiempo. Sin embargo, la ecuación puede ser útil para derivar la ecuación en condiciones no permanente (cuando las concentraciones cambian en el tiempo).

Considerando la ecuación de balance de masa que describe el cambio de concentración por unidad de volumen en el tiempo, se tiene:

Cambio de concentración  $c$  en el tiempo = Flujo que entra al elemento menos el flujo que sale del elemento (Figura 2.12).

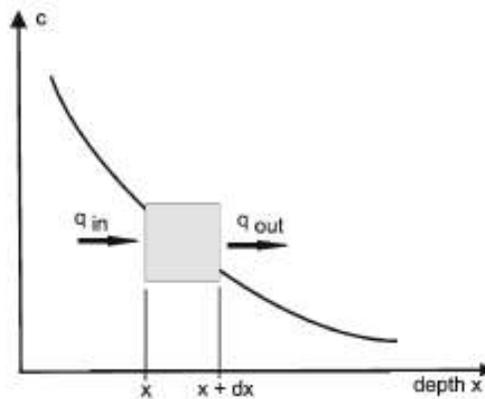


Figura 2.12: Balance de masa para un elemento de volumen en condiciones no estacionarias [27].

Flujo que entra: 
$$q_x = -D \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right]_x$$

Flujo que sale: 
$$q_{x+\Delta x} = -D \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x+\Delta x}$$

Cambio de Concentración: 
$$\frac{\partial c}{\partial t} \Delta x = -D \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x+\Delta x} + D \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right]_x$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{-D \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right]_{x+\Delta x} + D \left[ \frac{\partial c}{\partial x} \right]_x}{\Delta x}$$

Considerando  $\Delta x \rightarrow 0$ : 
$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} \tag{Ec.2.3}$$

De aquí se puede observar que la variación del flujo con la distancia es igual al opuesto aditivo del diferencial de concentraciones con respecto al tiempo. Entonces si  $D$  es constante e independiente de la concentración, la Ecuación 2.3 puede ser reescrita en su expresión comúnmente conocida y utilizada en condiciones tales que el flujo no ha alcanzado su régimen permanente:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Esta ecuación diferencial, conocida como la segunda ley de Fick, es de tipo parabólico, lineal de segundo orden y homogénea. Existen distintos métodos matemáticos para resolver esta ecuación según las condiciones iniciales y de borde que se consideren. De acuerdo a los datos experimentales y a las técnicas de ensayo que normalmente se utilizan, se imponen las siguientes condiciones:

- $C_{(x=0,t>0)} = C_0$  (Concentración en la superficie constante)
- $C_{(x>0,t=0)} = 0$  (Concentración inicial en el hormigón es 0)
- $C_{(x \gg 0,t=0)} = 0$  (Suficientemente lejos de la superficie la concentración será 0)

La solución es:

$$C(x,t) = C_0 \cdot \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde  $\operatorname{erf}(x)$  corresponde a la función error de Gauss definida como:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\eta^2} d\eta \quad (\text{Ec.2.6})$$

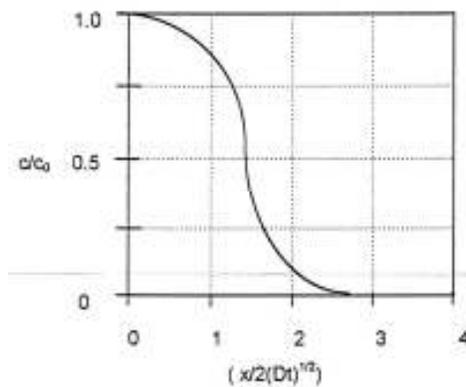


Figura 2.13. Perfil de concentraciones teórico

La distribución de concentraciones que se obtiene con la Ecuación 2.4 es de la forma que se muestra en la Figura 2.13

La difusión gaseosa se experimenta en el hormigón no saturado, mientras que la difusión iónica ocurre en condiciones saturada y parcialmente saturada. La difusión molecular sucede si los poros del medio son relativamente grandes [24]. Asimismo, la penetración de iones cloruro en el hormigón esta mejor representado por el proceso de difusión si el hormigón se asume que esta relativamente saturado [25].

El ingreso de iones en el hormigón se trata en general como un proceso de difusión. Sin embargo, es importante destacar que las leyes de Fick sólo son una buena aproximación para modelar el fenómeno de difusión en un sistema no-interactivo. En el caso de soluciones iónicas, incluso en concentraciones muy bajas, existe interacción entre los iones, lo cual reduce el potencial químico y por ende la fuerza que conduce a los iones de la especie que se propaga.

Nilsson [26] señala que en este proceso, no solo ocurre una transferencia de masa sino que también un transporte carga eléctrica. Para mantener la electro-neutralidad en el sistema, el flujos de aniones debe estar balanceado por un correspondiente flujo de cationes. Si la transferencia de cargas no puede ser balanceada, se acumula una diferencia de voltaje. En este campo eléctrico un tipo de ión puede ser acelerado mientras otros pueden reducir su velocidad. En esta condición la difusión de iones se traslapa con la migración que se describe a continuación.

### 2.2.3 Migración/Conducción

Migración (también referido a difusión acelerada, electro-difusión o conducción) es el movimiento de iones en una solución bajo un gradiente de concentración y un campo eléctrico. En la sección anterior se señaló que la difusión de iones en un líquido provoca un campo eléctrico si el transporte de cationes no es balanceado por un correspondiente flujo de aniones en la dirección opuesta. Considerando que tanto en condiciones naturales como experimentales no solo se está moviendo un tipo de ión, sino que diferentes iones con diferentes movimientos en que es posible que se acumule una diferencia de voltaje.

Se ha discutido que los ensayos de difusión simple que se basan en las leyes de Fick no reflejan el mecanismo de transporte predominante en el proceso de difusión y de esa manera, no reproducen una característica válida del material [27]. La ecuación de Nernst Planck describe mejor el flujo de masa debido a la acción simultánea de un gradiente de concentración, un campo eléctrico y un flujo del solvente (convección). De esta manera, un set de ecuaciones conocidas como las ecuaciones de Nernst-Planck resuelve para un ión individual  $i$  su participación en el proceso de transporte:

$$q_i = -D_i \left( \frac{\partial c_i}{\partial x} - \frac{z_i F E}{RT} c_i \right) + c_i \bar{v} \quad (\text{Ec.2.7})$$

Donde:  $q$ : Flujo de masa [ $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ]

$D_i$ : Coeficiente de difusión [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

$c$ : Concentración [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]

$x$ : distancia [m]

$z$ : Carga eléctrica

$F$ : Constante de Faraday [ $9.6548 \cdot 10^4 \text{ J}/\text{V mol}$ ]

$R$ : Constante universal de los gases [ $8.314 \text{ J}/\text{mol K}$ ]

$T$ : Temperatura absoluta [K]

$E$ : Potencial eléctrico [V]

$\bar{v}$ : Velocidad del flujo capilar [m/s]

De la ecuación anterior se desprende que si la densidad del campo eléctrico es igual a cero y las probetas utilizadas se encuentran saturadas en agua, los términos de migración y convección pueden ser omitidos, por lo que la Ec.2.6 se transforma en la convencional primera ley de difusión (conocida comúnmente como la primera ley modificada de Fick).

De esta manera, si se considera que generalmente la migración de iones es dependiente del tiempo, se puede obtener la segunda ley modificada de Fick:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial q}{\partial x} = D \left( \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \frac{z_i FE}{RT} \frac{\partial c_i}{\partial x} \right) - v \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec.2.8}$$

Las ecuaciones 2.5 y 2.7 corresponden al modelo matemático de difusión de un ión individual *i* bajo la acción de un campo eléctrico. Si se considera el caso de difusión en un espacio semi-infinito con probetas saturadas en agua y las siguientes condiciones:

- $C_{(x=0,t>0)} = C_0$  (Concentración en la superficie constante)
- $C_{(x>0,t=0)} = 0$  (Concentración inicial en el hormigón es 0)
- $C_{(x \gg 0,t=0)} = 0$  (Suficientemente lejos de la superficie la concentración será 0)

La solución analítica exacta del modelo de difusión en presencia de un campo eléctrico es

$$C(x,t) = C_0 \cdot \left( e^{ax} \operatorname{erfc} \left( \frac{x + aDt}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + \operatorname{erfc} \left( \frac{x - aDt}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (\text{Ec.2.9})$$

Donde  $a = zFE/RT$  y  $\operatorname{erfc}(x)$  corresponde a la función error complementaria de Gauss definida como:

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\eta^2} d\eta \quad (\text{Ec.2.10})$$

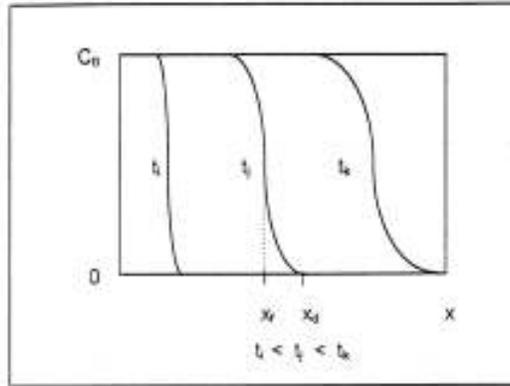


Figura 2.14. Perfil de concentraciones a distintos tiempos

La Figura 2.14 ilustra el perfil de concentraciones que se obtiene con esta solución para distintos tiempos, además muestra que existe un aparente frente de concentración en cada perfil. Esto implica la posibilidad de calcular el coeficiente de difusión para cada profundidad de penetración. Para el caso de la Ecuación 2.8 sin el término de convección, se encuentra que el perfil de concentraciones tiene un punto de inflexión en  $x_f$  definido por la siguiente relación:

$$x_f = \frac{zFE}{RT} Dt \quad (\text{Ec.2.11})$$

Esta relación permite obtener el valor del coeficiente de difusión, conociendo previamente la ubicación del punto de inflexión  $x_f$ .

Los ensayos de difusión natural que se realizan en celdas de difusión son de larga duración, especialmente cuando se quiere alcanzar condiciones de transporte estacionarias en probetas de hormigón con espesores relevantes. En cambio, los ensayos de difusión acelerada son muchos rápidos de realizar ya que imponen un campo eléctrico externo como una fuerza de conducción adicional para el transporte de iones y la evaluación de las propiedades de transporte de materiales se realiza en base a la ecuación de Nernst Planck.

#### 2.2.4 Convección

Convección (o advección) es el proceso que describe el transporte de una sustancia por un fluido como resultado del movimiento de un volumen de este en una dirección particular [30]. El proceso es descrito por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (\text{Ec.2.12})$$

Donde:

$c$ : Concentración de la sustancia a una profundidad  $x$  después de un tiempo  $t$ .

$\bar{v}$ : Vector de la velocidad promedio del flujo capilar.

La convección junto con la difusión son los mecanismos de transporte principal en el ingreso de cloruros cuando el hormigón se encuentra fisurado [31]. También, tiene un importante rol en el movimiento de iones cloruro cuando el hormigón está expuesto a condiciones secas y húmedas.

#### 2.2.5 Permeabilidad

La permeabilidad del hormigón se define como una medida de la capacidad del hormigón para transferir fluidos a través de su estructura de poros bajo una presión aplicada externamente mientras los poros están saturados con ese fluido. En este mecanismo de transporte, la fuerza de conducción para los líquidos y gases a través de la estructura de poros o redes fisuradas es un gradiente de presión [28]. La permeabilidad intrínseca de cualquier material poroso se determina mediante la Ley de Darcy, que considera el gasto del flujo de un fluido en  $m^3 / s$  :

$$\frac{dq}{dt} \frac{1}{A} = \frac{k}{n} \left( -\frac{dh}{dx} \right) \quad (\text{Ec.2.13})$$

Donde:

k: Coeficiente de permeabilidad [m/s]

n: Porosidad (espacios vacíos en el material) [0-100%]

h: Altura piezométrica (caída de la carga hidráulica a través de la muestra) [m]

A: Área de la sección transversal de la muestra [  $m^2$  ]

x: Distancia (espesor de la muestra) [m]

El prefijo negativo denota que el flujo ocurre de una región de alta presión a una de baja presión.

La permeabilidad juega un rol importante en estructuras que retienen agua donde el transporte de agua a través de la estructura es perjudicial.

#### 2.2.6 Succión/ Absorción Capilar

La absorción se refiere a la captación de líquidos en un sólido no saturado o parcialmente saturado por fuerzas capilares. La capacidad de absorción es esencialmente el movimiento de un frente húmedo en un medio poroso seco o parcialmente saturado [29].

$$S = \frac{\Delta M_t}{\sqrt{t}} \left[ \frac{d}{M_{sat} - M_0} \right] \quad (\text{Ec.2.14})$$

Donde:

S: Capacidad de Absorción.

$\frac{\Delta M_t}{\sqrt{t}}$ : Pendiente de la línea recta producida cuando la masa de agua absorbida

esta graficada en función de la raíz cuadrada del tiempo.

d: Espesor de la muestra

$M_{sat}, M_0$ : Masa saturada y masa seca de la muestra de hormigón respectivamente.

La capacidad de absorción esta influenciada por los largos capilares y su grado de continuidad. Es muy sensible a la hidratación de la superficie externa del hormigón y por consiguiente del curado. Esta influenciada además por la compactación, orientación y distribución del agregado y por la composición de la mezcla.

#### 2.2.7 Procesos de transporte combinados

La elección de un solo mecanismo de transporte para el ingreso de una substancia en particular, puede representar un sobre simplificación del proceso de transporte y revelar una característica no real de un material [30].

A partir del estudio bibliográfico realizado se han detectado diversas lagunas en la cuantificación de un proceso de transporte combinado (referido también a modos combinados de transporte). Algunos autores sostienen que los procesos de transporte debieran aspirar a obtener modelos para predecir el movimiento simultaneo de las especies (cloruros, sulfatos, oxígeno, dióxido de carbono, etc.) incluyendo la deposición y disolución de iones [32].

## 2.3 Corrosión del acero en el hormigón

### 2.3.1 Introducción

La corrosión del acero es uno de los principales mecanismos que amenazan la durabilidad del hormigón armado. La mayor parte de las investigaciones se han centrado en aumentar el conocimiento básico de los mecanismos de transporte de iones agresivos (iones cloruro) a través del hormigón y la subsecuente corrosión de su armadura de refuerzo.

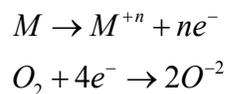
### 2.3.2 Definición de corrosión

La corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente.

El proceso de corrosión puede desarrollarse según dos mecanismos diferentes:

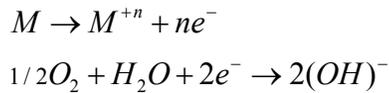
- Oxidación directa (o corrosión seca), que ocurre cuando el metal sufre una temperatura elevada, en ausencia de agua.
- Corrosión con intervención de una solución acuosa (corrosión húmeda), que es la más habitual.

En el primer caso, el metal  $M$  sometido a alta temperatura sufre una oxidación directa con pérdida de electrones. Cuando el oxígeno  $O_2$  oxida el metal, recibe los electrones que el metal cede y se reduce mediante las siguientes reacciones de reducción-oxidación:

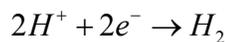


En el caso de la intervención de una solución acuosa, el mecanismo que se produce incluye reacciones químicas diferentes, con unas zonas de disolución del metal (zonas anódicas) y otras en que permanece inalterado (zonas catódicas), originándose así una

pila cuyo funcionamiento continuado requiere que exista un circuito eléctrico cerrado que incluye el ánodo, el cátodo, la conexión metálica entre ambos y el propio electrolito. Por ello, a este mecanismo se le denomina corrosión electroquímica. Las reacciones redox son:



En un medio ácido, en vez del oxígeno disuelto son los cationes  $H^{+}$  los que reaccionan con los electrones liberados:



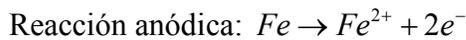
### 2.3.3 Corrosión del acero

La corrosión del acero de refuerzo en el hormigón cuando tiene lugar en un medio acuoso es un fenómeno de carácter electroquímico, es decir, supone la existencia de una reacción de reducción-oxidación, donde se produce la circulación de electrones a través del electrolito (solución que permite el flujo de iones que en el caso del hormigón es la solución de poros, la cual es muy alcalina). Los potenciales electroquímicos que forman las pilas se pueden generar de dos formas [5]:

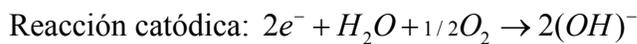
- Las pilas de composición se pueden formar cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón, como las armaduras de acero y los conductos de aluminio, o cuando existen variaciones significativas en las características superficiales del acero.
- Las pilas de concentración se pueden formar debido a diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero como los álcalis, cloruros o el oxígeno.

Como consecuencia, uno de los metales (o algunas partes del metal si sólo hay uno) se convierte en anódico y el otro en catódico.

En la corrosión del acero dentro del hormigón, el proceso anódico no puede producirse hasta que la capa pasiva protectora de  $Fe_2O_3$  del acero (película densa e impenetrable que se forma gracias al ambiente alcalino del hormigón) se elimina en un ambiente ácido por carbonatación del hormigón o se hace permeable por la acción de iones  $Cl^-$ . El proceso catódico no se produce hasta que la superficie del acero se dispone de una cantidad suficiente de oxígeno y agua. Cuando el acero se corroe en el hormigón, se disuelve en el agua de poros cediendo electrones, y por lo tanto aumentando su estado de oxidación.



Los dos electrones ( $2e^-$ ) creados en la reacción anódica se deben consumir de alguna manera en la superficie del acero para mantener la neutralidad eléctrica. Dicho de otra manera, no es posible desarrollarse la corrosión en un solo lugar del acero por más grande que sea la cantidad de carga eléctrica; debe existir otra reacción química que consuma los electrones. Esta es una reacción que consume agua y oxígeno [41]:



En la Figura 2.15 se muestra que el flujo de iones hidroxilos  $2(OH)^-$  son generados en la reacción catódica. Estos iones aumentan la alcalinidad local y fortalecen la capa pasiva, alejándola de los efectos de los iones cloruro y la carbonatación en el cátodo. De esta manera, se necesita agua y oxígeno para que ocurra la reacción catódica.

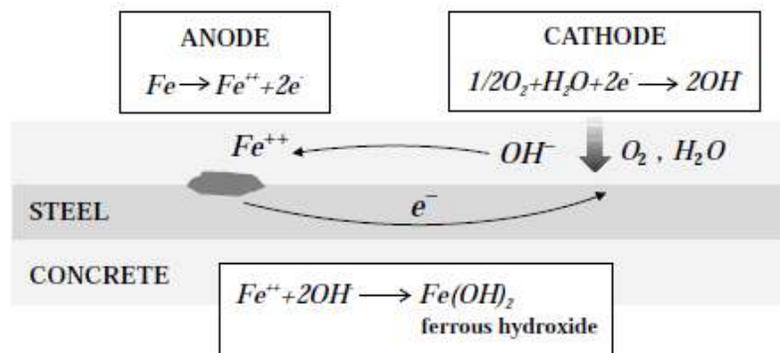
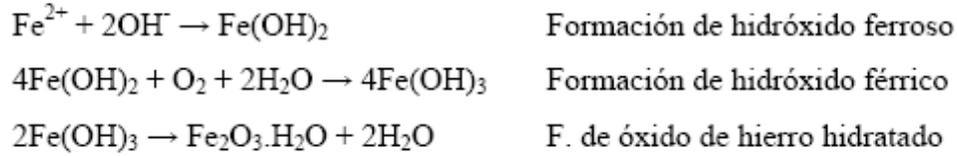


Figura 2.15. Reacciones anódicas y catódicas [41]

Inicialmente se produce hidróxido ferroso de color verdoso y con mayor grado oxidación, hidróxido férrico de color negro y óxido de hierro hidratado que es de color rojizo. Las reacciones son:



El proceso completo de corrosión se muestra en la Figura 2.16.

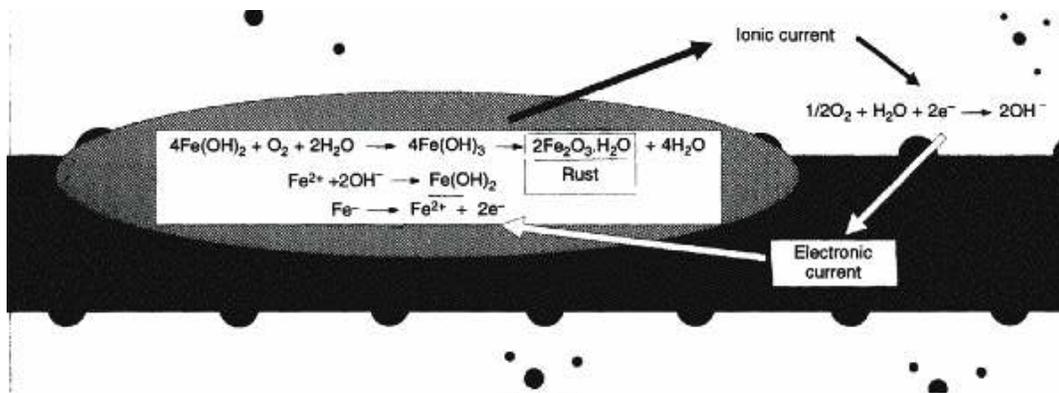


Figura 2.16. Reacciones de corrosión en el acero [41]

La conexión entre los nodos se produce en la barra que es el ánodo y el cátodo, por lo que la conexión entre los electrodos queda realizada por la misma barra de acero. La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo se debe a diferencias en la composición del acero, en las tensiones internas de éste, variaciones en las concentraciones de humedades al interior del hormigón, etc.

En el caso de la corrosión de las armaduras al interior del hormigón, va a influir el hecho de que el hormigón, si bien es un material permeable, dificulta el ingreso del oxígeno necesario para la corrosión, disminuyendo la velocidad de ésta, pero en ningún caso deteniéndola. Otro aspecto relevante es el hecho de que el hormigón es un material con un coeficiente de difusión bajo. Esto se traduce en un incremento en la dificultad para que los iones se muevan libremente dentro del hormigón, o mejor dicho, en la solución acuosa que se encuentra al interior de los microporos del hormigón.

En resumen, para que exista corrosión de las armaduras al interior del hormigón es necesario haber cumplido los siguientes requisitos:

- Pérdida de la pasividad de las armaduras.
- Diferencia de potencial.
- Conexión eléctrica entre los electrodos (en la mayoría de los casos es la misma barra que sufre de corrosión).
- Acceso de oxígeno al cátodo para poder producir la reacción.
- Humedad al interior del hormigón, la cual va a proporcionar el electrolito por el cual se van a desplazar los iones y el agua necesaria para producir la reacción catódica.

Como se puede apreciar, en una estructura de hormigón armado se dan claramente la mayoría de estas situaciones y por ello es importante resguardar la pasividad de las barras de acero para prevenir la corrosión de sus armaduras.

#### *2.3.3.1 Diagrama de Pourbaix*

Al tener lugar la corrosión en un medio acuoso, se pueden originar iones en disolución, los cuales pueden participar en reacciones de equilibrio de otros en el medio, incluidos los del agua. De este modo, la reacción de corrosión depende de una serie de interacciones en las que intervienen directa o indirectamente los iones del agua, por lo que depende del pH del medio. Como el potencial del proceso de corrosión depende de estos equilibrios, se puede establecer una relación en términos del pH, los cuales se presentan gráficamente en diagramas E-pH llamados diagrama de Pourbaix, como se muestra en la Figura 2.17:

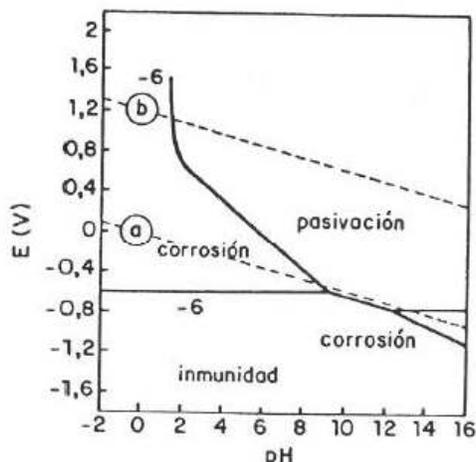


Figura 2.17: Diagrama de Pourbaix para el hierro a 25°C

El diagrama de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune. El estado definido como “pasivamiento”, supone que el metal se recubre de una capa de óxidos transparentes, imperceptibles y que actúan de barrera impidiendo la posterior oxidación. El metal posee la apariencia de mantenerse inalterado. Sin embargo, La protección de que éste goza puede ser eliminada por la existencia de cloruros que al destruir la capa de pasivación, originan la corrosión localizada por picaduras. En cambio, el estado de “inmunidad” supone que el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.

En condiciones normales, el acero embebido en el hormigón se encuentra amparado por una doble protección: física (el espesor de recubrimiento) y química (el pH alcalino del hormigón con valores habituales de 12-13, que sitúa al acero en la zona de pasividad del diagrama de Pourbaix, en la que se forma en la superficie del acero una capa protectora de óxido  $Fe_2O_3$  de espesor muy pequeño, del orden de 100.000 Å, que impide toda corrosión ulterior).

A pesar de la valiosa información que proporciona el diagrama de Pourbaix, no considera la cinética de las posibles reacciones, por lo que no es posible predecir si una reacción concreta se producirá en una cuantía suficiente en la práctica. Además, se supone que se

conoce la composición de la solución acuosa alrededor de la superficie de corrosión, lo que es complicado en los casos reales de corrosión donde se pueden desarrollar gradientes de concentración.

### 2.3.3.2 Tipo de corrosión en las armaduras y causas de desprotección

La corrosión puede adoptar formas diversas según la localización de las zonas anódicas y catódicas, y la posible existencia de tensiones mecánicas importantes. En la Figura 2.18 se muestran los tipos de corrosión en las armaduras del hormigón.

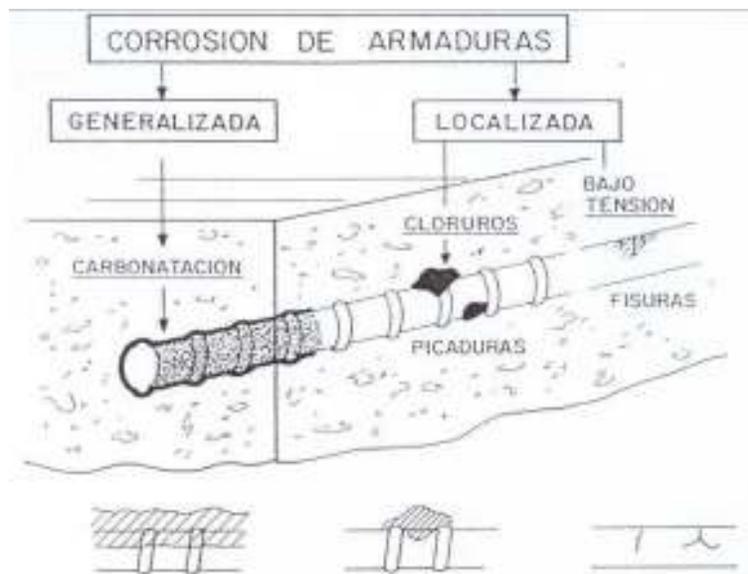


Figura 2.18. Tipos de corrosión de armaduras en el hormigón

La corrosión tiene un periodo de iniciación, en el que se produce la desprotección del acero y un período de propagación en el que se produce la corrosión del acero (Figura 2.19). El concepto de durabilidad del hormigón armado se fundamenta en evitar que se alcance el período de propagación durante la vida de servicio de la estructura, poniendo los medios necesarios para dilatar lo máximo posible el periodo de iniciación.

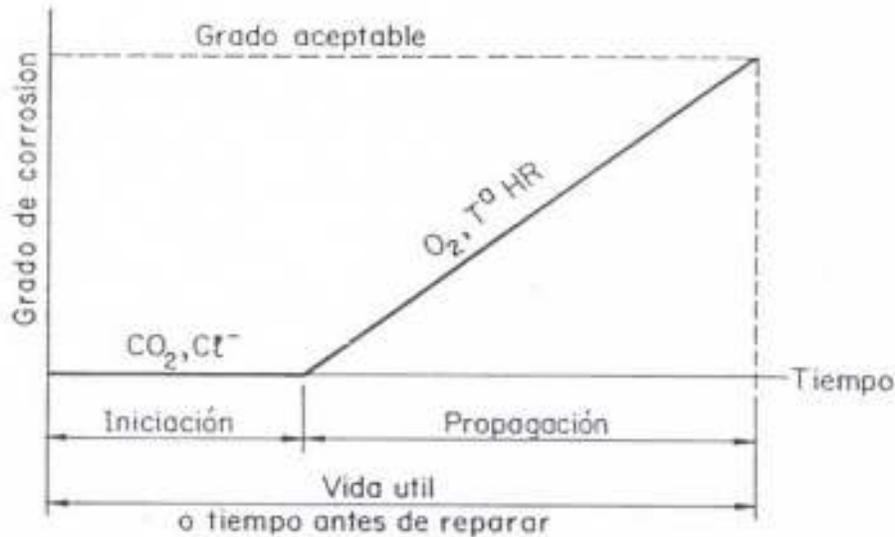


Figura 2.19. Modelo simplificado del proceso de deterioro por corrosión de las armaduras.

#### 2.3.4 Mecanismos de corrosión

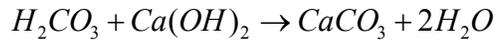
Las causas principales de corrosión del acero en el hormigón son la carbonatación y el ataque de cloruros. Estos dos mecanismos no atacan la integridad del hormigón, más bien pasan las especies químicas agresivas a través de su estructura de poros y atacan el acero. Estos procesos normales de deterioración son distintos dado al ataque químico sobre el hormigón. Otros ácidos y iones agresivos como los sulfatos destruyen la integridad del hormigón antes que el acero se vea afectado [41].

De esta manera, la protección del acero se puede perder:

- 1) Por pérdida de la alcalinidad del hormigón. Esto ocurre cuando los hidróxidos alcalinos en el hormigón (hidróxido de calcio de la pasta de cemento) interactúa con el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera. Como muchos otros gases el dióxido de carbono se disuelve en el agua para formar un ácido. A diferencia de la mayor parte de los otros gases, el dióxido de carbono no ataca la pasta de cemento, sino que neutraliza el álcalis en el agua de poros para formar principalmente carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  que recubre los poros:



gas + agua → ácido carbónico



ácido carbónico+hidróxido de calcio → carbonato de calcio+Agua

El consumo de hidróxido cálcico provoca una reducción del pH hasta valores no superiores a 9, lo que sitúa al acero fuera de la zona de pasividad y dentro de la zona de corrosión del diagrama de Pourbaix.

En este proceso, el cemento hidratado reacciona con las soluciones acuosas formadas por los gases atmosféricos ácidos (el dióxido de azufre y el dióxido de carbono) en condiciones de humedad. Las soluciones acuosas del dióxido de azufre tenderán a disolver la superficie de hormigón, pero suelen representar sólo un problema superficial. Sin embargo, el dióxido de carbono penetra en el hormigón por difusión y, en presencia de humedad, reacciona con el cemento para formar carbonato cálcico, lo que elimina los iones hidroxilo de la solución de poros, reduciendo así el pH del hormigón.

La carbonatación penetra en el hormigón como un frente procedente de las superficies expuestas a la atmósfera, pero no es perjudicial para la integridad del hormigón hasta que llega a la armadura. En ese momento, el pH cae por debajo de 9 ó 10, con lo que se pierde la pasivación de la armadura y el acero puede corroerse si hay suficiente cantidad de agua y oxígeno.

La velocidad de carbonatación depende de la permeabilidad del hormigón a la penetración del dióxido de carbono (que esta muy influenciada por la relación agua/cemento), la humedad del hormigón y el contenido total de álcalis de los productos de la hidratación. Un hormigón denso, bien compactado y con un buen recubrimiento será muy resistente a la carbonatación.

A partir de los resultados experimentales obtenidos y de las predicciones de penetración de cloruros y de carbonatación a largo plazo, algunos autores indican que en hormigones de calidad media o alta, la velocidad de carbonatación es mucho menor que la de penetración de cloruros en cualquier zona de exposición de un ambiente marino. Dado que para proteger a las estructuras del efecto de los cloruros es necesario emplear hormigones de alta calidad y un adecuado recubrimiento de las armaduras, el mecanismo de la carbonatación apenas tendrá importancia en un ambiente marino.

2) Por destrucción de la capa de pasivación. Efecto que causan los halogenuros (entre ellos los iones cloruro). Para que se produzca el proceso anódico es necesario que se destruya la capa pasiva, sin embargo, el proceso catódico puede ocurrir incluso si la capa pasiva está intacta. En el caso de la corrosión por cloruros, se da la llamada corrosión por picaduras, en que la pasivación se pierde solamente en pequeñas áreas de la superficie, produciéndose una reducción local importante de la sección de la armadura. En este caso los iones cloruro atacan la capa pasiva en la superficie del acero que detiene la corrosión sin producirse una caída global en el pH. Además, los iones cloruro actúan como un catalizador dentro de la picadura, acelerando las reacciones en la picadura anódicamente activa sin verse afectados.

En la Figura 2.20 se muestra que en el proceso no hay un consumo pero ayuda a destruir la capa pasiva de óxidos en el acero y permite que el proceso de corrosión ocurra rápidamente

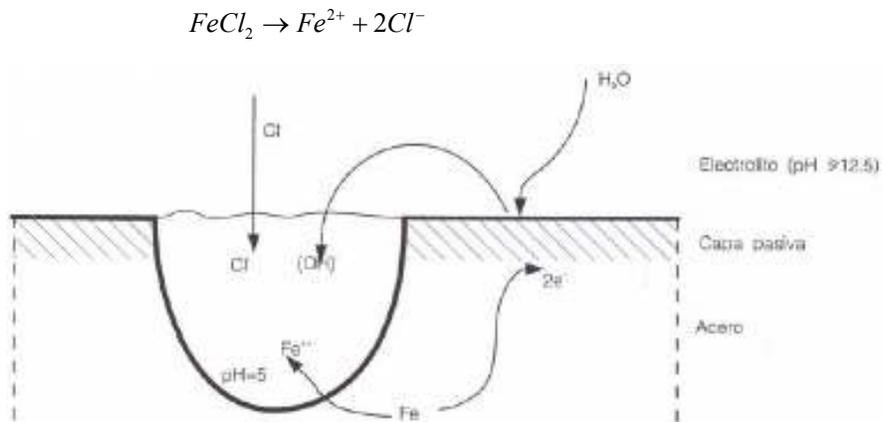


Figura 2.20. Destrucción de la capa pasiva a causa de los iones cloruro

Obviamente una pequeña cantidad de iones cloruro en el agua de poros no destruye la capa pasiva ya que los iones hidroxilos actúan en contra de este proceso reparando la capa dañada, pero la rotura de la capa es irreversible para una determinada relación cloruro/hidroxilo crítica, y entonces se produce la corrosión por picadura. La corrosión en las picaduras (ánodos) se produce electrolíticamente por reacciones catódicas en el área adyacente de acero sin corroer (cátodo). Como normalmente el área catódica es mayor que la anódica, la corrosión en las picaduras es intensa.

### 2.3.5 Procedencia y tipos de cloruros

Los cloruros pueden estar en el hormigón [13]:

- Combinados: unidos química o físicamente a los minerales del cemento o a los productos de hidratación (por ejemplo, sal de Friedel  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ )  
Se considera que los cementos con un bajo contenido en aluminato tricálcico tienen menor capacidad para fijar cloruros.
- Libres: en la solución de poros del hormigón.

Sólo resultan peligrosos los cloruros que quedan disueltos en la fase acuosa de los poros. De todas formas, las normativas se refieren al límite de cloruros totales porque los cloruros combinados pueden volver a la disolución por efecto de procesos como la carbonatación, ya que si se eliminan algunos cloruros libres, la solución de poros del hormigón tenderá a reponerlos a partir de los cloruros combinados para mantener el equilibrio. De esta manera, en el hormigón armado se limita el contenido de cloruros, de modo que sea mínimo el contenido de cloruros libres. Entre las fuentes de cloruros en el hormigón fresco se encuentran los aditivos, algunos áridos y el cemento.

También los cloruros del ambiente pueden penetrar en el hormigón endurecido. Una gran parte de ellos permanecerán como cloruros libres en el agua de poros, siendo por lo tanto muy agresivos. Las principales fuentes son las sales fundentes, el agua de mar y el

ambiente marino en general. En algunos lugares puede ser un problema el agua subterránea salina y las sales llevadas por el aire.

Cuando los cloruros están presentes en la fabricación del hormigón, algunos se combinarán químicamente con la pasta de cemento, sobre todo con los aluminatos. Estos cloruros presentes en la mezcla inicial tienden a distribuirse uniformemente, por lo que no se crean pilas de concentración. Por el contrario, cuando los cloruros penetran desde el exterior, no se presentan contenidos uniformes de cloruros alrededor de las armaduras, debido a diferencias en la concentración de cloruros en la superficie del hormigón, diferencias locales de permeabilidad y variaciones en el espesor de recubrimiento. Todos estos factores promueven diferencias en los contenidos de oxígeno, humedad y cloruros en el entorno de las barras de la armadura. Por lo tanto, cuando los cloruros penetran desde el exterior, parte de la armadura está en contacto con un hormigón contaminado por cloruros y otra parte lo está con un hormigón sin cloruros. Esta diferencia en la concentración de cloruros dentro del hormigón crea pilas macroscópicas de corrosión. Incluso cuando se impide la penetración de más cloruros desde el exterior, puede continuar durante años el proceso de transporte de iones cloruro desde zonas de alta concentración a las de baja.

### 2.3.6 Penetración de iones cloruro en el hormigón

Los cloruros pueden penetrar en el hormigón según los siguientes mecanismos: permeabilidad, capilaridad, absorción y difusión. La permeabilidad y la absorción son mecanismos de transporte muy rápidos, mientras que la difusión es mucho más lento. La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos de penetración vendrá dada por las condiciones de exposición, el contenido de humedad del hormigón y la estructura de poros. La penetración de cloruros en los primeros centímetros del recubrimiento de hormigón depende de la succión capilar, pero la penetración a profundidades mayores está gobernada por la difusión a largo plazo. En una superficie seca, la toma de iones cloruro se produce por absorción; la solución con cloruros se absorbe por las microfisuras

y poros vacíos, y entonces penetran por succión capilar. Si la superficie está húmeda, la entrada inicial es por permeabilidad o difusión.

En un hormigón situado en aire húmedo, los procesos de transporte de gases, agua o sustancias disueltas en agua son procesos de difusión, en función de la humedad del aire. Los procesos de difusión son inducidos por una tendencia al equilibrio cuando hay gradiente de concentraciones. Así, el dióxido de carbono se difunde por el hormigón debido a una reacción química del CO<sub>2</sub> en las paredes de los poros que, a su vez, reduce la concentración de CO<sub>2</sub>; la difusión del vapor de agua se produce por gradientes hídricos al cambiar la humedad del ambiente o al secarse el hormigón; la difusión de las sustancias disueltas en agua (cloruros) se realiza a través de la capa de agua que recubre las paredes de los poros, o a través de los poros llenos de agua; hace falta una humedad mínima, ya que cuanto menor es la capa de agua o la cantidad de agua que llena los poros, menor es la velocidad de difusión.

En un hormigón con la superficie mojada por el agua de lluvia o por salpicaduras de agua, por la succión capilar se consigue muy rápidamente la saturación de agua. Las sustancias disueltas en agua son transportadas por el agua y la difusión de gases está prácticamente impedida, hasta que desaparecen los mecanismos de transporte del agua.

En un hormigón sumergido, la penetración de agua tiene lugar primero por succión capilar, posiblemente acelerada por un aumento de la presión hidráulica. Un transporte continuo de agua sólo se efectúa cuando el agua se puede evaporar de las superficies del hormigón expuestas al aire, donde entonces se depositan los agentes disueltos en el agua. La intensidad de este transporte depende de la relación entre evaporación, succión capilar y presión hidráulica. En cualquier caso, las estructuras de hormigón completamente sumergidas tienden a estar protegidas de la corrosión por la falta de oxígeno. Por lo tanto, a pesar de estar contaminadas por elevadas concentraciones de cloruros, las estructuras sumergidas continuamente bajo el mar no estarían sometidas a una corrosión significativa.

### 2.3.7 Velocidad de penetración de iones cloruro

En una estimación aproximada, puede suponerse que la profundidad de penetración sigue una ley proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Sin embargo, cálculos más precisos y observaciones basadas en la experiencia práctica muestran que la velocidad de penetración es menor. La razón principal para este hecho es el cambio en la distribución del tamaño de poros en el tiempo, lo cual responde a la continua evolución del proceso de hidratación.

El método más usual para determinar la penetración de iones  $Cl^-$  en el hormigón es mediante el fenómeno de difusión, que corresponde al movimiento de iones cloruro a través del agua presente en los poros. La tasa en que ellos viajan esta determinada, entre otros factores, por su gradiente de concentración, la química del cemento (contenido de C3A que tiene la capacidad de fijar cloruros), el tamaño y orientación de los poros capilares que están determinados por los materiales constituyentes del hormigón y sus proporciones, y de los procedimientos de curado.

Es importante destacar que las leyes de Ficks sólo son una buena aproximación para modelar el fenómeno de difusión en un sistema no-interactivo. En el caso de soluciones iónicas, incluso en concentraciones muy bajas, existe interacción entre los iones, lo cual reduce el potencial químico y por ende, la fuerza que conduce a los iones de la especie que se propaga.

### 2.3.8 Contenido crítico de cloruros

El contenido crítico de cloruros es la cantidad de cloruros que provoca la corrosión activa del acero. Hasta ahora no se ha encontrado un valor único de este contenido crítico, debido a que varía en función de las características del hormigón (pH de la solución de poros, contenido de humedad, temperatura, tipo de catión que acompaña al cloruro, contenido de C3A y finura del cemento, adiciones, etc.) y del acero (composición, impurezas, desigualdades de la superficie, envejecimiento, etc.). Todos estos parámetros

influyen en la naturaleza de la capa pasiva, lo que determina el potencial eléctrico que presenta la armadura. Además, la naturaleza de la capa pasiva evoluciona con el tiempo, y por lo tanto también lo hace el potencial. Pourbaix confirmó que el acero situado en soluciones alcalinas que contengan iones cloruros puede sufrir corrosión localizada, por lo que para un pH y una concentración de cloruros determinada, se puede detectar un potencial (llamado potencial de picadura), por encima del cual el acero se corroe [33].

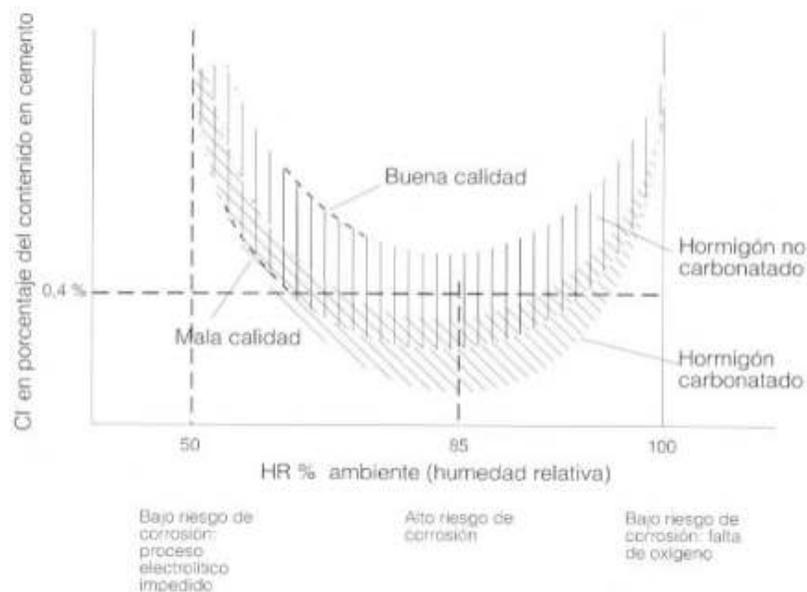


Figura 2.21. Variación del contenido crítico en cloruros según la humedad ambiente

### 2.3.9 Resistividad eléctrica

Una vez que se destruye la pasividad del acero, el ritmo de corrosión viene controlado por la resistividad eléctrica (que a su vez es función directa del contenido de humedad) y la disponibilidad de oxígeno.

La resistividad es una medida de la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y conducir las corrientes de corrosión. Se basa en la suposición de que la resistividad es proporcional a la velocidad de corrosión cuando los ensayos de potencial de corrosión indican que es probable que haya corrosión [34].

La Ley de Ohm establece que la intensidad  $I$  de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial  $V$  aplicada e inversamente proporcional a la resistencia  $R$  del mismo, por lo que se puede expresar matemáticamente según la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

$I$ : Intensidad de corriente [A]

$V$ : Diferencia de potencial [V]

$R$ : Resistencia [ $\Omega$ ].

Se le llama resistividad al grado de dificultad que encuentran los electrones en sus desplazamientos. Su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que es. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor. La resistividad eléctrica, como propiedad de un material, se define como:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]

$R$  = Resistencia [ $\Omega$ ]

$L$  = Longitud del material [m]

$A$  = Área de la sección transversal del material ( $\text{m}^2$ )

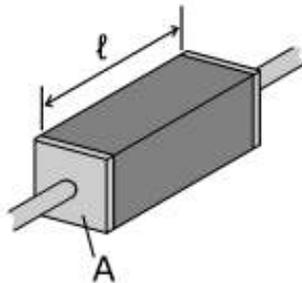


Figura 2.22. Resistividad eléctrica de un material con contacto en ambos extremos.

Al aplicar una fuente de corriente “S” en la superficie de un material y se mide los cambios de potencial en un punto específico “P”, se generan flujos radiales de corriente con superficies hemisféricas equipotenciales [5].

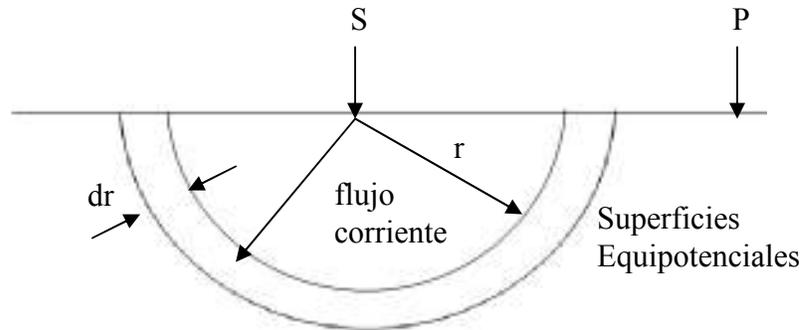


Figura 2.23: Fuente de corriente S y potencial en un punto “P”.

La diferencia de potencial “dv” entre las superficies equipotenciales separadas por “dr” es:

$$dV = idR = i\rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Para obtener el potencial en el punto “P”, se integra la expresión anterior desde la distancia “a” hasta el infinito, y se considera la convención habitual que el potencial en el infinito es cero. De esta manera se obtiene la siguiente expresión:

$$V = \frac{i\rho}{2\pi} \int_{r=a}^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{i\rho}{2\pi a} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

En principio, con esta ecuación se puede obtener el potencial en cualquier punto del material. Sin embargo, si el material es hormigón armado, no es práctico extenderlo a barras largas para establecer la condición de potencial cero en el infinito.

El método más sencillo de medir la resistividad eléctrica en el hormigón, supone la aplicación de una corriente alterna “I” a través de dos electrodos paralelos, separados una distancia “L” y de sección “A”. De esta manera, se puede medir el potencial resultante

“V” y la resistividad del material. Este método supone que los electrodos estén dentro del hormigón, por lo que sólo se puede aplicar a estructuras nuevas.

Para medir la resistividad de estructuras existentes es común emplear la sonda de cuatro puntas de Wenner [13]. Se colocan los electrodos en línea separados una distancia “a” (inferior al espesor de recubrimiento) entre sí, se aplica una corriente alterna a través de los electrodos de los extremos (corriente alterna con una frecuencia entre 50 y 1000 Hz, normalmente sinusoidal) y la caída de potencial resultante se mide con los electrodos intermedios. La resistividad es:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Durante el periodo de iniciación de la corrosión, la resistividad del hormigón se relaciona con la penetración de iones cloruro y del CO<sub>2</sub> del ambiente; en el periodo de propagación, se correlaciona con la velocidad de corrosión [11].

Dentro de una estructura, los puntos de baja resistividad indican dónde será más rápida la penetración de cloruros. Los mapas de resistividad no muestran si el acero del hormigón se está corroyendo; esta información se obtendrá con otros métodos: análisis de cloruros, profundidad de carbonatación, mapas de potencial, resistencia de polarización e inspección visual del acero. Si el acero se está corroyendo, los mapas de resistividad indicarán en qué zonas la corrosión será mayor [13].

Por lo tanto, las medidas de resistividad pueden ser útiles para los siguientes objetivos:

- Evaluar el valor (o rango de valores) de la resistividad del hormigón de una estructura, para estimar el riesgo de corrosión en caso de que se despasive.
- Localizar las zonas más permeables de la estructura para definir otras investigaciones o medidas de protección.
- Localizar puntos con mayor exposición al agua y a agentes agresivos disueltos.
- Ayudar a diseñar sistemas de protección catódica y otros tratamientos electroquímicos.
- Control de calidad del hormigón en la fase de producción.

Los criterios de interpretación de las medidas de la resistividad varían, debido probablemente a diferencias en la técnica de medida, en los tipos de estructura en los que se han obtenidos los datos y en las causas de la corrosión:

En la Tabla 2.3 se muestran los criterios para interpretar las medidas de resistividad según los distintos autores encontrados en la literatura:

Tabla 2.3: Criterios para interpretar las medidas de resistividad

<b>Fuente</b>	<b>Resistividad</b>	<b>Clasificación de la corrosión</b>
Vassie	> 12 kΩcm 5 a 12 kΩcm < 5 kΩcm	Corrosión poco probable Corrosión probable Corrosión casi segura
Polder	> 100 kΩcm 50 a 100 kΩcm 10 a 50 kΩcm < 10 kΩcm	Riesgo de corrosión despreciable Riesgo de corrosión bajo Riesgo de corrosión moderado Riesgo de corrosión alto
Rodriguez et al	> 100 kΩcm 50 a 100 kΩcm 10 a 50 kΩcm < 10 kΩcm	Velocidad de corrosión muy lenta incluso con hormigón carbonatado o contaminado por cloruros Velocidad de corrosión lenta Corrosión de moderada a alta cuando el acero este activo La resistividad no controla la velocidad de corrosión
Schiessel and Raupach	> 20 kΩcm 10 a 20 kΩcm 5 a 10 kΩcm < 5 kΩcm	Velocidad de corrosión lenta Velocidad de corrosión moderada/lenta Velocidad de corrosión alta Velocidad de corrosión muy alta
CEB-192	> 20 kΩcm 10 a 20 kΩcm 5 a 10 kΩcm < 5 kΩcm	Velocidad de corrosión despreciable Velocidad de corrosión bajo Velocidad de corrosión alto Velocidad de corrosión muy alto

Otras fuentes indican que la resistividad eléctrica del hormigón ha demostrado ser un parámetro efectivo para evaluar el riesgo de corrosión de la armadura, independientemente del tipo de mezcla y de las condiciones de exposición. Las barras parecen alcanzar un estado activo de corrosión cuando la resistividad es menor que 10 [kΩcm], y un comportamiento pasivo cuando la resistividad es mayor que 30 [kΩcm] [35].

## 2.4 Antecedentes de evaluación

Existen diversos métodos para investigar el comportamiento del hormigón ante los fenómenos de difusión de iones cloruro. Estas técnicas se clasifican de acuerdo tipo de información que entregan y a la metodología empleada:

- Ensayos que entregan un perfil de concentración de iones  $Cl^-$ .
- Ensayos que entregan el coeficiente de difusión.
- Ensayos que miden la conductividad eléctrica del hormigón

Como se ha visto en el capítulo 2.2, la conducción electrolítica es un caso especial de difusión de iones, en la cual éstos son conducidos hacia el electrodo de carga opuesta por un potencial eléctrico, más rápidamente que por la acción de un gradiente de concentración. En consecuencia, es posible investigar el fenómeno de difusión monitoreando la resistencia eléctrica de una muestra, aunque se debe notar que la conductividad dependerá de todos los iones presentes en la solución de poros ( $OH^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{+2}$ ).

El coeficiente de difusión de un ión particular es principalmente dependiente de la microestructura del hormigón. En cambio, la conductividad del hormigón es dependiente tanto de la microestructura como de la conductividad de la solución de sus poros.

A continuación, se describen los dos métodos más comunes que se utilizan para medir la conductividad eléctrica del hormigón. En ambos casos, la corriente eléctrica se conduce a través del hormigón por el movimiento de iones en la solución de poros, despreciándose la conducción eléctrica a través de la matriz sólida del cemento y los agregados.

### 2.4.1 Método de resistividad eléctrica

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, pudiéndose asumir a los áridos como eléctricamente inertes, ya que su resistividad resulta varios órdenes de magnitud superior a la de la solución de poros. En la Figura 2.24 se presenta el efecto de un campo eléctrico sobre las cargas eléctricas de los iones disueltos en la fase acuosa de los poros de un elemento [36] La corriente eléctrica generada, es conducida a través de la red de poros interconectada por el movimiento de los iones presentes en la solución de poros. De esta manera, es posible estudiar la difusión acelerada monitoreando la resistividad eléctrica de la probeta. En este caso, la conductividad depende de todos los iones disueltos naturalmente en la solución de poros del hormigón.

En la Figura 2.24 se muestra que cuando se aplica un campo eléctrico al sistema, todos los iones disueltos en la solución de poros se mueven en dirección al electrodo de signo opuesto, hasta que se alcance el equilibrio del sistema.

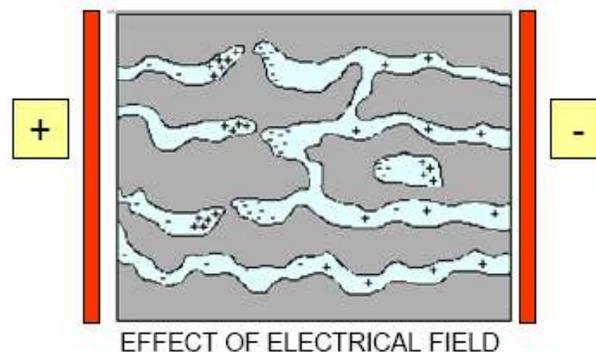


Figura 2.24. Efecto del campo eléctrico sobre los iones disueltos en el hormigón [36].

En cuanto a las técnicas de medida, se debe resaltar la gran ventaja de los métodos no-destructivos de medida in situ, como el método de las cuatro puntas o de Wenner [1]. Se tratan de medidas rápidas, fáciles y económicas, que posibilitan la monitorización continuada de las estructuras de hormigón armado una vez puesta en obra, con un costo mínimo de intervención.

#### 2.4.2 Método de migración de iones introducidos externamente

En estos métodos de migración, se introducen artificialmente iones adicionales en la solución de poros, por la aplicación de un potencial eléctrico adecuado entre la fuente de iones y el hormigón. Los iones preferidos son los iones cloruro.

Como se ha visto anteriormente, un campo eléctrico puede en gran medida acelerar el movimiento de iones a través del hormigón sin cambiar en lo fundamental el proceso de difusión. Esta aceleración es llamada migración y esta gobernada por los mismos parámetros básicos de difusión: la movilidad iónica o difusividad. Whiting fue el primer investigador en aplicar un campo eléctrico para acelerar el ensayo de penetración de cloruros en el hormigón [37] y propuso el ensayo de permeabilidad rápida a los cloruro, que ha sido estandarizado por la norma ASTM C1202 y por el organismo regulador de las obras viales en los Estados Unidos (Federal Highway Administration) [4].

Cuando un campo eléctrico es aplicado en el hormigón por medio de dos electrodos, como se muestra en la figura 2.25, se desarrollan los siguientes procesos [38]:

1. En los electrodos:

- En el ánodo la corriente aplicada es consumida en la oxidación del ánodo o del electrolito (solución con iones libres que conducen electricidad).
- En el cátodo se produce la reducción del electrolito. En ambos electrodos se pueden generar gases.

2. En el electrolito los iones se mueven a través de la solución de poros en la dirección del electrodo con carga opuesta.

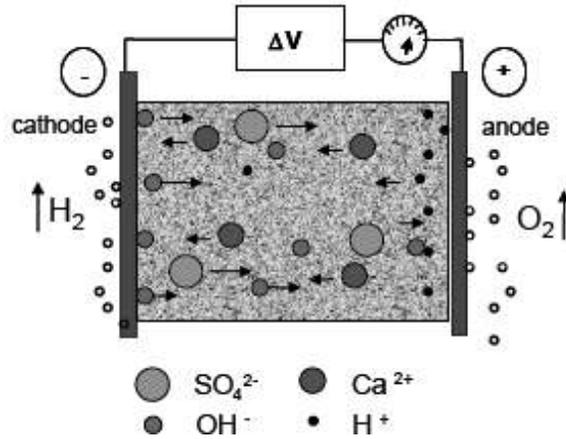


Figura 2.25. Procesos que ocurren cuando se aplica una campo eléctrico en un probeta de hormigón: Reacciones electródicas y movimientos de iones [38].

En la Figura 2.25 se muestra que todos los iones presentes en el electrolito pueden participar de esta migración. Sin embargo, no todos transportan la misma cantidad de electricidad e incluso, algunas veces, algunos iones no se mueven del todo si la migración esta perfectamente balanceada por una difusión en la dirección contraria.

La proporción de corriente que lleva un ión en particular con respecto a la corriente que llevan el resto de los iones se conoce como el “número de transferencia” de este ión en el electrolito. Si se considera por ejemplo a los cloruros, el número de transferencia es:

$$t_{cl} = \frac{z \cdot F \cdot q}{i} \quad (\text{Ec.2.15})$$

Donde:

$t_{cl}$ : Número de transferencia del cloruro

$z$ : Carga eléctrica de los cloruros

$F$ : Constante de Faraday [C/eq]

$q$ : Flujo de iones cloruro [ $\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ]

$i$ : Densidad de corriente total [ $\text{A}/\text{cm}^2$ ]

En la Figura 2.26 se muestra la representación esquemática de las típicas celdas de difusión utilizadas en los ensayos de conductividad eléctrica con iones introducidos externamente:

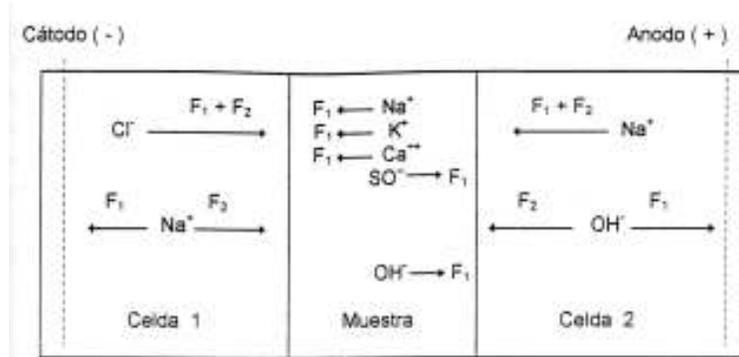


Figura 2.26. Representación esquemática de los ensayos de conductividad eléctrica con iones introducidos externamente [7].

Como se observa en el esquema, la celda 1 contiene la solución que proporciona los iones  $Cl^-$  (normalmente NaCl), y en la celda 2 existe una solución de NaOH donde se colectarán estos iones. Se colocan dos electrodos, uno a cada lado de la muestra de hormigón, de modo tal que el campo eléctrico se aplique principalmente a través de la probeta.

En un hormigón que ha sido curado adecuadamente, la solución de poros contiene, preferentemente, iones hidroxilos además de iones sulfatos y pequeñas cantidades de  $Na^+$  y  $K^+$ . Cuando se aplica el campo eléctrico, todos los iones en el sistema comienzan a moverse en dirección al electrodo de signo opuesto, bajo la acción de una fuerza conductora eléctrica  $F_1$ . De igual forma los iones se moverán debido a una fuerza  $F_2$ , producto de los gradientes de concentración iniciales del sistema. Finalmente todos los iones, excepto los iones  $Cl^-$ , cesarán su movimiento cuando se alcanza un estado de equilibrio en el sistema. Por lo tanto, cuando la migración alcanza el régimen permanente, muchos de los iones inicialmente presentes, habrán sido expulsados de la muestra; de modo que los iones  $Cl^-$  y  $Na^+$  serán predominantes. Puede existir una pequeña cantidad de  $Ca^{+2}$  y  $OH^-$  debido a la continua disolución de cristales de hidróxido de calcio en la pasta de cemento.

## 2.5 Trabajos que motivan esta investigación

En la actualidad, se han desarrollado una gran cantidad de trabajos e investigaciones que describen diferentes variables relacionadas con la resistividad y difusión de iones en el hormigón. De esta manera, se describe a continuación otros estudios que fueron de interés y aporte al desarrollo de la presente investigación.

En la investigación realizada por B. Berszakiewicz y J. Konecny [18], se dice que la estructura y conectividad del sistema de poros de la pasta esta directamente relacionado con su penetrabilidad a los medios líquidos y gaseosos. Se dice además que la penetrabilidad a los líquidos y/o gases es la propiedad más importante relacionada con la durabilidad. En la Figura 2.27 se muestra la buena correlación que se obtuvo al relacionar la resistividad eléctrica in-situ del hormigón con su resistencia a la penetración de iones cloruro. En cuanto a las formas de las probetas, la resistividad se midió en losas de 300x300x75mm, con un curado de 14 días en ambiente húmedo. Los ensayos pudieron diferenciar claramente entre las mezclas con diferente composición de sus aglomerantes y al variar la razón agua-material cementante (w/c). Sin embargo, las mediciones de resistividad eléctrica fueron extremadamente sensibles al contenido de humedad: la resistividad pudo aumentar hasta diez veces cuando la humedad superficial cambia de saturado a seco. Se dice además que para una correcta interpretación de los resultados in-situ, el contenido de humedad superficial tiene que ser conocido y su efecto considerado al utilizar los factores de corrección, de lo contrario puede ocurrir errores significativos en los valores de resistividad.

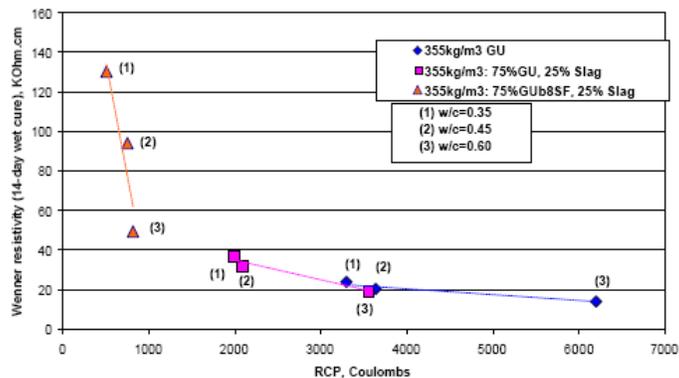


Figura 2.27. Relación entre RCP(ASTM C1202) y la resistividad (Método Wenner)[19].

En el estudio realizado por N.S Berke y M.C Hicks [10], se señala que el principal proceso de degradación del hormigón armado en ambiente marino es la corrosión de las armaduras por la acción de los cloruros del agua de mar. El tiempo de iniciación de la corrosión esta relacionado con el tiempo que toman los iones cloruro en alcanzar un nivel crítico en las barras de refuerzo. En el estudio se demuestra que el ingreso de cloruros en el hormigón sigue la ecuación de difusión de Fick para hormigones curados adecuadamente. Se muestra como el coeficiente de difusión y las concentraciones de cloruros en la superficie pueden ser utilizados para predecir el comportamiento de los cloruro como una función del tiempo. Los resultados de varios experimentos y modelos desarrollados muestran que reduciendo la razón a/c y aumentando el recubrimiento de las armaduras reducen el ingreso de cloruros, tal como recomienda el código ACI. Más aún, la penetración de cloruros disminuye enormemente si se utiliza microsílíce en las mezclas de hormigón. Además, se obtiene que cuando se administra nitrato de calcio (CN) en la mezcla de hormigón, aumentan los niveles de cloruro en que puede ocurrir una corrosión significativa. A su vez, se muestra que la resistividad está relacionada con la permeabilidad rápida a los iones cloruro mediante el ensayo AASHTO T227 [4]:

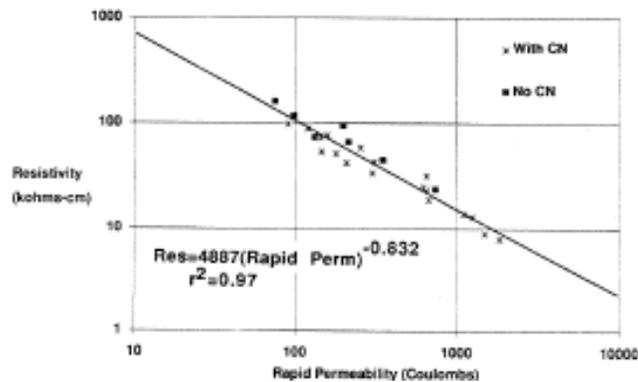


Figura 2.28. Variación de la resistividad con la permeabilidad rápida a los cloruros [10].

Adicionalmente, estudios teóricos y experimentales desarrollados por C. Andrade [38], R. Quidel [8] y M. Cortes [7], indican que existe una relación entre la resistividad y el ingreso de cloruros en el hormigón. En general, se dice que el coeficiente de difusión de iones cloruro es inversamente proporcional a la resistividad eléctrica del hormigón. En particular, se tiene que para estructuras con zonas más permeables tienen una alta penetración de iones  $Cl^-$ , baja resistividad y por ende, una alta conductividad eléctrica.

### 3 PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1 Variables a estudiar

En base a numerosos estudios se ha demostrado que la permeabilidad es una de las variables más importante que influye en la durabilidad del hormigón. El origen de una insuficiente impermeabilidad puede estar en mezclas de hormigón mal dosificadas, ausencia de compactación, curado inadecuado, etc. Si bien se conocen en general una diversidad de factores relevantes en la propiedad de permeabilidad del hormigón, el presente estudio se orienta hacia la valoración de la influencia de las siguientes variables:

##### 3.1.1 Razón agua-material cementicio (A/C)

Se conoce debido a innumerables estudios, que la relación agua-material cementante influye fuertemente en la permeabilidad del hormigón, por tratarse del factor determinante de su estructura de poros. De este modo, se consideró incluir en el estudio dos niveles de relación A/C asociados a diferentes niveles de permeabilidad, para cubrir así el rango de variabilidad que exigen las normativas actuales para estructuras expuestas a ambientes agresivos.

- A/C = 0.45 asociado a un nivel bajo de permeabilidad
- A/C = 0.55 asociado a un nivel medio de permeabilidad

##### 3.1.2 Tipo de cemento

Diversos estudios muestran las cualidades de los diferentes tipos de cementos en relación a la penetración de iones cloruro. Es por esto, que se considera el uso de un cemento Pórtland puro, con adiciones de puzolana y escoria de alto horno, provenientes de las principales fábricas nacionales:

- Cemento Melón Super (Pórtland Puro)
- Cemento Melón Extra (Pórtland Puzolánico)
- Cemento Bio Bio ARI (Pórtland Siderúrgico)

Se espera que las adiciones minerales de puzolana y/o escoria de alto horno modifiquen la microestructura de la pasta de cemento, reduciendo la movilidad de los iones presentes en el agua de poros, con la consiguiente mayor resistividad e impermeabilidad.

### 3.1.3 Temperatura Inicial

Para estudiar la influencia de la temperatura inicial del hormigón sobre las propiedades de permeabilidad, se confeccionaron los hormigones a 15 [°C] y 30 [°C] aproximadamente. Se espera que una elevación en la temperatura inicial del hormigón acelere las reacciones químicas de la hidratación y favorezca la resistencia a temprana edad. Sin embargo, con una rápida hidratación inicial parece formar productos de una estructura física más pobre, probablemente más porosa, por lo que una proporción mayor de poros se mantendrá siempre sin llenar. Esto viene de la rápida formación de cristales microscópicos en la superficie de borde de los granos, que conducirá a una irregular distribución de los productos de hidratación y consecuentemente, un sistema de poros interconectados de mayor tamaño.

La explicación de los efectos adversos de la alta temperatura temprana ha sido difundida por Verbeck y Helmuth [46], quienes sugieren que el rápido grado inicial de hidratación a más altas temperaturas retarda la hidratación subsecuente, y produce una distribución no uniforme de los productos de la hidratación dentro de la pasta. La razón de esto es que, a mayor grado inicial de hidratación, no hay suficiente tiempo disponible para la difusión de los productos de la hidratación fuera del grano del cemento ni para una precipitación uniforme en el espacio intersticial (como sucede a temperaturas inferiores). En consecuencia, una mayor concentración de los productos de la hidratación se apoya en la vecindad de los granos hidratantes, y esto retarda la hidratación subsecuente y afecta adversamente la resistencia a largo plazo.

### 3.1.4 Condiciones de curado

Considerando la influencia de las condiciones de curado sobre los fenómenos de difusión de cloruros y de resistividad eléctrica, se adoptaron los siguientes curados:

- 1) Curado en cámara húmeda ( $95 \pm 2$  % de humedad y  $23 \pm 1$  °C de temperatura).
- 2) Curado en ambiente de laboratorio (65% de humedad y  $22 \pm 1$  °C de temperatura)
- 3) Curado bajo agua (100% de humedad y  $18 \pm 1$  °C de temperatura).

En el Método de Wenner, se consideraron 3 tipos de curado consistente en mantener primero las muestras confeccionadas a  $\pm 15^\circ\text{C}$  en cámara húmeda por 48 días, luego en ambiente de laboratorio desde el día 48 hasta el día 121 de confeccionadas las probetas. Finalmente, las probetas fueron sometidas bajo agua desde el día 121 hasta el día 192 de confeccionadas las muestras. En la Figura 3.1 se muestra un esquema con las condiciones de curado que fue sometida un misma probeta confeccionada a  $\pm 15^\circ\text{C}$ .

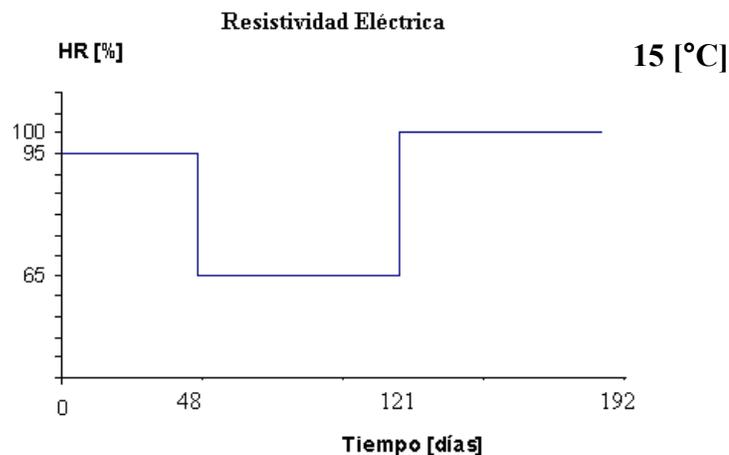


Figura 3.1. Condiciones de curado ensayo de resistividad eléctrica.

Análogamente, en la Figura 3.2 se muestra las condiciones de curado para las resistividades obtenidas para las muestras confeccionadas a  $\pm 30^{\circ}\text{C}$  en los 3 tipos de curado en que fue sometida una misma probeta.

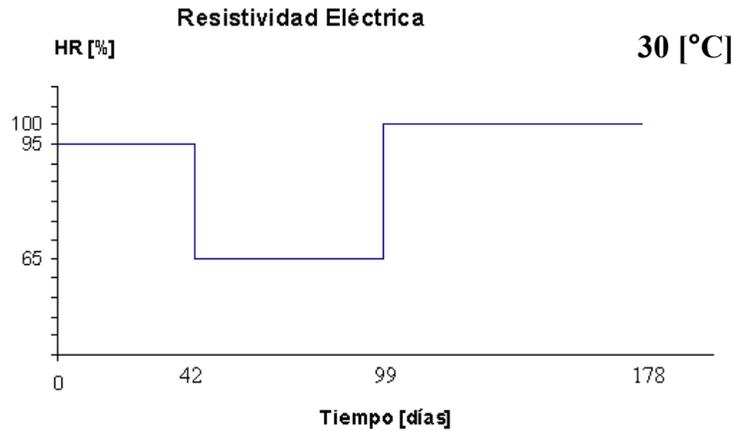


Figura 3.2. Condiciones de curado ensayo de resistividad eléctrica.

En la Figura 3.3 se muestra que la edad de las probetas para el ensayo de la norma ASTM C1202 al momento de la experiencia fue de  $97 \pm 5$  días. El curado se ejecutó en cámara húmeda con  $95 \pm 2$  % de humedad y  $23 \pm 1$  °C de temperatura, aproximadamente.

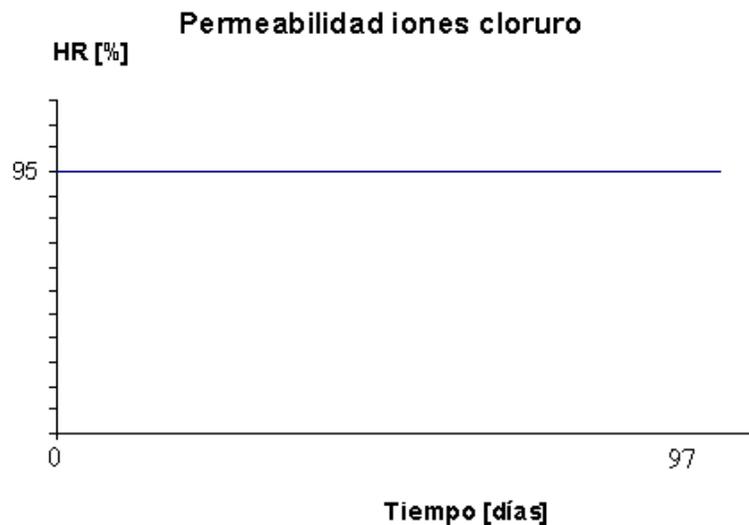


Figura 3.3. Condiciones de curado ensayo de permeabilidad iones cloruro.

### 3.2 Programa de Ensayos

De acuerdo con los objetivos del estudio y las variables en cuestión, se confeccionaron 12 probetas de hormigón con los distintos tipos de cemento, temperaturas iniciales y según las dosificaciones previamente determinadas. Para la construcción de los hormigones, se utilizó una betonera siguiendo las recomendaciones establecidas en las normas Chilenas Nch 1018 of 77 y Nch 170 of 85. Además, se tomaron las condiciones ambientales al momento de la confección junto con la temperatura, densidad, contenido de aire y asentamiento de cono del hormigón, de acuerdo a la norma Nch 1019 of 74. Las muestras fueron vibradas en la mesa de vibrado en dos ciclos de 30 [seg] para luego dar paso al curado inicial de 24 horas cubiertas con un polietileno. Luego cada probeta fue llevada al tipo de curado indicado en 3.1.4.

Adicionalmente, para caracterizar los hormigones de acuerdo a sus propiedades mecánicas, se confeccionaron 24 cubos de  $150\text{ mm}^2$  para medir su resistencia a compresión a los 28 días de acuerdo a la norma Nch 1037 of 77.

Tabla 3.1: Programa de variables a medir

Tipo de Cemento	Agua/Cemento	Temperatura Hormigón	Identificación
Ce1: Portland Puro (Melón Super)	A/C1: 0.45	T1: 15°C T2: 30°C	H1 H2
	A/C2: 0.55	T1: 15°C T2: 30°C	H3 H4
Ce2: Portland Puzolánico (Melón Extra)	A/C1: 0.45	T1: 15°C T2: 30°C	H5 H6
	A/C2: 0.55	T1: 15°C T2: 30°C	H7 H8
Ce3: Portland Siderúrgico (Bio Bio ARI)	A/C1: 0.45	T1: 15°C T2: 30°C	H9 H10
	A/C2: 0.55	T1: 15°C T2: 30°C	H11 H12

### 3.3 Descripción de los Ensayos

Para estudiar la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración del ión  $\text{Cl}^-$ , se empleó el método del ensayo rápido de permeabilidad al ión cloruro ASTM C1202 (equivalente a AASHTO T277) y las mediciones de resistividad eléctrica  $\rho$  se efectuaron de acuerdo al método conocido como “técnica de Wenner” o “de 4 puntas”, según la norma ASTM G-57-95<sup>a</sup>.

#### 3.3.1 Método de Wenner

La norma ASTM G-57-95a muestra una de las maneras de medir la resistividad de una unidad de hormigón mediante el método de Wenner o “de 4 puntas”. El método se basa en la inserción de 4 electrodos en línea recta a una misma profundidad, las mediciones de la resistividad dependerán de la distancia entre los nodos, la profundidad y las características de resistencia eléctrica del material medido. El principio de este método es la inyección de una corriente alterna de baja frecuencia ( $< 1\text{kHz}$ ) a través de los electrodos externos, mientras que el potencial eléctrico es medido en los dos electrodos internos. En las Figuras 3.4 y 3.5 se muestran las disposiciones de los electrodos, espaciamiento y la profundidad de los contactos.

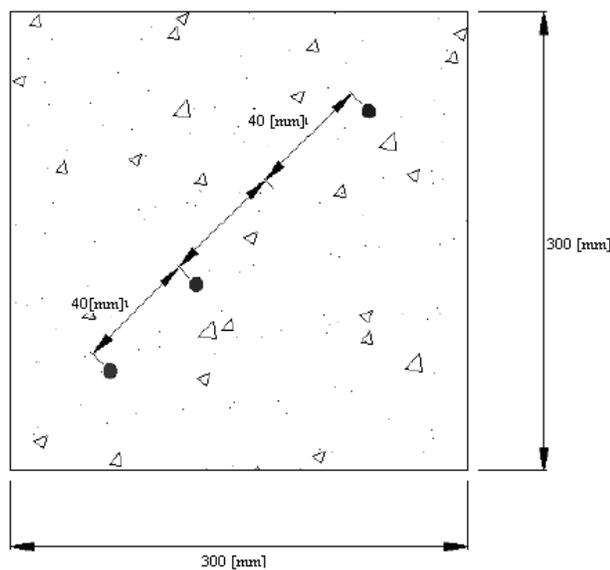


Figura 3.4. Espaciamiento perforaciones.

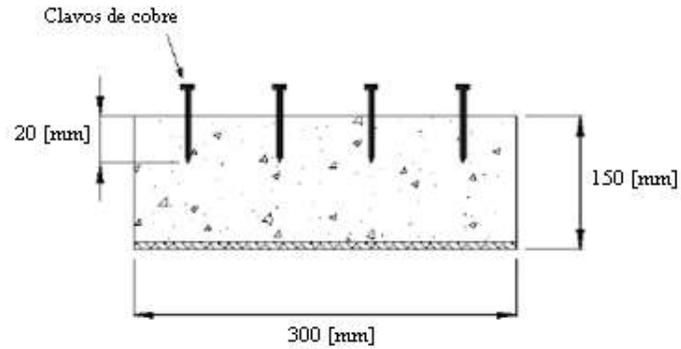


Figura 3.5. Profundidad de perforaciones.

En la Figura 3.6 se muestra un esquema de los elementos que se necesitan para medir la resistividad del hormigón. La conexión de electricidad del sistema, que corresponde a la red de 220 [V] con una frecuencia entre 50 y 60 [Hz], la que se hace pasar por un regulador de voltaje para dejarlo en 60 [V].

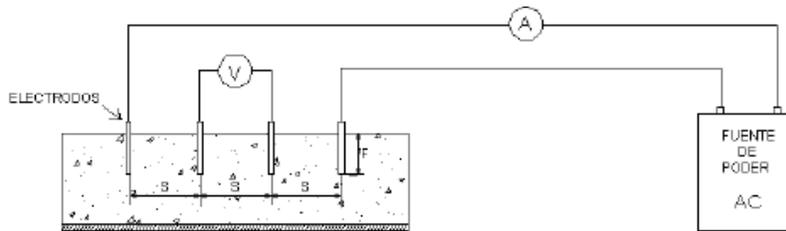


Figura 3.6. Medición de resistividad [8].

La resistividad eléctrica de la sección de hormigón en función de la distancia y profundidad de los electrodos se puede obtener a partir de la siguiente expresión [8]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot S \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot S}{\sqrt{S^2 + 4 \cdot F^2}} - \frac{S}{\sqrt{S^2 + F^2}}} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:  $\rho$  : Resistividad promedio a una profundidad F [ $\Omega \cdot m$ ].

S: Distancia entre los electrodos [m].

F: Profundidad de los electrodos [m].

R: Resistencia eléctrica [ $\Omega$ ].

El instrumental y material utilizado en la medición de resistividad se detalla en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2 Materiales e Instrumentos de medición

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>
1	Regulador de voltaje KNOBEL ENNENDA de 3 [A]
3	Multitester FLUKE
48	Clavos de cobre 2"

### 3.3.1.1 Limitaciones del ensayo

Algunos autores han encontrado las siguientes limitaciones del ensayo:

- Las mediciones de resistividad son una medida adicional muy útil que contribuyen a identificar áreas con problemas o tiene que ver con la confirmación sobre un hormigón de pobre calidad [41].
- Correlaciones entre la resistividad y el ritmo de corrosión se pueden encontrar en probetas similares en las mismas condiciones en el laboratorio, pero en la variabilidad del mundo real cualquier correlación es fortuita [41].
- La resistividad es una indicación de la permeabilidad “relativa” y está muy afectada por la presencia de adiciones, etc, que resultan en lecturas muy elevadas de resistividad (variando la química de la solución de poros), incluso sin reducir significativamente la permeabilidad [42].

El principal problema con el Método de Wenner es que las barras de acero proveen un camino para un circuito corto con lectura que inducen al error. Sin embargo, investigadores de la Universidad de Liverpool [12] han identificado seis fuentes principales de error en las mediciones de resistividad. Los errores pueden deberse a:

- **La influencia de la geometría del hormigón:** se recomienda que el espaciado entre electrodos no sea superior a  $\frac{1}{4}$  de cualquier dimensión del elemento de hormigón. La distancia a cualquier borde del elemento debe ser al menos el doble del espaciado entre electrodos.

- **La heterogeneidad del hormigón:** la influencia de las partículas individuales de árido sobre la medida de la resistividad no es significativa si el tamaño de partícula es pequeño o el espaciado Wenner es grande. Se recomienda que el espaciado sea al menos 1.5 veces el tamaño máximo del árido.

- **Un mal contacto superficial:** el área de contacto superficial no afecta significativamente a las medidas obtenidas empleando la técnica de cuatro puntas de Wenner. Sin embargo, si se emplea el método de dos contactos, en el que la aplicación de la corriente y las medidas de la diferencia de potencial se toman entre dos puntos de la misma superficie del hormigón, se ha detectado que las medidas son muy sensibles al área de contacto superficial.

- **La existencia de capas de diferente resistividad respecto al núcleo del hormigón:** Una capa superficial de baja resistividad produce mayores errores en la medida de la resistividad del hormigón interior que una capa superficial de alta resistividad. En el caso que exista una capa superficial de baja resistividad, como podría ser la causada por la penetración de sal en la superficie del hormigón, se puede evitar cometer un error significativo en la medida de la resistividad si el espaciado entre electros es al menos 8 veces mayor que el espesor de esa capa. Se recomienda que se eviten las medidas en superficies de hormigón recientemente humedecidas, en especial si están carbonatadas. En concreto, hay que medir pasadas 24 horas de la última lluvia. Cuando el espesor de carbonatación supera el recubrimiento de hormigón, lo que influirá sobre la velocidad de corrosión en la resistividad de esta capa (no la del hormigón interior), el espaciado de los electrodos debe ser igual o inferior al espesor de la capa carbonatada, para asegurar que se está midiendo la resistividad de esta capa carbonatada.

- **La presencia de las armaduras:** el error de la medida sólo es significativo si se posicionan los electrodos justo sobre la barra; no es significativo si se colocan ortogonalmente a la barra o situados lejos de una barra paralela. Incluso si se realizan las

medidas de resistividad sobre una barra, se pueden evitar los errores significativos si el espaciado entre electrodos es menor que  $2/3$  del recubrimiento.

- **Cambios en las condiciones ambientales:** se recomienda que el espaciado entre electrodos sea al menos de 4 [cm] para minimizar el efecto debido a la humedad de la superficie, incluso cuando se mida tras 24 horas sin lluvia.

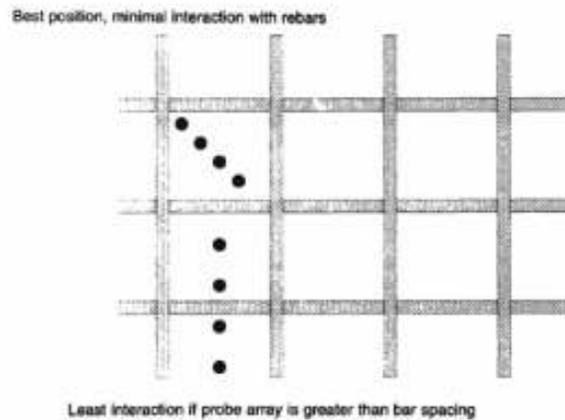


Figura 3.7. Minimización del efecto del acero en el Método de Wenner [12].

### 3.3.2 Ensayo de penetración de iones cloruro

El método de la norma ASTM C1202 [3] consiste en monitorear la intensidad de corriente eléctrica que pasa a través de una probeta cilíndrica de 102 [mm] de diámetro y  $51 \pm 1$  [mm] de espesor. Las muestras se montan en una típica celda de difusión, cuando se mantiene una diferencia de potencial de 60 [V] entre sus caras durante un periodo de 6 horas. En las Figura 3.8 se muestra el montaje de la probeta en la celda de difusión.

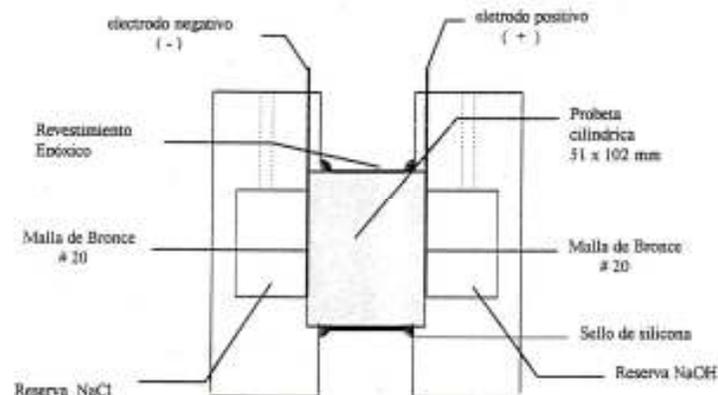


Figura 3.8: Montaje de la probeta en la celda de difusión [7].

Previo a la realización del ensayo, las probetas son llevadas a una condición estándar de humedad. Para tal efecto, se sella el manto del cilindro con un revestimiento epóxico para luego de 24 horas, someterlas a un proceso de saturación en vacío. La Figura 3.9 muestra el esquema y equipos necesarios para saturar las probetas en vacío, en el que se aprecian un desecador de vidrio en donde se deposita la probeta, una bomba de vacío capaz de producir una presión de vacío de  $-650$  [mmMg] al interior del desecador, un embudo de precipitación, un vacuómetro para medir el vacío producido y una trampa de agua para impedir el ingreso de humedad a la bomba.

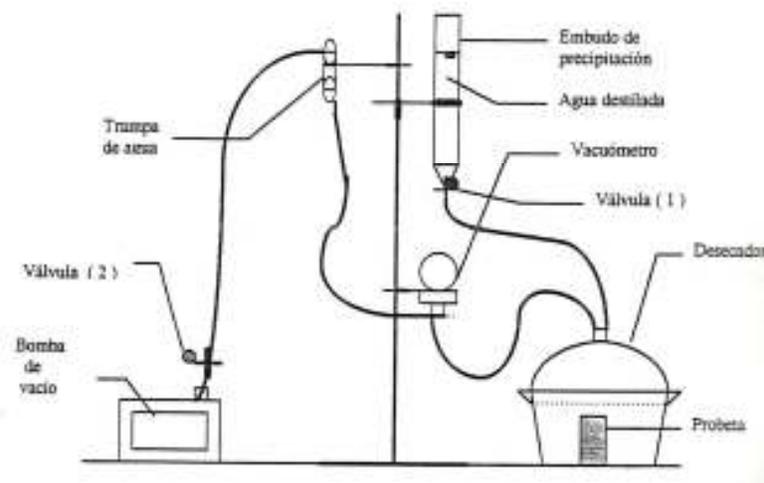


Figura 3.9. Saturación en vacío [7].

El proceso de saturación en vacío consiste en el siguiente procedimiento:

- 1) Se pesan y miden las probetas que serán colocadas en el desecador, de modo que sus caras queden expuestas.
- 2) Una vez que se han puesto las probetas en el desecador y se ha chequeado que no existen pérdidas en el sistema, se acciona la bomba manteniendo durante 3 horas el vacío al interior del desecador.
- 3) Al finalizar este periodo, se llena el embudo de precipitación con agua descarbonatada. Con la bomba funcionando, se drena el agua hacia el desecador mediante la apertura de la válvula (1), hasta cubrir completamente las probetas.
- 4) Se cierra la válvula (1) y se deja funcionar la bomba durante una hora adicional.

- 5) Luego se apaga la bomba y se abren las válvulas para que el interior del desecador vuelva a la presión atmosférica.
- 6) Finalmente, las probetas se mantienen durante  $18 \pm 2$  horas sumergidas en agua descarbonatada.

Una vez finalizada esta etapa de acondicionamiento, se instalan las muestras en las celdas de difusión que contiene en uno de sus receptáculos una solución al 3 % de NaCl y en el otro una al 0.3N de NaOH.

Finalmente se conectan los terminales de la celda al circuito eléctrico, de modo que el electrodo negativo quede en contacto con la solución de cloruro de sodio y el electrodo positivo con la solución de hidróxido de sodio.

La carga eléctrica total que pasa por la probeta se calcula con la fórmula basada en el método del trapecio por integración numérica. Si se han efectuado registros cada treinta minutos se tiene:

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (\text{Ec 3.2})$$

Donde  $I_0$  es la intensidad de corriente, en Amperes, inmediatamente después de aplicada la diferencia de potencial e  $I_t$  es la corriente a t minutos de iniciado el ensayo.

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:

Tabla 3.3: Clasificación ASTM C1202

<b>Carga Pasada [Coulomb]</b>	<b>Permeabilidad ión cloruro</b>
> 4000	Alta
2000 a 4000	Moderada
1000 a 2000	Baja
100 a 1000	Muy Baja
< 100	Despreciable

Cabe señalar que la base del ensayo que especifica la norma ASTM C1202, fue dada por un estudio realizado por David Whiting [37], en el que consideró hormigones de distintos tipos confeccionados con cementos Pórtland.

Tabla 3.4. Permeabilidad a ión  $Cl^-$  según el estudio de David Whiting [37]

Carga Total Traspasada [C]	Permeabilidad a ión $Cl^-$	Tipo de hormigón
>4000	Alta	Hormigón convencional fabricado con cemento Pórtland, alta razón A/C (>0.6)
2000-4000	Moderada	Hormigón convencional fabricado con cemento Pórtland, moderada razón A/C (0.4 a 0.5)
1000-2000	Baja	Hormigón convencional fabricado con cemento Pórtland, baja razón A/C (<0.4)
100-1000	Muy Baja	Hormigón modificado con látex Hormigón sellado interiormente
<100	Despreciable	Hormigón impregnado con polímeros Hormigón polimérico

### 3.3.2.1 Limitaciones del ensayo

Algunos autores han encontrado las siguientes limitaciones del ensayo:

- Los resultados son muy sensibles a los cambios que se producen en la química de la solución de los poros, y por consiguiente, exageran la efectividad de las adiciones minerales activas [43].
- La relación entre conductividad eléctrica y difusión de iones varía con el mecanismo de difusión. De este modo, las medidas son muy sensibles a la presencia de pequeños defectos, como fisuras en el hormigón [43].
- Los resultados se obtienen a base de mediciones realizadas antes que el flujo alcance el régimen permanente.
- La aplicación de un campo eléctrico induce cambios en la estructura de poros y en la resistividad inicial del hormigón.
- La edad de la muestra influye en gran medida sobre el valor de la carga eléctrica, siendo esta menor cuando el hormigón envejece.

- Los agregados se consideran impermeables frente al flujo de iones cloruro. Debido a ello, el tamaño máximo y el contenido de agregados (tortuosidad) influyen en el resultado obtenido. En efecto, un aumento en el tamaño máximo o bien un mayor contenido de agregados disminuye la permeabilidad para una misma relación A/C.
- La aplicación de una diferencia de potencial al hormigón genera elevación de temperatura lo que implica liberación de calor por efecto Joule. Esto es perjudicial sobre todo si la probeta es muy joven (se recomienda ensayar probetas de por lo menos 28 días de edad) o si la porosidad del hormigón es elevada (alta relación A/C).
- En el proceso de migración no sólo se ven afectados los iones cloruro sino que también existe una serie de especies iónicas que de hecho participan del proceso y que se encuentran en la solución de poros ( $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $OH^-$  y  $Ca^{+2}$ ).
- Durante el ensayo de migración acelerada debido a la influencia de un campo eléctrico, el ligamiento de cloruros (fijación) por parte de los productos de hidratación del cemento es menor al producido en un ensayo de difusión normal, donde la penetración de cloruros se debe únicamente a un gradiente de concentraciones (potencial químico). Esto les permite aseverar a muchos autores que no es factible predecir el comportamiento del hormigón durante la vida útil de la estructura a partir del coeficiente de migración obtenido con este método [45].

Entre las ventajas que presenta el método, además de la rapidez del ensayo en si mismo, se pueden citar las siguientes:

- Permite que sea realizado sobre probetas de laboratorio o sobre testigos extraídos de la estructura en un período de tiempo razonable y compatible con los plazos de proyecto.
- Si se evalúan hormigones en forma comparativa, permite calificar cual es la mezcla que posee una mayor capacidad para resistir la penetración de cloruros.

## 4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental tiene por objetivo estudiar el comportamiento de un conjunto de hormigones, fabricados con distintos tipos de cemento y variadas dosificaciones, que se utilizan comúnmente en estructuras de hormigón armado.

Dadas las variables de estudio escogidas, se describe a continuación las etapas en que se desarrolló la experimentación que va desde la elección de los materiales, pasando por la confección de hormigones y preparación de probetas, hasta la ejecución de los ensayos.

### 4.1 Caracterización de los Materiales

#### 4.1.1 Cemento

Los cementos empleados en la investigación corresponden a los cementos comerciales provenientes de las plantas cementeras de Cementos Melón y Cementos Bío Bío.

Las propiedades de estos cementos, según la norma Nch 148 of 68 “Cemento-Terminología, Clasificación y especificaciones generales”, se encuentran en las siguientes tablas:

Tabla 4.1. Identificación de Cementos

Clasificación	Nombre comercial	Identificación
Portland Grado Alta Resistencia	Melón Super	MSU
Portland Grado Alta Resistencia	Melón Extra	MEX
Portland Siderúrgico Grado Alta Resistencia	Bío Bío Alta Resistencia	BAR

En la Tabla 4.2 se indica, para cada una de las fábricas, la composición mineralógica del clínter en la cual se fabricaron los correspondientes cementos. Además, las características físico-químicas de cada cemento se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.2. Composición mineralógica del clínker.

(Datos entregados por los fabricantes)

Componentes	Fábrica	
	Melón	Bío-Bío
<b>Contenido de óxidos</b>		
SiO <sub>2</sub> [%]	21.1	20.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	5.1	5.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	2.7	2.3
CaO [%]	66.6	65.1
SO <sub>3</sub> [%]	0.7	1.1
<b>Composición mineralógica</b>		
C <sub>3</sub> S [%]	64.1	52.1
C <sub>2</sub> S [%]	12.3	20.2
C <sub>3</sub> A [%]	8.9	11.7
C <sub>4</sub> AF [%]	8.3	7.1

Tabla 4.3. Características fisico-químicas de los cementos empleados

(Datos entregados por los fabricantes)

Propiedades	Tipo de cemento		
	Melón Super	Melón Extra	Bío Bío ARI
SiO <sub>2</sub> [%]	20.8	29.4	23.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	2.9	2.7	3.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	6	7.4	4.9
CaO [%]	63.2	51.8	60.3
SO <sub>3</sub> [%]	2.5	3.4	2.4
Peso Especifico	3.14	2.98	3
Finura Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	4620	5210	4150
Contenido Puzolana [%]	-	17	-
Contenido de Escoria[%]	-	-	18

#### 4.1.2 Áridos

Los áridos utilizados para la elaboración de los distintos hormigones fueron proporcionados por la empresa Pétreos Río Maipo, la cual procesa material fluvial de dicho río.

Estos áridos corresponden a una gravilla de tamaño máximo ¾” y a una arena gruesa, que presentan las granulometrías que se muestra en la Figura 4.1.

Tabla 4.4. Granulometría de los áridos

Malla ASTM	Abertura [mm]	Gravilla [%]	Arena [%]
1"	25	100	
3/4"	20	99	
1/2"	12.5	54	
3/8"	10	20	100
#4	5	1	97
#8	2.5		74
#16	1.25		53
#30	0.63		37
#50	0.315		21
#100	0.16		6
Tamaño máximo nominal [mm]		20	5
Módulo de finura		6.8	3.03

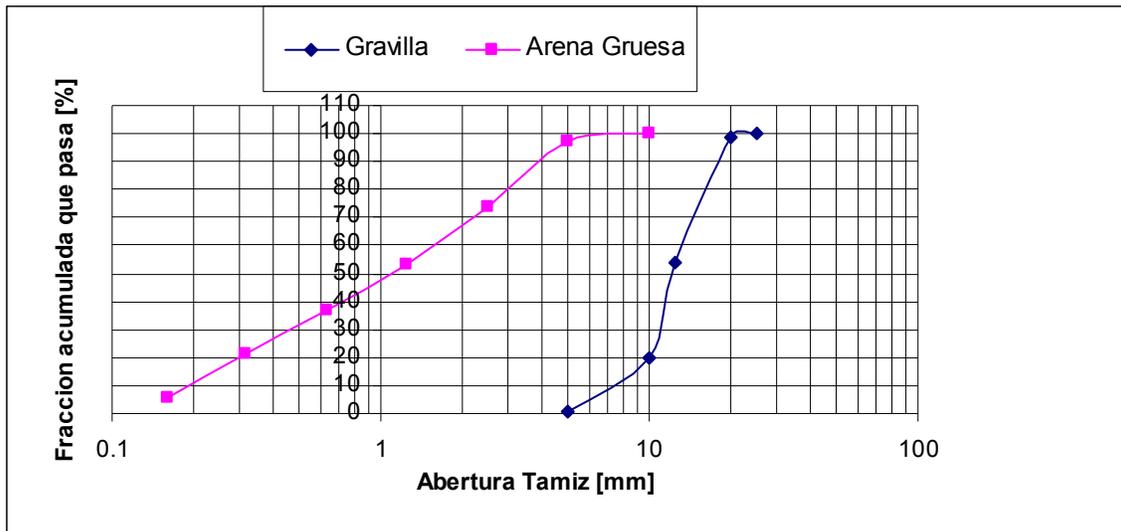


Figura 4.1. Curva granulométrica de los áridos

Para la determinación del material fino se utilizó la norma Nch 1223 of 77 “Áridos para morteros y hormigones- Determinación del material fino menor a 0.08 mm”. Los ensayos de densidad real y neta, y la absorción de la gravilla se efectuaron de acuerdo a la norma Nch 1117 of 77 “Áridos para morteros y hormigones- Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las gravas, y de la arena de acuerdo a la norma Nch 1239 of 77 “Áridos para morteros y hormigones- Determinación de las densidades real y neta y la absorción de agua de las arenas”. La densidad aparente de los áridos se realizaron de acuerdo a la norma Nch 1116 of 77 “Áridos para morteros y hormigones-

Determinación de la densidad aparente”. La determinación de los huecos de los áridos se realizó con la norma Nch 1326 of 77 “Áridos para morteros y hormigones- Determinación de huecos”. En la Tabla 4.5 se muestran los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de áridos del IDIEM.

Tabla 4.5. Resultados análisis físicos

<b>Resultado Ensayos</b>	<b>Gravilla</b>	<b>Arena</b>
Material fino menor a 0.080 mm [%]	0.2	1.5
Densidad real árido sss [Kg/m3]	2.726	2.700
Densidad real árido seco [Kg/m3]	2.698	2.664
Densidad neta [Kg/m3]	2.775	2.765
Absorción de agua [%]	1.04	1.37
Densidad aparente compactada [Kg/m3]	1.596	1.791
Densidad aparente suelta [Kg/m3]	1.502	1.653
Contenido de huecos [%]	44.3	38

#### 4.1.3 Agua de amasado

El agua utilizada en el trabajo experimental corresponde a agua proveniente de la red de suministro de agua potable de la comuna de Santiago.

#### 4.1.4 Dosificación

Para determinar la dosificación de los hormigones, se siguieron los procedimientos de la norma ACI 211.1-21 de donde se obtuvieron las siguientes dosificaciones:

Tabla 4.6: Dosificaciones

	<b>Hormigón</b>											
	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>H4</b>	<b>H5</b>	<b>H6</b>	<b>H7</b>	<b>H8</b>	<b>H9</b>	<b>H10</b>	<b>H11</b>	<b>H12</b>
<b>Agua [Litro]</b>	171.4	171.4	168.6	168.6	172.4	172.4	169.5	169.5	172.2	172.2	169.2	169.2
<b>Cemento [Kg]</b>	455.6	372.7	455.6	372.7	455.6	372.7	455.6	372.7	455.6	372.7	455.6	372.7
<b>Arena [Kg]</b>	697.7	697.7	772.8	772.8	675.6	675.6	754.7	754.7	678.5	678.5	757.0	757.0
<b>Gravilla [kg]</b>	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8	976.8

Una vez definidas las dosificaciones y preparados los áridos, se fabricaron los 12 hormigones en estudio. En cada una de las coladas, se corrigió el agua de amasado según el contenido de humedad de los áridos. Luego se pesaban los materiales y se realizaban las mezclas en una betonera con capacidad de 300 [Litros]. Cada hormigón fue compactado por medio de la mesa vibradora en dos ciclos de 30 [s] cada uno.

## ***4.2 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE COMPORTAMIENTO***

Los ensayos para caracterización de comportamiento de los hormigones se realizaron en el laboratorio de hormigones de IDIEM.

### **4.2.1 Ensayos de hormigón fresco**

#### ***4.2.1.1 Asentamiento de cono***

La medida de asentamiento de cono de Abrams permite determinar principalmente la fluidez y la forma de derrumbamiento para apreciar la consistencia del hormigón.

EL ensayo de asentamiento de cono se realizó siguiendo el procedimiento de la norma Nch 1019 of 74 “ Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams”.

Este ensayo se realizó al finalizar el proceso de amasado, aproximadamente 5 minutos después de agregar el agua a la mezcla final de los hormigones.



Figura 4.2. Ensayo asentamiento de cono de Abrams

#### 4.2.1.2 Densidad

La medida de la densidad considera el volumen real de la mezcla de hormigón más el volumen de aire incorporado, por lo que entrega una proporción del peso del hormigón fresco en un volumen.

El ensayo de densidad se realizó de acuerdo al procedimiento de la norma Nch 1564 of 70 “Hormigón – Determinación de la densidad aparente, del rendimiento, del contenido de cemento y del contenido de aire del hormigón fresco”.



Figura 4.3. Ensayo de densidad

#### 4.2.1.3 Contenido de aire

El método para determinar el contenido de aire del hormigón fresco se basa en la medición del cambio de volumen del hormigón sometido a un cambio de presión.

El ensayo de contenido de aire se realizó siguiendo el procedimiento de la normativa vigente. La norma que se especifica en este ensayo corresponde a la Nch 2184 of 92 “Hormigón y mortero – Método de ensayo – Determinación del contenido de aire”.



Figura 4.4. Ensayo contenido de aire.

## 4.2.2 Ensayos de hormigón endurecido

### 4.2.2.1 Resistencia a compresión de probetas cúbicas

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó de acuerdo al procedimiento indicado en la norma Nch 1037 of 77 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”. El equipo de ensayo utilizado corresponde a una prensa Toni Technik.



Figura 4.5. Ensayo resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos en este ensayo son utilizados para encontrar la resistencia mecánica del hormigón a la edad especificada.

## 5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

En el presente capítulo se proporcionan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados al hormigón fresco y endurecido de las series especificadas. Con ellos, se analiza el comportamiento del hormigón y se estima cómo las variables en estudio influyeron en él.

### 5.1 Caracterización de los hormigones estudiados

En la Tabla 5.1 se entregan los resultados obtenidos en los ensayos de asentamiento de cono, la temperatura de confección de la mezcla, densidad, contenido de aire y los valores medios del ensayo a compresión a 28 días realizado a probetas cúbicas de 15 [cm] de arista.

Tabla 5.1. Caracterización hormigones

Tipo de Cemento	Identificación Hormigón		Hormigón fresco				E. Compresión
	Agua/Cemento	Temperatura [°C]	Cono [cm]	T [°C]	Densidad [Kg/dm <sup>3</sup> ]	C. aire [%]	RN 28 días [Mpa]
Ce1: Portland Puro (Melón Super)	A/C1: 0.45	T1: 15°	11	16	2.39	1.4	62.1
		T2: 30°	6.5	30.7	2.39	1.5	61.4
	A/C2: 0.55	T1: 15°	10	16.2	2.37	1.6	46.2
		T2: 30°	12.5	28.4	2.39	1.2	52.9
Ce2: Portland Puzolánico (Melón Extra)	A/C1: 0.45	T1: 15°	10	15.7	2.35	1.6	51.9
		T2: 30°	6.5	28.3	2.36	1.4	50.9
	A/C2: 0.55	T1: 15°	13	15.9	2.38	1.1	39.9
		T2: 30°	11.5	28.6	2.41	1.0	43.6
Ce3: Portland Siderúrgico (Bio Bio ARI)	A/C1: 0.45	T1: 15°	12	16.7	2.38	1.2	43.9
		T2: 30°	7	28.6	2.40	1.2	42.7
	A/C2: 0.55	T1: 15°	16	16.3	2.39	0.9	29.8
		T2: 30°	11.5	29.7	2.41	0.9	31.2

## 5.2 Ensayo de resistividad eléctrica

Considerando la influencia de las condiciones de curado en la resistividad eléctrica del hormigón, se consideraron 3 tipos de curado consistente en mantener primero las muestras confeccionadas a  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  en cámara húmeda por 48 días, luego en ambiente de laboratorio desde el día 48 hasta el día 121 de confeccionadas las probetas. Luego, las probetas fueron sometidas bajo agua desde el día 121 hasta el día 192 de confeccionadas las muestras.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistividad para las distintas condiciones que fueron expuestas las probetas.

Tabla 5.2. Resultados de resistividad promedio para hormigones confeccionados a  $\pm 15^{\circ}\text{C}$

T [días]	Hormigones T: 15 °C						Tipo de Curado
	H1	H3	H5	H7	H9	H11	
	Ce: MSU A/C: 0.45	Ce: MSU A/C: 0.55	Ce: MEX A/C: 0.45	Ce: MEX A/C: 0.55	Ce: BAR A/C: 0.45	Ce: BAR A/C: 0.55	
$\rho$ [k $\Omega$ cm]							
48	7.89	6.75	14.70	10.11	15.51	13.84	<b>Cámara Húmeda</b>
49	7.57	6.56	14.78	10.20	15.52	13.92	<b>Ambiente de Laboratorio</b>
55	8.45	7.22	17.82	12.33	18.75	17.18	
63	8.32	7.11	18.68	13.32	19.97	18.56	
64	8.63	7.37	19.33	14.10	21.10	19.48	
69	8.86	7.61	20.58	15.15	22.10	20.82	
70	9.09	7.79	21.31	15.67	22.85	21.40	
81	10.93	9.29	28.99	21.48	31.29	28.78	
85	9.15	7.83	27.10	18.43	25.65	24.22	
89	9.16	7.95	26.50	19.80	26.50	25.64	
92	10.28	8.80	29.80	22.69	31.00	29.40	
95	9.00	8.54	34.00	22.48	30.00	28.70	
102	8.94	8.10	32.57	22.17	29.20	27.48	
121	9.40	8.80	39.00	28.00	35.00	33.00	
124	8.01	6.96	25.11	19.54	27.78	21.51	<b>Bajo Agua</b>
130	7.74	6.55	26.45	19.84	28.04	26.16	
135	7.33	6.05	25.98	18.51	25.06	23.73	
151	7.31	6.26	28.90	21.00	26.00	24.00	
166	7.91	6.57	32.13	26.84	34.54	29.65	
192	8.01	6.91	37.83	27.49	34.76	31.21	

Análogamente, en la Tabla 5.3 se muestran las resistividades obtenidas para las muestras confeccionadas a  $\pm 30^{\circ}\text{C}$  que fueron sometidas a los 3 tipos de curado.

Tabla 5.3. Resultados de resistividad promedio para hormigones confeccionados a  $\pm 30^{\circ}\text{C}$

Hormigones T: 30 °C											
H2 Ce: MSU A/C: 0.45		H4 Ce: MSU A/C: 0.55		H6 Ce: MEX A/C: 0.45		H8 Ce: MEX A/C: 0.55		H10 Ce: BAR A/C: 0.45		H12 Ce: BAR A/C: 0.55	
T [días]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	$\rho$ [k $\Omega$ cm]	Tipo de Curado			
42	9.23	7.58	12.98	11.40	18.38	13.73	<b>Cámara Húmeda</b>				
47	9.22	8.01	14.97	13.08	21.47	14.90	<b>Ambiente de Laboratorio</b>				
48	9.23	8.06	15.50	14.00	22.43	15.42					
59	11.56	11.00	25.00	20.00	31.46	21.43					
63	10.00	9.50	23.10	17.90	27.00	19.10					
67	12.20	10.00	19.60	17.92	29.00	20.50					
70	11.26	10.90	24.78	24.30	34.80	22.90					
73	11.25	13.00	24.00	23.00	33.00	23.10					
80	15.00	9.00	23.00	22.00	32.00	23.00					
99	15.40	12.00	23.50	22.50	40.10	38.00	<b>Bajo Agua</b>				
110	9.67	7.10	20.77	17.85	26.29	21.68					
116	9.15	7.31	24.38	19.50	26.47	25.60					
121	9.42	7.29	22.91	17.04	21.05	20.51					
137	9.00	7.90	22.60	22.50	22.00	24.32					
152	11.06	9.93	30.48	21.59	30.61	37.55					
178	9.08	6.87	29.73	24.98	33.24	27.64					

### 5.3 Ensayo de penetración de iones cloruro

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de penetración de iones cloruro. En la Tabla 5.4 se muestra la carga eléctrica total que pasa por las probetas ensayadas.

Tabla 5.4. Resultados carga eléctrica total promedio

		<b>Identificación Hormigón</b>											
		<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>H4</b>	<b>H5</b>	<b>H6</b>	<b>H7</b>	<b>H8</b>	<b>H9</b>	<b>H10</b>	<b>H11</b>	<b>H12</b>
<b>Q [Coulomb]</b>		5019	4498	5226	5120	1416	1359	1429	1430	983	1035	1251	1198

De las Tablas 5.5 y 5.6 se muestran la evolución de las intensidades de corrientes medias durante el transcurso del ensayo. En cada tabla se muestra el valor promedio de los resultados de dos probetas compañeras, para cada uno de los hormigones estudiados. La edad de las probetas al momento de las experiencias fue de  $97 \pm 5$  días.

Tabla 5.5. Evolución intensidad de corriente para hormigones confeccionados a  $\pm 15^\circ\text{C}$

		<b>H1</b>	<b>H3</b>	<b>H5</b>	<b>H7</b>	<b>H9</b>	<b>H11</b>
		<b>Ce: MSU A/C: 0.45</b>	<b>Ce: MSU A/C: 0.55</b>	<b>Ce: MEX A/C: 0.45</b>	<b>Ce: MEX A/C: 0.55</b>	<b>Ce: BAR A/C: 0.45</b>	<b>Ce: BAR A/C: 0.55</b>
<b>T [min]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>I [mA]</b>
0	183.3	183.3	50.00	50.0	33.3	50.0	
30	216.7	200.0	66.67	66.7	50.0	50.0	
60	233.3	233.3	66.67	66.7	50.0	50.0	
90	266.7	250.0	66.67	66.7	50.0	58.3	
120	275.0	266.7	75.00	83.3	50.0	66.7	
150	291.7	283.3	83.33	83.3	50.0	66.7	
180	300.0	300.0	83.33	83.3	50.0	66.7	
210	308.3	316.7	83.33	83.3	50.0	66.7	
240	316.7	316.7	83.33	83.3	50.0	75.0	
270	316.7	316.7	83.33	83.3	58.3	83.3	
300	325.0	333.3	83.33	83.3	66.7	83.3	
330	333.3	333.3	83.33	83.3	66.7	83.3	
360	333.3	341.7	83.33	83.3	66.7	83.3	

Tabla 5.6. Evolución intensidad de corriente para hormigones confeccionados a  $\pm 30^{\circ}\text{C}$

	H2	H4	H6	H8	H10	H12
	Ce: MSU A/C: 0.45	Ce: MSU A/C: 0.55	Ce: MEX A/C: 0.45	Ce: MEX A/C: 0.55	Ce: BAR A/C: 0.45	Ce: BAR A/C: 0.55
T [min]	I [mA]	I [mA]	I [mA]	I [mA]	I [mA]	I [mA]
0	144.0	156.0	52.0	60.0	44.0	52.0
30	176.0	200.0	56.0	64.0	48.0	56.0
60	200.0	236.0	60.0	70.0	52.0	56.0
90	220.0	248.0	60.0	72.0	54.0	60.0
120	236.0	264.0	62.0	76.0	54.0	62.0
150	248.0	280.0	64.0	80.0	56.0	64.0
180	260.0	288.0	64.0	80.0	56.0	66.0
210	268.0	296.0	72.0	84.0	60.0	68.0
240	272.0	308.0	80.0	84.0	60.0	72.0
270	276.0	320.0	88.0	84.0	60.0	72.0
300	282.0	324.0	96.0	84.0	60.0	72.0
330	284.0	332.0	104.0	84.0	62.0	72.0
360	288.0	340.0	112.0	84.0	64.0	72.0

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Ensayo de resistencia a compresión

La resistencia que adquiere la pasta de cemento endurecido es una consecuencia de la existencia de las fuerzas atractivas de Van der Waals. Los pequeños cristales de CSH, los de AFt, AFm y los hidratos hexagonales de aluminato cálcico tienen elevadas superficies específicas que favorecen la existencia de este tipo de fuerzas atractivas, de modo que tienen un gran poder adhesivo, no sólo entre sí, sino también con cristales de baja superficie específica como el CH, granos de clínker anhidro y partículas inertes de árido.

En las Figuras 6.1 y 6.2 se presentan las resistencias obtenidas a los 28 días en donde se puede apreciar claramente que los hormigones aumentan su resistencia al disminuir la relación agua-material cementicio. Por otra parte, los cementos que contienen adiciones puzolánicas requieren de un mayor tiempo para que las reacciones puzolánicas se lleven a cabo, por lo que considerar 28 días para el ensayo pudo haber sido insuficiente para la contribución de las puzolanas en resistencia. De todas maneras, se tiene que el uso de puzolanas en reemplazo por cemento portland, produce una importante reducción en la resistencia a compresión en el periodo estudiado. Cabe destacar también que en el proceso de hidratación de la pasta de cemento, los densos cristales de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), producto de la reacción con los silicatos, es consumido por el material puzolánico que reduce la velocidad de reacción y los niveles de resistencia.

En la Figura 6.1 se muestra la resistencia a compresión para los hormigones confeccionados a 15 °C. Para los hormigones con  $A/C = 0.45$ , la resistencia del hormigón BAR es un 29% menor que la resistencia de MSU mientras que la resistencia de MEX es un 16% menor de la resistencia de MSU. De la misma manera, se tiene que para los hormigones con  $A/C = 0.55$ , la resistencia del hormigón BAR es un 36% menor que la resistencia de MSU mientras que la resistencia de MEX es un 14% menor de la resistencia de MSU. Estos porcentajes de reducción son similares a los hormigones

confeccionados a 30 °C, lo que sugiere que la contribución de la temperatura inicial no es perceptible para el rango de temperaturas considerado.

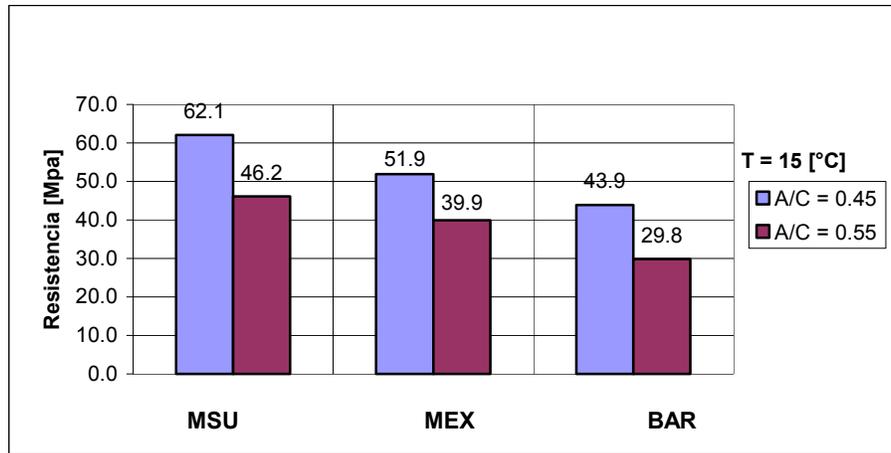


Figura 6.1 Resistencia a compresión para hormigones confeccionados a 15°C

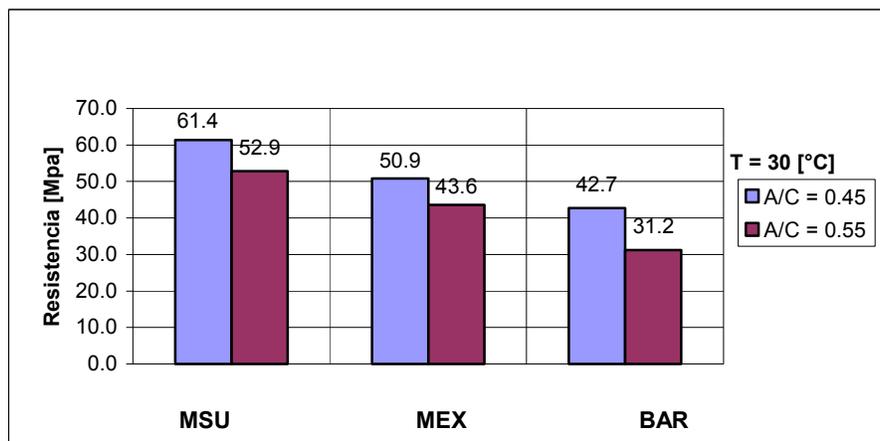


Figura 6.2 Resistencia a compresión para hormigones confeccionados a 30°C

Los cementos utilizados en esta investigación, además de diferir en su contenido de adiciones, presentan diferencias en su Finura Blaine (Tabla 4.2). Como las reacciones de hidratación se producen en la superficie de los granos, sucede que cuanto más pequeño son éstos, es más rápido el desarrollo de resistencia. Es así como se puede explicar también que entre los cementos con adiciones minerales, el cemento de mayor finura (MEX) presenta mayor grado de hidratación a la edad de 28 días y por ende, mayor resistencia inicial.

## 6.2 Ensayo de resistividad eléctrica

En las figuras 6.3 y 6.4 se muestran las resistividades promedio obtenidas para los hormigones con distintas temperaturas iniciales. En ambos casos se tiene que la resistividad esta principalmente influenciada por el *contenido de humedad* y la composición del *material cementicio*. Como la corriente eléctrica es transportada por medio de los iones disueltos en el agua de los poros, un aumento en la saturación de poros así como un número creciente de poros de un diámetro más grande (alta relación A/C), provocan una disminución de la resistividad, y viceversa. La adición de minerales reactivos, como son la escoria de alto horno y puzolana, generan nuevos compuestos con cambios químicos, físicos y mineralógicos que producen notoriamente diferentes propiedades y desempeños. De esta manera, se tiene que para las dosificaciones con adiciones puzolánicas son mucho mejores de cara a aumentar la resistividad del hormigón, pero además tienden a aumentar la resistividad con el tiempo. Así mismo, los hormigones Pórtland puro (MSU) presentaron un mayor volumen de capilares de poros que facilitaron el transporte de iones aumentando la conductividad eléctrica de las sustancias presentes en la solución de poros.

De los resultados experimentales, se desprende que los cementos Pórtland puro (MSU) son pocos sensibles al contenido de humedad, ya que al someter una misma probeta a distintas condiciones de curado, la resistividad se mantuvo prácticamente uniforme en el tiempo. Por otro parte, para los hormigones con adiciones minerales, una disminución en la saturación de poros provocó un significativo aumento de resistividad obteniéndose así un hormigón más denso e impermeable.

Las Figuras 6.3 y 6.4 muestran que los hormigones MSU no presentan una mayor diferencia en cuanto a la resistividad eléctrica ni al tipo de curado. Sin embargo, la evolución de resistividad en los hormigones con adiciones es mucho más pronunciada y a veces dispersa.

Durante el ensayo, los hormigones MSU son los que presentaron una mayor conductividad, que se ve reflejado en la mayor capacidad de transportar carga eléctrica en los iones disueltos en la fase acuosa del hormigón. En cambio, los hormigones MEX y BAR presentaron resistividades mayores, lo que indica que el grado de dificultad que encontraron los electrones en sus desplazamientos fue mayor.

De los gráficos anteriores se desprende además que la razón a/c influye también en el flujo de iones que pasa en el interior del hormigón, teniendo que para un mismo tipo de hormigón a menor relación agua-material cementicio, menor es la intensidad de corriente que pasa a través de la probeta durante el ensayo. Esto se debe a que una menor relación a/c, menor es la dispersión en las partículas del cemento y por ende el volumen de poros es menor, lo que dificulta el desplazamiento de electrones en la microestructura del hormigón. Es por esto también que una mezcla con menor relación a/c, presenta una matriz menos permeable a la solución de poros y por lo tanto, menos conductora de iones.

Se esperaba que la microestructura de pastas de cemento hidratadas inicialmente a una mayor temperatura estuviese marcada por una irregular distribución de los productos de hidratación y consecuentemente, un sistema de poros interconectados de mayor tamaño. De esta manera, la pasta de cemento debiese volverse más porosa y por ende más conductora de iones. Sin embargo, de acuerdo a los ensayos realizados en el laboratorio, no se distinguen grandes diferencias en la propiedad de resistividad para los hormigones con temperaturas iniciales de 15 ° C y 30 ° C, por lo que se necesita un mayor rango de temperatura para comprobar la influencia de esta propiedad.

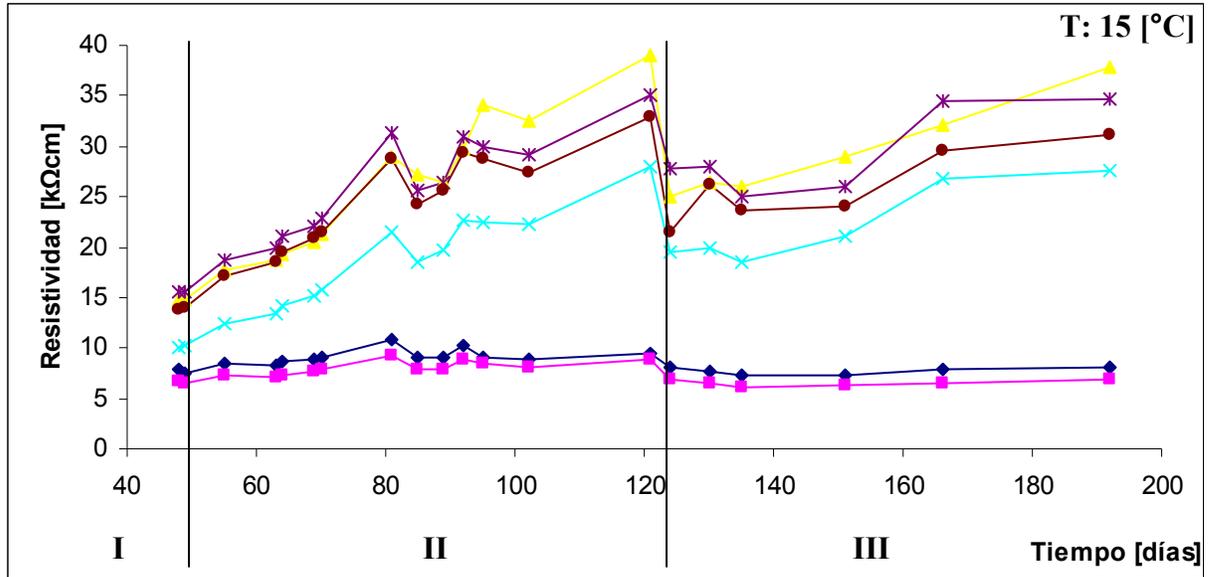


Figura 6.3. Resistividades promedio hormigones confeccionados a 15 [°C]

Donde:

- I** Cámara Húmeda
- II** Ambiente Laboratorio
- III** Bajo Agua

- ◆ MSU A/C 0.45
- MSU A/C 0.55
- ▲ MEX A/C 0.45
- × MEX A/C 0.55
- \* BAR A/C 0.45
- BAR A/C 0.55

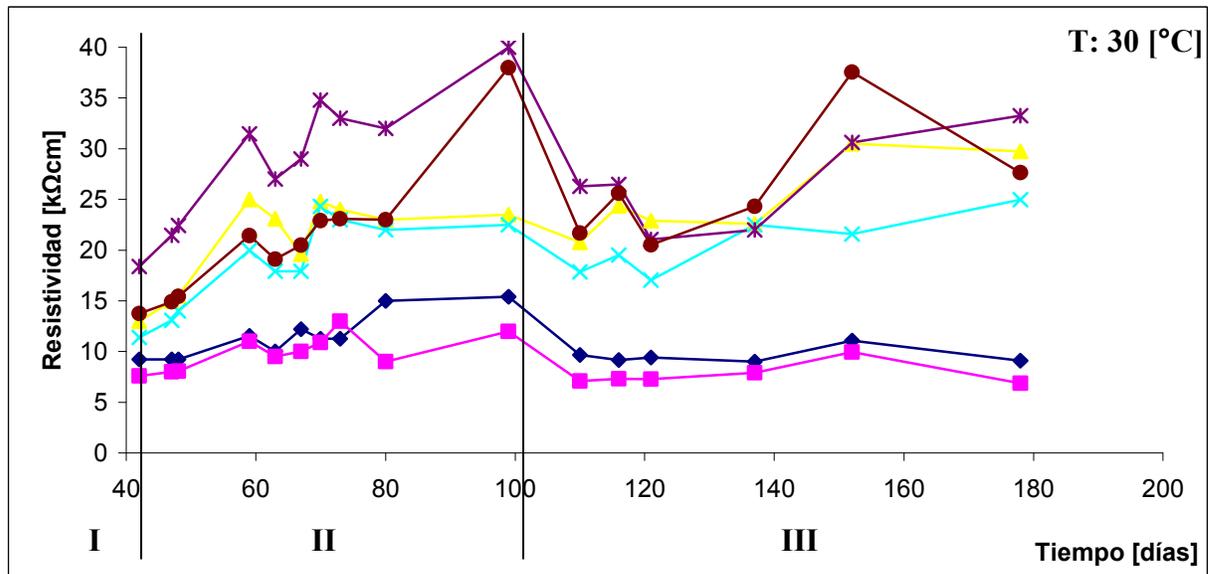


Figura 6.4. Resistividades promedio hormigones confeccionados a 30 [°C]

Donde:

- I** Cámara Húmeda
- II** Ambiente Laboratorio
- III** Bajo Agua

- ◆ MSU A/C 0.45
- MSU A/C 0.55
- ▲ MEX A/C 0.45
- × MEX A/C 0.55
- \* BAR A/C 0.45
- BAR A/C 0.55

### 6.3 Ensayo de penetración de iones cloruro

Las Figuras 6.5 y 6.6 ilustran las curvas de evolución de las intensidades de corriente eléctrica que pasa a través de las probetas instaladas en las celdas de difusión, para los hormigones con distintas temperaturas iniciales. En ambos casos se puede ver que las curvas de evolución de la intensidad de corriente pueden ser ajustadas de buena forma con una función exponencial del tipo  $I(t) = K \cdot t^n$ , que corresponde en parte a la solución de los procesos de migración.

Como se puede ver en las Figuras 6.5 y 6.6, en los hormigones con adiciones puzolánicas no se ve mayor diferencia en cuanto a la intensidad de corriente que pasa en las probetas durante el ensayo. Sin embargo, la evolución de corriente de los hormigones sin adiciones es mucho más pronunciada que el resto de los hormigones en estudio.

Durante el ensayo, los hormigones BAR son los que presentaron una menor permeabilidad, ya que es el hormigón que más dificultó el transporte de iones, que se ve reflejado en la menor intensidad de corriente que pasa en el ensayo. En cambio, los hormigones MSU presentaron una alta intensidad de corriente o iones. Esto se debe a que los productos de hidratación del cemento Pórtland puro contribuyen poco a reducir la interconectividad en la estructura, facilitando el flujo de iones al interior de la microestructura del hormigón.

Los gráficos indican también que no existen grandes diferencias en las intensidades de corriente para el rango de temperaturas considerado, por lo que el desarrollo y mejoras de las propiedades de los hormigones por efecto de la temperatura no se ven reflejadas aún.

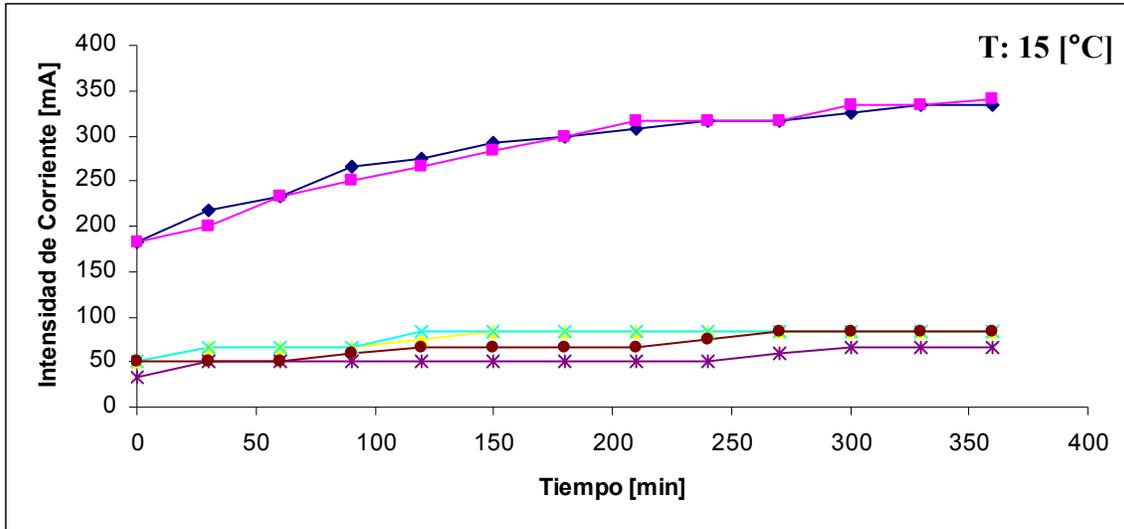


Figura 6.5. Intensidad promedio de corriente para hormigones confeccionados a 15 [°C]

Donde:

- ◆ MSU A/C 0.45
- MSU A/C 0.55
- ▲ MEX A/C 0.45
- × MEX A/C 0.55
- \* BAR A/C 0.45
- BAR A/C 0.55

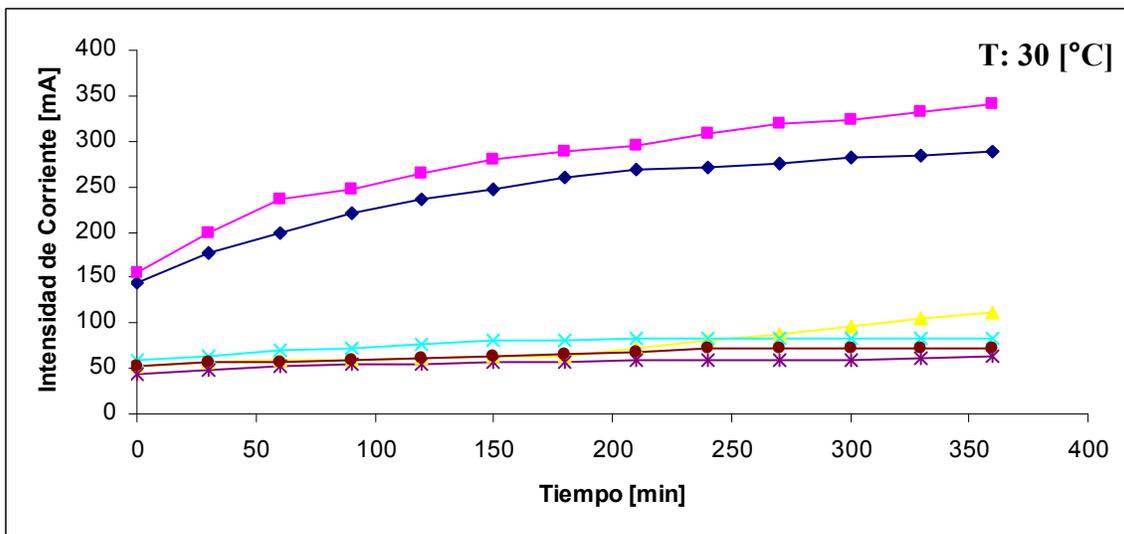


Figura 6.6. Intensidad promedio de corriente para hormigones confeccionados a 30 [°C]

Donde:

- ◆ MSU A/C 0.45
- MSU A/C 0.55
- ▲ MEX A/C 0.45
- × MEX A/C 0.55
- \* BAR A/C 0.45
- BAR A/C 0.55

A partir de los gráficos anteriores se desprende que la razón a/c influye también en la intensidad de corriente que pasa, teniendo que para un mismo tipo de hormigón a mayor relación agua-material cementicio, mayor es la intensidad de corriente que pasa a través de la probeta a lo largo del ensayo. Esto se debe a que con una mayor relación a/c se tiene una mayor dispersión en las partículas del cemento y el volumen de poros es mayor, por lo que la mezcla presenta una matriz más permeable a la solución de poros y por lo tanto más conductora de iones.

A continuación se presenta los valores de la carga eléctrica total que pasa durante 6 horas a los  $97 \pm 5$  días de edad, cuando se aplica una diferencia de potencial que obliga a la migración de iones cloruro a través de una probeta de hormigón.

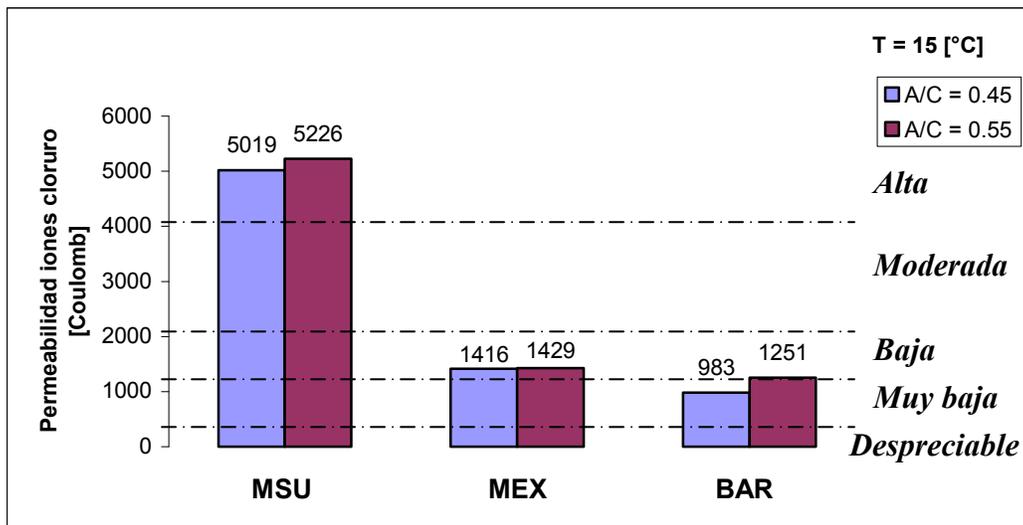


Figura 6.7. Permeabilidad iones cloruro según tipo de cemento

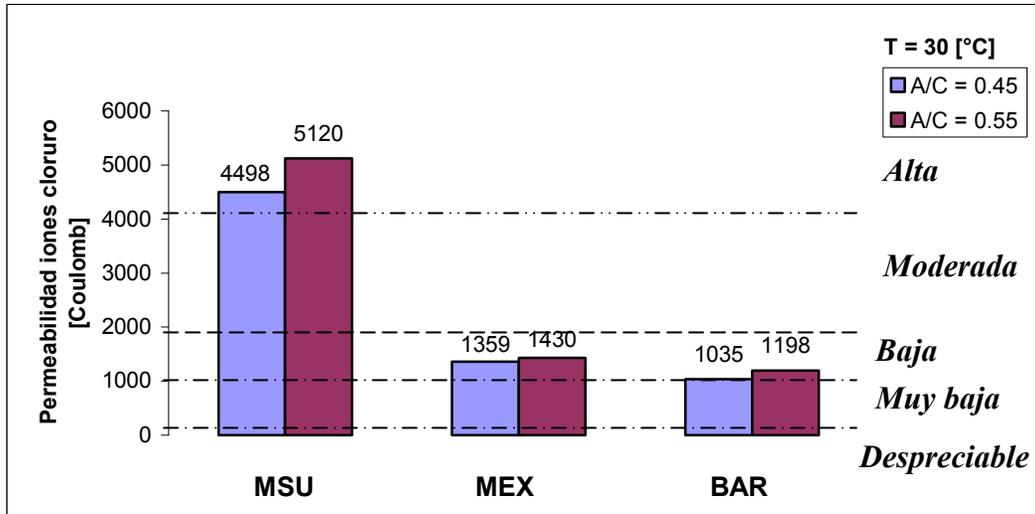


Figura 6.8. Permeabilidad iones cloruro según tipo de cemento

En relación a los valores de penetrabilidad de iones cloruro basados en la carga total que pasa a través del hormigón, se tiene que los cementos con adiciones minerales, como son la escoria de alto horno y la puzolana, reducen efectivamente los valores de penetrabilidad. Si se consideran los valores de la carga eléctrica como índices de permeabilidad al ión  $Cl^-$ , los hormigones MEX y BAR quedan clasificados según la norma ASTM C1202 como una permeabilidad al ión cloruro baja. En cambio, los hormigones MSU quedan clasificados como una permeabilidad al ión cloruro alta, transformándose en el más permeable de los tres hormigones en estudio. Este mismo resultado obtuvo Marcelo Cortes [7] al comparar este mismo cemento con nueve cementos comerciales proveniente de cuatro fábricas nacionales.

Si bien los hormigones con puzolanas se comportan similarmente, se observa que el hormigón con adiciones siderúrgicas presenta una reducción mayor en permeabilidad al compararlo con el hormigón con adiciones de puzolana.

La presencia de puzolanas en los hormigones MEX y BAR, permite obtener una menor permeabilidad al ión cloruro. Estos resultados coinciden con los resultados de Metha y Monteiro [5], que concluyeron que a la edad de 90 días o más un hormigón con cemento Portland puro presenta por lo general 2500 [Coulomb] más en su permeabilidad a iones

cloruros que un hormigón con un agregado cementicio. En el estudio realizado por López y Castro [44] se registraron a los 84 días de edad en hormigones con A/C = 0.55, una diferencia entre un cemento Pórtland puro y mezclas con un 14% y 33% de puzolana natural de 2900 [Coulomb]. En esta investigación la diferencia registrada entre MSU y las mezclas con puzolanas naturales y artificiales, fueron de aproximadamente 3500 [Coulomb] y 3800 [Coulomb] respectivamente.

Asimismo, se puede establecer las variaciones que sufre éste parámetro ante cambios en las variables estudiadas. La Tabla 6.1 muestra la variación porcentual de Q con respecto a la razón A/C y de la temperatura inicial. Se adoptaron como valores de referencia a los hormigones con menor razón A/C y los fabricados con cementos sin adiciones minerales.

Tabla 6.1: Variación porcentual de la carga eléctrica total con respecto a la razón A/C

Tipo de Cemento	T1 = 15 °C		T2 = 30 °C	
	Razón A/C		Razón A/C	
	0.45	0.55	0.45	0.55
MSU	100	104	100	114
MEX	100	101	100	105
BAR	100	127	100	116

Tabla 6.2: Variación porcentual de la carga eléctrica total con respecto al contenido de adición del cemento

Tipo de Cemento	T1 = 15 °C		T2 = 30 °C	
	Razón A/C		Razón A/C	
	0.45	0.55	0.45	0.55
MSU	100	100	100	100
MEX	28	27	30	28
BAR	20	24	23	23

De esta comparación se derivan las conclusiones que a continuación se señalan:

- Los hormigones MSU, MEX y BAR presentan un aumento promedio en el valor de Q de un 4%, 1% y 27% respectivamente para una temperatura inicial de 15 °C, y un aumento de 14%, 5% y 16% respectivamente para una temperatura inicial de 30 °C, al incrementar la razón A/C en 0.1.

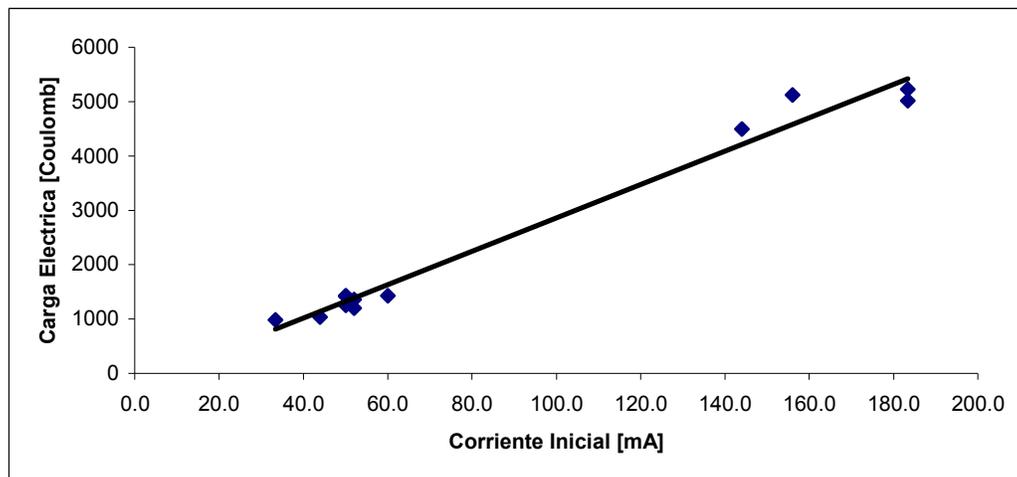
- Los cementos Pórtland siderúrgicos (BAR), muestran una mayor influencia de la razón A/C sobre la permeabilidad del hormigón, apreciándose que para la variación en una décima de este parámetro, el valor de la carga eléctrica se incrementa en un 22% en términos medios. De igual modo, los hormigones MSU y MEX, presentan un aumento promedio en el valor de Q de un 9% y 3% respectivamente.
- En términos generales, se tiene que las adiciones de puzolana y escoria granulada de alto horno presentan a una reducción media de permeabilidad equivalente a un 72% y 77% respectivamente, de la registrada en los hormigones sin materiales puzolánicos. El origen de este comportamiento, se puede atribuir a un importante debilitamiento de la zona de transición árido-pasta por efecto de reacciones de hidratación distintas que pudieron generar mayor porosidad y microfisuración en esa zona.
- Por último, no se obtuvieron grandes diferencias en los valores de permeabilidad equivalente al variar la temperatura inicial de 15°C a 30°C. Este hecho se refleja en la Tabla 6.2, donde las mezclas MEX y BAR presentan una permeabilidad equivalente constante de un 28% y 23% de la registrada en los hormigones sin adiciones puzolánicas, respectivamente.

## 6.4 Correlaciones obtenidas

De todos los resultados experimentales obtenidos, se han considerado las siguientes correlaciones que son de interés en el estudio. De esta manera, en este apartado se muestran las regresiones obtenidas entre la corriente inicial y el valor de la carga eléctrica total en el ensayo de permeabilidad a los cloruros, y la correlación que existe entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro.

### 6.4.1 Regresión obtenida en el ensayo de permeabilidad

De acuerdo al estudio bibliográfico realizado, Marcelo Cortes [7] y Feldman [9] obtuvieron buenas correlaciones entre la corriente inicial y la carga eléctrica total para una gran variedad de hormigones. De esta manera, se estudió la existencia de una relación lineal, como se muestra en la Figura 6.9:



**Figura 6.9. Relación lineal entre la corriente inicial y la carga eléctrica total**

De la figura anterior se desprende que existe una muy buena relación lineal entre la corriente inicial y el valor de la carga eléctrica total que pasa a través de las probetas en el ensayo de penetración de iones cloruro, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = -211.22 + 30.72 \cdot I_0 \quad R^2 = 0.98$$

#### 6.4.2 Regresiones obtenidas en los ensayos de migración de iones

Al graficar los resultados de las mediciones de los dos métodos del estudio, se puede apreciar que estos se pueden agrupar de acuerdo al material cementicio empleado, que corresponden a comportamientos claramente diferenciados.

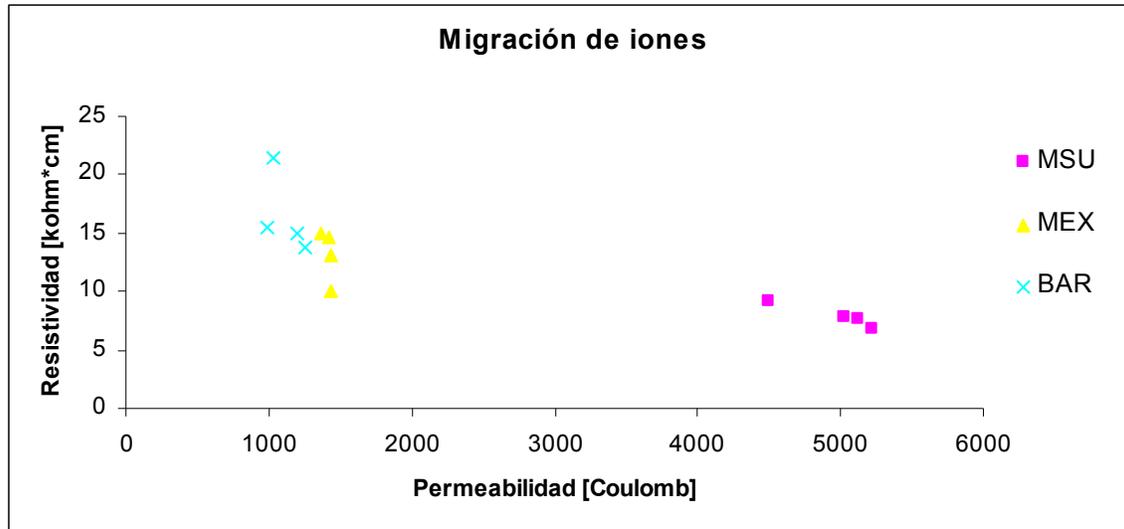


Figura 6.10. Resultados obtenidos ensayos migración de iones

En efecto, la Figura 6.10 muestra que los hormigones dosificados con cemento Pórtland puro (MSU) se comportan de modo tal que su permeabilidad equivalente fue superior a los 4500 [Coulomb] y su resistividad inferior a 10 [kohm·cm]. En cambio, los hormigones con adiciones minerales (MEX y BAR) tuvieron una permeabilidad equivalente inferior a 1500 [Coulomb] y su resistividad superior a 10 [kohm·cm].

En la Figura 6.11, se muestra que la resistividad eléctrica del hormigón se puede relacionar con su resistencia a la penetración de iones cloruro con una función exponencial del tipo  $Res = K \cdot Pen^n$ , que corresponde en parte a la solución de los procesos de migración. Para el cálculo de las regresiones se consideraron las resistividades obtenidas cuando las muestras se encontraban inicialmente sometidas en cámara húmeda.

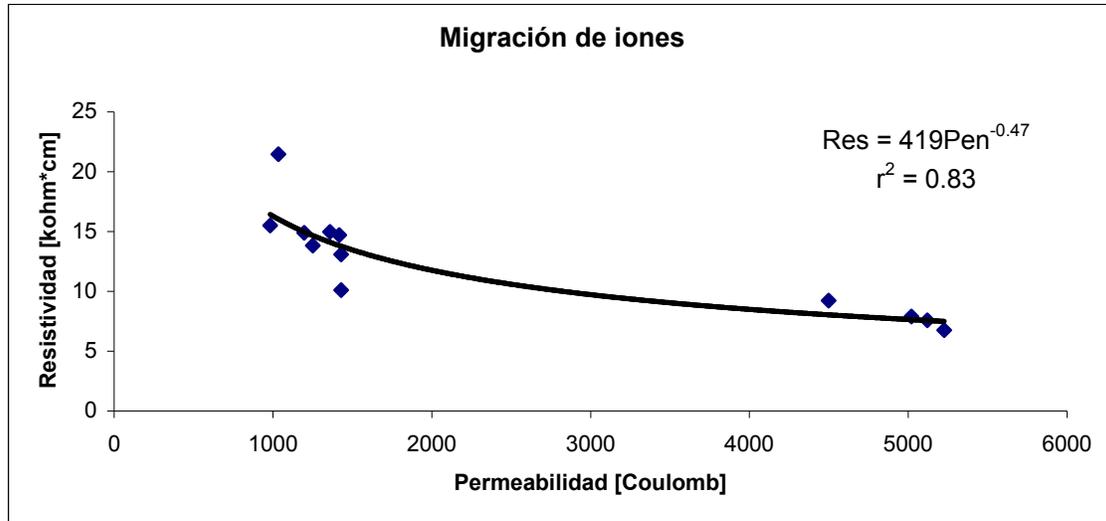


Figura 6.11. Regresiones obtenidas en los ensayos de migración de iones

De la figura anterior, se desprende que existe una predominante relación inversa entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro, por lo que existe una relación negativa entre ambas propiedades (al crecer los valores de resistividad disminuyen los de permeabilidad y viceversa.). Además, se observa que existe una buena correlación ( $r^2 = 0.83$ ) entre ambas propiedades, si se considera que el hormigón es un material bastante complejo, heterogéneo y cambiante en el tiempo, por lo que la tendencia resultante fue la esperable.

De esta manera, se estima conveniente continuar con el estudio de migración de iones para establecer la permeabilidad de los hormigones en función de los valores de resistividad, lo que permitirá obtener un índice de durabilidad de hormigones recepcionados en obra.

## 7. CONCLUSIONES FINALES

Del estudio experimental realizado a las 12 probetas de hormigón, se derivan las siguientes conclusiones:

- La resistividad eléctrica del hormigón varió dentro de un amplio rango, entre 70 y 400  $\Omega\text{m}$ , en función del contenido de humedad del hormigón, la temperatura, la permeabilidad y su composición. Para una humedad relativa constante y a igual grado de hidratación, la resistividad aumentó al bajar la relación a/c, al aumentar el tiempo de curado y con las adiciones minerales. De los ensayos realizados en el laboratorio se obtuvo que las resistividades de los hormigones con adiciones puzolánicas, aumentaron significativamente su resistividad inicial y durante el tiempo, y aún más cuando el hormigón se seca. Entre ellos, cabe destacar que los cementos con escoria granulada de alto horno parecen mostrar un comportamiento aún mejor que los de puzolana. Por otra parte, los hormigones sin adiciones minerales presentaron una mayor proporción capilar, que se vio reflejado con el mayor flujos de iones actuando en el paso de corriente eléctrica.
- Los resultados indican que a los 178 y 192 días de realizado los ensayos de resistividad, aún no existe una estabilización de las propiedades, por lo que el desarrollo y mejora de las propiedades de los hormigones pueden crecer en el tiempo, sobre todo si la porosidad de la pasta sigue disminuyendo con el tiempo debido a los procesos de hidratación.
- La mayor reducción en la permeabilidad de iones cloruros a los  $97 \pm 5$  días, la tuvo el hormigón BAR la cual fue de un 77% con respecto al hormigón con cemento Pórtland puro, lo que confirma la tendencia en la reducción de la permeabilidad. Es así como también las mezclas MSU y BAR presentaron una permeabilidad equivalente promedio de un 28% y 23% de la registrada en los hormigones sin adiciones minerales, respectivamente.

- De acuerdo a los ensayos de resistividad y permeabilidad efectuados, las probetas de hormigón analizadas se pueden clasificar de acuerdo a su eficiencia de impedir la penetración de iones  $Cl^-$ . En la Tabla 7.1 se ordenan, de menor a mayor los hormigones de acuerdo a su eficiencia para resistir la penetración de iones cloruro a través del hormigón.

Tabla 7.1 Clasificación de acuerdo a la eficiencia para resistir la penetración de  $Cl^-$

Orden	T <sub>1</sub> = 15 °C		T <sub>2</sub> = 30 °C	
	Razón A/C		Razón A/C	
	0.45	0.55	0.45	0.55
1	BAR	BAR	BAR	BAR
2	MEX	MEX	MEX	MEX
3	MSU	MSU	MSU	MSU

- De esta manera, se comprueba que las adiciones minerales juegan un papel fundamental en el comportamiento del hormigón, al alterar su microestructura con efectos diferentes en las diversas propiedades del hormigón. Para valorizar este efecto hay que tener en cuenta que las adiciones de puzolana y escoria de alto horno originan un refinamiento de la estructura de poros del hormigón, obteniéndose así una microestructura densa con una red de poros discontinua que dificultan el desplazamiento de iones y el paso de cloruros a través del hormigón. Aunque el efecto tuvo muy poca influencia en la resistencia a compresión, si supone un freno a los distintos mecanismos de transporte dentro del hormigón, ya que disminuye la difusión y por ende la permeabilidad de sustancias potencialmente agresivas. De aquí se desprende que estas adiciones minerales tuvieron una extensa participación en la hidratación y reacciones cementantes.
- Basados en los resultados obtenidos en este estudio, el efecto de la puzolanas es mucho más significativo en la reducción de permeabilidad que en el aumento de resistencia. Por lo tanto, especificar durabilidad de hormigones por medio de resistencia, o bien esperar un aumento en durabilidad por un aumento en resistencia, es un error cuando se están usando adiciones minerales. Por ejemplo,

los hormigones MEX presentaron una resistencia promedio a compresión 16% inferior a la del hormigón con cemento Pórtland puro; sin embargo, su impermeabilidad promedio fue aproximadamente 350% superior a la de los hormigones sin adiciones. Asimismo, los hormigones BAR presentaron una resistencia promedio a compresión 34% inferior a la del hormigón con cemento Pórtland puro; sin embargo, su impermeabilidad media fue aproximadamente 450% superior a la de los hormigones sin adiciones. De aquí, se deduce que estas adiciones minerales poseen una extensa participación en la hidratación y reacciones cementantes.

- Del estudio realizado se prevé también que se pueden fabricar hormigones de similar resistencia y diferentes permeabilidades. Así, se podría comprobar que el ensayo de resistencia a compresión no controla de forma precisa su efecto beneficioso sobre la durabilidad.
- Con respecto a los mecanismos de corrosión, hay que tomar en cuenta que la corrosión es un fenómeno electroquímico, por lo que la resistividad eléctrica es una parámetro muy importante, ya que es esta la que determina el ritmo de corrosión del hormigón como una corriente iónica (corriente eléctrica en la forma de un flujo de iones) que debe pasar de los ánodos a los cátodos para que se produzca la corrosión.
- En general, se esperaba que los incrementos de temperatura disminuya la resistividad, aumente la conductividad del hormigón y viceversa. Sin embargo, de acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados, pareciera que el efecto de la temperatura es poco sensible para una temperatura inicial de 15°C y 30°C. Probablemente, este hecho se debió a que en ambos casos las reacciones de hidratación se produjeron a una temperatura similar, por lo que el rango de temperaturas iniciales considerado no fueron capaces de influir en la hidratación de la pasta de cemento.

- Se desprende que el transporte de sustancias al interior del hormigón, puede desarrollarse a través de varios mecanismos. Por ejemplo, a través de gradientes de presión en el elemento en estudio, por difusión cuando existen gradientes de concentración de iones, por absorción capilar debido a la diferencia de presión entre el agua y el aire, o a través de los poros debido a un potencial eléctrico que induce el movimiento de iones. Independiente del mecanismo de transporte de iones cloruro, todos ellos están determinados en gran medida por la estructura de poros del hormigón (diámetro, volumen y conectividad) y por el grado de saturación de dichos poros. A partir de lo anterior, un hormigón que posee una estructura densa y compacta (poca cantidad de poros y baja interconexión entre ellos), presentará una baja permeabilidad, baja difusividad, baja absorción capilar y baja conductividad eléctrica, lo que se traduce en una alta resistividad y resistencia a la penetración de iones cloruros
- En las regresiones obtenidas en los ensayos de migración, la tendencia resultante fue la esperable: la resistividad eléctrica se relaciona de buena manera con la permeabilidad a los iones cloruro con una función exponencial del tipo  $Res=419Pen^{-0.47}$  que corresponde en parte a la solución de los procesos de migración. Si se considera que el hormigón es un material bastante complejo, heterogéneo y cambiante en el tiempo, se obtuvo una buena correlación ( $r^2 = 0.83$ ).
- Finalmente, del estudio realizado se concluye que la principal variable que se debe manejar para obtener un hormigón durable, es la estructura de los productos de hidratación (porosidad e interconectividad de poros) en la zona interfacial, que se extiende radialmente hacia fuera desde la superficie del árido y se propaga gradualmente en la pasta de cemento, ya que es la zona que puede controlar la resistencia y durabilidad del hormigón. Por lo tanto, no solo hay que considerar los efectos provocados por las cargas y sollicitaciones, sino también las condiciones físicas y químicas a las que se expone. Por ello, hay que considerar el tipo de ambiente en que se va a encontrar una estructura de hormigón y que puede afectar a la corrosión de las armaduras.

## 8. RECOMEDACIONES

De la investigación realizada, se desprende que limitar el movimiento de fluidos al interior de la microestructura del hormigón es la principal variable que se debe manejar para garantizar la durabilidad del hormigón y la protección de las armaduras frente a la corrosión, por lo que es importante realizar un hormigón con una permeabilidad reducida, realizando una mezcla con una relación agua/cemento baja, una compactación idónea y la hidratación suficiente de éste con un curado adecuado. De esta forma, se consigue poros de menor tamaño y una red capilar interna poco comunicada.

Las adiciones minerales al clinker, confieren al hormigón un buen grado de impermeabilidad. En la investigación realizada se comprobó que los cementos con adiciones puzolánicas reducen en gran medida el transporte de sustancias potencialmente agresivas, aunque necesitan un mayor curado inicial. Esto se debe a que los productos de hidratación de las puzolanas contribuyen principalmente a reducir la interconectividad en la estructura de poros, dificultando así el transporte de sustancias en la zona de interacción próxima a la superficie de contacto con los áridos. Entre los materiales puzolánicos utilizados en el estudio, la escoria granulada de alto horno pareciera tener una mejor capacidad de resistir la penetración de iones cloruro, ya que presentaron un sistema de poros reducido y desconectados entre sí (reflejados en una alta resistividad y baja permeabilidad).

Se recomienda también escoger adecuadamente los áridos gruesos y finos para asegurar que se obtiene la granulometría deseada al mezclarlos. Hay que analizar además la composición mineralógica de los áridos para evitar posibles reacciones químicas no deseadas durante la hidratación de la pasta de cemento.

Para las estructuras de hormigón armado, en la superficie de las armaduras se forma una fina y uniforme película protectora de óxido cuando están en contacto con los poros alcalinos del hormigón. La neutralización de hormigón por la carbonatación o presencia de iones cloruro, destruye esta capa pasiva y en presencia de humedad y oxígeno, se

produce la corrosión del acero. En consecuencia, se puede deducir que la durabilidad del hormigón armado respecto de las acciones agresivas del medio ambiente, depende en primer lugar de la capacidad protectora que ofrece la capa de recubrimiento. Por esto, es fundamental que el hormigón de recubrimiento tenga un espesor y distribución de poros adecuado. Cada una de ellos influye determinantemente en la duración de la protección que tiene el acero y en la permeabilidad de este material cementante, y por ende, en la efectividad de esta capa protectora de recubrimiento. Con relación a lo anterior, es importante tener en cuenta que la corrosión del acero es máxima si la humedad es media o alta, pero sin llegar a la saturación. También, hay que tener presente que las altas temperaturas aceleran las reacciones químicas en general, por lo que podría producir una distribución irregular de los productos de hidratación.

En general, si se consideran todas estas medidas, es posible aumentar la capacidad del hormigón para resistir la acción del medioambiente, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro bajo las condiciones de servicio para el cual fue proyectado. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, no tienen efecto sobre la durabilidad de estructuras que tengan la superficie de hormigón con anchuras de fisura superiores a las admisibles. Asimismo, para garantizar la durabilidad del hormigón en ambientes agresivos se puede seguir las prescripciones indicadas en las normativas generales de aplicación al hormigón armado, pero en algunos países existen además normativas específicas para estructuras de hormigón en función de la agresividad del ambiente, de la calidad del hormigón y del tamaño máximo del árido grueso empleado.

Finalmente, hay que tener especial cuidado cuando se esta evaluando la servicialidad de una estructura de hormigón armado. Para esto se recomienda realizar ensayos específicos que revelen el mecanismo de transporte real de especies potencialmente agresivas, considerando el control de resistencia meramente con carácter orientativo para este fin.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. - ASTM (Reapproved 2001). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. ASTM G-57-95a.
2. – Vennesland, O., Raupach, M. and Andrade C. (2007). *Recommendation of Rilem TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete--measurements with embedded probes*. *Material and Structure*, Vol.40, April, 745-758.
3. - ASTM (2009). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. ASTM C1202-09.
4. - AASHTO (2005). *Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. AASHTO T277-05.
5. - Metha, P.K and Monteiro, P.J.M (2006). *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. Edit. McGraw-Hill, United States of America.
6. - Neville, A. (1981). *Concrete structure, properties and materials*. Edit. Limusa, México.
7. - Cortes, M. (1997). *Penetración de cloruros en el hormigón influencia de la composición del cemento y de la pasta aglomerante*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
8. - Quidel, R. (2008). *Estudio experimental de la relación permeabilidad resistividad eléctrica del hormigón*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
9. - Feldman, R.F (1994). *Investigation of the rapid chloride permeability test*. A.C.I., *Materials Journal*, Vol.91

10. – Berke, N.S and Hicks M.C. (1992). *Estimating the life cycle of reinforced concrete decks and marine piles using laboratory diffusion and corrosion data*. Corrosion Forms and Control for Infrastructure. ASTM STP 1137. Ed. Victor Chaker.
- 11.- Castellote, M. Andrade, C. and Alonso, M.C. (2002). *Standardization, to a reference of 25 °, of Electrical Resistivity for Mortars and Concretes in Saturated or Isolated Conditions*. ACI Materials Journal, Vol.99 N°2, March-April, 119-128.
- 12.- Gowers, K. and Millard, G. (1999). *Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique*. ACI Materials Journal, Vol.96 N°5, September-October, 536-541.
13. – Polder, R. (2000). *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete*. Recommendation of RILEM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion.. Materials and Structures, Vol.33, December, 603-611.
14. – CEB-192. (1980). *Diagnosis and Assessment of Concrete Structures—State-of- the Art Report*. Bulletin D’Information, Case Postale 88, CH-1015 Lausanne.
15. - Bentur, A. y Mitchell, D. (2008). *Material performance lessons*. Cement and Concrete Research 38, p. 259-272.
16. - Bryant and James, W. (2009). *In-Place Resistivity of Bridge Deck Concrete Mixtures*. ACI Materials Journal.
17. – Segovia, M.D, Carrasco M.F, Miretti, R.E., Ulibarrie, N., Defagot, C. y Pauga, R. (2007). *Aplicación de ensayos no destructivos en la evaluación de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión*. IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires.

18. – Berszakiewicz, B. and Konecny, J. (2008). *In search of reliable in-situ methods for development of performance-based specifications for concrete in highway structures*. Ministry of Transportation Ontario. Engineering Standards Branch. Materials Engineering and Research Office. Concrete Section.
19. – RILEM Report 40. (2007). *Non-destructive Evaluation of Penetrability and Thickness of Concrete Cover, State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 189-NEC*. Edited by R. Torrent and L. Fernandez Luco.
- 20.- Andrade, C., M.A Sanjuan and M.C Alonso. *Measurement of chloride difusión coefficient from migration test*.
- 21.- Polder, R.B. *Chloride difusión and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment*.
- 22.- Alexander, M.G and Mindess, S. (2005). *Aggregate in Concrete*. Published by Taylor and Francis.
- 23.- Richardson, M.G. (2002). *Fundamentals of durable concrete, modern concrete technology*. Published by Spon Press, London.
- 24.- Sharif, A., Loughlin, K.F., Azad, A.K. and Nawaz, C.M. (1999). *Determination of the effective diffusion coefficient in concrete via a gas difufusion technique*. Proceeding of the international conference on concrete durability and repair technology. Edited by Dhir R.K. and McCarthy M.J. Published by Thomas Telford.
- 25.- Kim, A. T. and Stewart, M.G. (2000). *Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion modes*. Structural Safety, 22(4), pp. 869-881.

- 26.- Nilsson, L. O. and Carcasses, M. (2002). *Models for chloride ingress into concrete-a critical analysis*. Draft report on task 4.1 of EU project "ChlorTest" G<sup>^</sup>RD-CT-2002-00855.
- 27.- Kropp, J. and Alexander, M. (2007). *Transport mechanism and reference test, chapter two*. RILEM Technical Committee 189-NEC: State-of-the-Art Report, Non-destructive Evaluation of Penetrability and Thickness of Concrete Cover, pp. 13-34.
- 28.- Samaha, H. R. and Hover, K.C. (1992). *Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete*. ACI Materials Journal, 89(4), pp. 1416-1424.
- 29.- Alexander, M.G. and Mindess, S. (2005). *Aggregate in Concrete*. Published by Taylor and Francis.
- 30.- Boddy, A., Bentz, E., Thomas, M.D.A. and Hooton, R.D. (1999). *An overview and sensitivity study of a multi-mechanistic chloride transport model*. Cement and Concrete Research, (29), pp. 827-837.
- 31.- Paulsson, J.T. and Johan, S. (2002). *Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using measured surface concentrations*. ACI Materials Journal, 99(1).
- 32.- Nilsson, L.O., Poulsen, E., Sand berg, P., Sorensen, H. E. and Klinghoffer, O. (1996). *Chloride penetration into concrete, state-of-the-art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models*. HETEK Report No. 53.
- 33.- Andrade, C., Alonso, C. y Castellote, M. (2002) *Chloride threshold dependence of pitting potencial of reinforcements*. Electrochimica Acta, Vol.47, 3469-3481.
- 34.- RILEM. *Corrosion of steel in concrete*. Report of the technical committee 60-CSC.: P.Schiessl.

- 35.- Morris, W., Vico, A., Vásquez, M. y De Sacher, S.R. (2002). *Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements*. Corrosion Science, Vol. 44, 81-99.
- 36.- McCarter, W.J. and Garvin, S. (1989). *Dependence of electrical impedance of cement-based materials on their moisture condition*. J. Phys. D: Appl. Phys., Vol22, pp.1773-6.
- 37.- Whiting, D. (1981). *Rapid determination of the chloride permeability of concrete*. Report No. FHWA/RD-81/119. Federal Highway Administration, Washington DC.
- 38.- Andrade, C., Polder, R. and Basheer, M. (2007). Non-destructive methods to measure ion migration, *chapter five*. RILEM Technical Committee 189-NEC: State-of-the-Art Report, Non-destructive Evaluation of Penetrability and Thickness of Concrete Cover, pp. 91-112.
- 39.- Powers T. C. (1961). *Some physical aspects of the hydration of Portland cement*. Portland cement association, 3, n°1, pp. 47-56.
- 40.- Powers T. C (1960). *Physical properties of cement paste*. Proc. Chem. Cement, 2, pp. 577-613.
- 41.- Broomfield, J. (2003). *Corrosion of steel in concrete. Understanding, investigation and repair*. Published in the Taylor & Francis e-Library.
- 42.- Liu, Z. and Beaudoin, J. (2003). *The permeability of cement systems to chloride ingress and related test methods*. Cement, Concrete and Aggregate. Vol.22, N°1, June, 16-23.
- 43.- Andrade, C. (1993). *Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements*. Cement and Concrete Research. Vol.23, N°3.

- 44.- López, M y Castro, J.T. (2010). *Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Revista Ingeniería de Construcción. Vol.25, N°3. Pag. 419-431.
- 45.- Andrade, C. (2000). *Changes in the chloride binding ability of concrete submitted to non-steady state migration experiments in comparison with natural diffusion*. 13-22 RILEM 2<sup>nd</sup> Workshops Proceedings. París. Francia.
- 46.- Verbeck, G.J. and Helmuth, R.H. (1968). *Structures and physical properties of cement paste*. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Symp. on the Chemistry of cement. Part III, pp.1-32.
- 47.- Puertas, M., Blanco, F. y Palomo, S. (1989). *Microestructura del hormigón-Influencia sobre sus propiedades*. Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja. Madrid. N° 398.
- 48.- Neville, A.M. (2003). *Neville on concrete*. ACI International.

## 10. ANEXOS

### A.- ENSAYO A COMPRESIÓN A 28 DÍAS

Tabla A.1 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.45, T: 15°C

Dimensiones			Peso M [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.0	15.1	8.23	1432	2.42	63.7
15.0	15.2	15.1	8.25	1359	2.40	60.4

$$Densidad : \frac{m}{a \cdot b \cdot c} \quad \sigma : \frac{P}{a \cdot b}$$

Tabla A.2 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.55, T: 15°C

Dimensiones			Peso M [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.1	15.1	8.17	986	2.39	43.8
15.0	15.0	15.1	8.20	1091	2.41	48.5

Tabla A.3 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.45, T: 15°C

Dimensiones			Peso M [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.1	15.0	15.1	8.17	1172	2.39	52.1
15.0	15.0	15.1	8.22	1163	2.42	51.7

Tabla A.4 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.55, T: 15°C

Dimensiones			Peso M [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.0	15.1	8.19	894	2.41	39.7
15.1	15.0	15.1	8.12	901	2.37	40.1

Tabla A.5 Ensayo de compresión  
Cemento Bío Bío ARI  
Razón A/C: 0.45, T: 15°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.2	15.1	8.29	986	2.41	43.8
15.2	15.0	15.1	8.24	990	2.39	44.0

Tabla A.6 Ensayo de compresión  
Cemento Bío Bío ARI  
Razón A/C: 0.55, T: 15°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.2	15.1	8.24	673	2.39	29.9
15.0	15.1	15.1	8.26	668	2.42	29.7

Tabla A.7 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.45, T: 30°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.0	15.1	8.27	1344	2.43	59.7
15.0	15.1	15.0	8.26	1419	2.43	63.1

Tabla A.8 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.55, T: 30°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.0	15.0	15.1	8.25	1194	2.43	53.1
15.0	15.1	15.1	8.15	1183	2.38	52.6

Tabla A.9 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.45, T: 30°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.1	15.0	15.1	8.18	1131	2.39	50.3
15.0	15.1	15.0	8.15	1157	2.40	51.4

Tabla A.10 Ensayo de compresión  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.55, T: 30°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.1	15.0	15.0	8.08	976	2.38	43.4
15.0	15.0	15.0	8.12	984	2.41	43.7

Tabla A.11 Ensayo de compresión  
 Cemento Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.45, T: 30°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.1	15.0	15.0	8.27	967	2.43	43.0
15.0	15.0	15.0	8.28	955	2.45	42.4

Tabla A.12 Ensayo de compresión  
 Cemento Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.55, T: 30°C

Dimensiones			Peso m [Kg]	Carga Máxima [KN]	Densidad [Kg/dm3]	Tensión $\sigma$ [Mpa]
a [cm]	b [cm]	c [cm]				
15.1	15.0	15.1	8.17	696	2.39	31.0
15.0	15.1	15.0	8.22	706	2.42	31.4

## B.- ENSAYO ASTM C1202

Tabla B.1 Registro del ensayo ASTM C1202  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.45, T: 15°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 91 días			Edad: 92 días		
	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]
0	24	1.00	166.7	23	1.20	200.0
30	29	1.25	208.3	30	1.35	225.0
60	34	1.40	233.3	35	1.40	233.3
90	38	1.65	275.0	38	1.55	258.3
120	42	1.70	283.3	43	1.60	266.7
150	45	1.75	291.7	45	1.75	291.7
180	48	1.80	300.0	47	1.80	300.0
210	52	1.80	300.0	52	1.90	316.7
240	55	1.90	316.7	54	1.90	316.7
270	56	1.90	316.7	55	1.90	316.7
300	58	1.95	325.0	58	1.95	325.0
330	60	2.00	333.3	60	2.00	333.3
360	61	2.00	333.3	62	2.00	333.3

Tabla B.2 Registro del ensayo ASTM C1202  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.55, T: 15°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 96 días			Edad: 97 días		
	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]
0	22	1.10	183.3	23	1.10	183.3
30	25	1.15	191.7	25	1.25	208.3
60	30	1.40	233.3	31	1.40	233.3
90	35	1.55	258.3	34	1.45	241.7
120	37	1.60	266.7	37	1.60	266.7
150	31	1.65	275.0	31	1.75	291.7
180	44	1.80	300.0	43	1.80	300.0
210	48	1.90	316.7	47	1.90	316.7
240	50	1.90	316.7	51	1.90	316.7
270	52	1.90	316.7	53	1.90	316.7
300	55	1.95	325.0	56	2.05	341.7
330	58	1.95	325.0	57	2.05	341.7
360	60	2.05	341.7	61	2.05	341.7

Tabla B.3 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Melón Extra  
 Razón A/C: 0.45, T: 15°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 99 días			Edad: 100 días		
	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]
0	22	0.30	50.0	22	0.30	50.0
30	24	0.35	58.3	23	0.45	75.0
60	25	0.35	58.3	24	0.45	75.0
90	26	0.35	58.3	25	0.45	75.0
120	27	0.45	75.0	26	0.45	75.0
150	28	0.45	75.0	27	0.55	91.7
180	29	0.45	75.0	28	0.55	91.7
210	30	0.45	75.0	29	0.55	91.7
240	31	0.45	75.0	30	0.55	91.7
270	31	0.45	75.0	31	0.55	91.7
300	32	0.45	75.0	32	0.55	91.7
330	33	0.45	75.0	33	0.55	91.7
360	33	0.45	75.0	34	0.55	91.7

Tabla B.4 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Melón Extra  
 Razón A/C: 0.55, T: 15°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 102 días			Edad: 103 días		
	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]
0	23	0.30	50.0	23	0.30	50.0
30	25	0.35	58.3	24	0.45	75.0
60	26	0.35	58.3	26	0.45	75.0
90	27	0.35	58.3	27	0.45	75.0
120	28	0.50	83.3	28	0.50	83.3
150	29	0.50	83.3	29	0.50	83.3
180	30	0.50	83.3	30	0.50	83.3
210	30	0.50	83.3	30	0.50	83.3
240	31	0.50	83.3	31	0.50	83.3
270	32	0.50	83.3	31	0.50	83.3
300	32	0.50	83.3	32	0.50	83.3
330	33	0.50	83.3	32	0.50	83.3
360	33	0.50	83.3	32	0.50	83.3

Tabla B.5 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.45, T: 15°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 108 días			Edad: 107 días		
	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]
0	22	0.15	25.0	23	0.25	41.7
30	23	0.30	50.0	24	0.30	50.0
60	24	0.30	50.0	26	0.30	50.0
90	25	0.30	50.0	27	0.30	50.0
120	26	0.30	50.0	28	0.30	50.0
150	27	0.30	50.0	29	0.30	50.0
180	27	0.30	50.0	30	0.30	50.0
210	28	0.30	50.0	30	0.30	50.0
240	28	0.30	50.0	31	0.30	50.0
270	29	0.35	58.3	31	0.35	58.3
300	30	0.35	58.3	32	0.45	75.0
330	30	0.35	58.3	32	0.45	75.0
360	30	0.40	66.7	32	0.40	66.7

Tabla B.6 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.55, T: 15°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 108 días			Edad: 109 días		
	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 10A/60mV [mV]	I [mA]
0	22	0.25	41.7	23	0.35	58.3
30	23	0.25	41.7	24	0.35	58.3
60	24	0.25	41.7	26	0.35	58.3
90	25	0.35	58.3	27	0.35	58.3
120	26	0.40	66.7	28	0.40	66.7
150	28	0.40	66.7	29	0.40	66.7
180	28	0.40	66.7	30	0.40	66.7
210	29	0.40	66.7	30	0.40	66.7
240	30	0.50	83.3	31	0.40	66.7
270	30	0.50	83.3	31	0.50	83.3
300	31	0.50	83.3	32	0.50	83.3
330	31	0.50	83.3	32	0.50	83.3
360	31	0.50	83.3	32	0.50	83.3

Tabla B.7 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Melón Super  
 Razón A/C: 0.45, T: 30°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 91 días			Edad: 92 días		
	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]
0	23	3.55	142.0	23	3.65	146.0
30	27	4.30	172.0	26	4.50	180.0
60	31	5.00	200.0	30	5.00	200.0
90	33	5.30	212.0	35	5.80	232.0
120	37	5.70	228.0	38	6.10	244.0
150	39	6.10	244.0	40	6.30	252.0
180	45	6.50	260.0	44	6.50	260.0
210	48	6.60	264.0	46	6.80	272.0
240	51	6.75	270.0	50	6.85	274.0
270	53	6.90	276.0	52	6.90	276.0
300	55	7.05	282.0	53	6.95	278.0
330	57	7.10	284.0	56	7.10	284.0
360	58	7.10	284.0	57	7.30	292.0

Tabla B.8 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Melón Super  
 Razón A/C: 0.55, T: 30°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 95 días			Edad: 96 días		
	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]
0	22	3.90	156.0	22	3.90	156.0
30	25	4.50	180.0	27	5.50	220.0
60	34	5.80	232.0	30	6.00	240.0
90	37	6.00	240.0	35	6.40	256.0
120	40	6.50	260.0	39	6.70	268.0
150	41	6.80	272.0	40	7.20	288.0
180	45	7.20	288.0	44	7.20	288.0
210	47	7.35	294.0	46	7.45	298.0
240	50	7.60	304.0	50	7.80	312.0
270	52	7.90	316.0	51	8.10	324.0
300	55	8.10	324.0	53	8.10	324.0
330	57	8.25	330.0	56	8.35	334.0
360	58	8.45	338.0	57	8.55	342.0

Tabla B.9 Registro del ensayo ASTM C1202  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.45, T: 30°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 96 días			Edad: 97 días		
	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]
0	24	1.3	52.0	23	1.30	52.0
30	25	1.45	58.0	24	1.35	54.0
60	25	1.6	64.0	24	1.40	56.0
90	27	1.5	60.0	26	1.50	60.0
120	27	1.5	60.0	27	1.60	64.0
150	28	1.6	64.0	28	1.60	64.0
180	28	1.6	64.0	29	1.60	64.0
210	29	1.75	70.0	30	1.85	74.0
240	30	1.9	76.0	30	2.10	84.0
270	30	2.2	88.0	31	2.20	88.0
300	30	2.35	94.0	31	2.45	98.0
330	31	2.6	104.0	32	2.60	104.0
360	32	2.75	110.0	33	2.85	114.0

Tabla B.10 Registro del ensayo ASTM C1202  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.55, T: 30°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 98 días			Edad: 98 días		
	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]
0	23	1.50	60.0	23	1.50	60.0
30	24	1.55	62.0	24	1.65	66.0
60	26	1.80	72.0	25	1.70	68.0
90	27	1.85	74.0	26	1.75	70.0
120	28	1.90	76.0	27	1.90	76.0
150	29	2.05	82.0	28	1.95	78.0
180	30	2.05	82.0	30	1.95	78.0
210	31	2.15	86.0	31	2.05	82.0
240	31	2.15	86.0	31	2.05	82.0
270	32	2.15	86.0	31	2.05	82.0
300	32	2.15	86.0	31	2.05	82.0
330	33	2.15	86.0	32	2.05	82.0
360	33	2.15	86.0	32	2.05	82.0

Tabla B.11 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.45, T: 30°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 100 días			Edad: 101 días		
	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]
0	22	1.10	44.0	22	1.10	44.0
30	23	1.15	46.0	24	1.25	50.0
60	24	1.30	52.0	25	1.30	52.0
90	25	1.30	52.0	26	1.40	56.0
120	26	1.30	52.0	27	1.40	56.0
150	27	1.40	56.0	28	1.40	56.0
180	27	1.40	56.0	30	1.40	56.0
210	28	1.50	60.0	30	1.50	60.0
240	28	1.50	60.0	30	1.50	60.0
270	29	1.50	60.0	30	1.50	60.0
300	29	1.50	60.0	30	1.50	60.0
330	29	1.50	60.0	31	1.60	64.0
360	30	1.55	62.0	31	1.65	66.0

Tabla B.12 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Cemento Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.55, T: 30°C

Tiempo [min]	Probeta N°1			Probeta N°2		
	Edad: 102 días			Edad: 102 días		
	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]	T [C]	Shunt 3A/75mV [mV]	I [mA]
0	22	1.30	52.0	22	1.30	52.0
30	23	1.40	56.0	24	1.40	56.0
60	24	1.40	56.0	25	1.40	56.0
90	26	1.45	58.0	26	1.55	62.0
120	27	1.55	62.0	27	1.55	62.0
150	28	1.60	64.0	28	1.60	64.0
180	29	1.70	68.0	30	1.60	64.0
210	30	1.70	68.0	30	1.70	68.0
240	31	1.75	70.0	30	1.85	74.0
270	31	1.75	70.0	30	1.85	74.0
300	32	1.75	70.0	30	1.85	74.0
330	32	1.75	70.0	31	1.85	74.0
360	32	1.75	70.0	31	1.85	74.0

Tabla B.13 Registro del ensayo ASTM C1202  
 Análisis Estadístico del valor de la carga eléctrica  
 Edad: 97 ± 5 días

Identificación Hormigón	Relación A/C	Probeta N° 1 [C]	Probeta N° 2 [C]	Promedio [C]	Desv. Estándar [C]	Coef. Variación [%]
H1	0.45	5120	4918	5019	101.0	2.01
H2	0.45	4549	4448	4498	50.5	1.12
H3	0.55	5187	5264	5226	38.3	0.73
H4	0.55	5033	5208	5120	87.3	1.70
H5	0.45	1282	1550	1416	134.0	9.46
H6	0.45	1367	1352	1359	7.7	0.56
H7	0.55	1391	1467	1429	38.3	2.68
H8	0.55	1456	1404	1430	26.0	1.82
H9	0.45	1014	951	983	31.9	3.25
H10	0.45	1021	1049	1035	13.8	1.33
H11	0.55	1231	1270	1251	19.1	1.53
H12	0.55	1211	1184	1198	13.8	1.15

### C.- METODO DE WENNER

Tabla C.1 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.45, T: 15°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
48	7.56	8.72	7.39	7.89	0.59	7.5
49	8.42	7.63	6.66	7.57	0.72	9.5
55	8.82	7.64	8.89	8.45	0.57	6.8
63	7.58	9.24	8.14	8.32	0.69	8.3
64	9.30	8.32	8.27	8.63	0.48	5.5
69	9.61	8.32	8.66	8.86	0.55	6.2
70	9.18	8.68	9.41	9.09	0.30	3.3
81	11.80	11.70	9.29	10.93	1.16	10.6
85	9.71	9.83	7.91	9.15	0.88	9.6
89	10.03	9.24	8.21	9.16	0.75	8.1
92	10.91	9.87	10.06	10.28	0.45	4.4
95	9.75	9.64	7.62	9.00	0.98	10.9
102	9.48	9.07	8.27	8.94	0.50	5.6
121	10.04	10.00	8.16	9.40	0.88	9.3
124	7.47	8.07	8.50	8.01	0.42	5.3
130	7.94	7.68	7.61	7.74	0.14	1.9
135	6.61	7.45	7.92	7.33	0.54	7.4
151	7.97	6.48	7.48	7.31	0.62	8.5
166	7.13	7.55	9.05	7.91	0.82	10.4
192	8.25	8.90	6.88	8.01	0.84	10.5

Tabla C.2 Registro Método Wenner  
 Cemento Melón Super  
 Razón A/C: 0.55, T: 15°C

<b>T</b> <b>[días]</b>	<b>Medición N° 1</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Medición N° 2</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Medición N° 3</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Promedio</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Desv. Estándar</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Coef. Variación</b> <b>[%]</b>
48	6.22	6.77	7.26	6.75	0.43	6.3
49	6.96	7.19	5.52	6.56	0.74	11.3
55	7.97	7.58	6.11	7.22	0.80	11.1
63	6.83	8.02	6.48	7.11	0.66	9.3
64	8.33	7.63	6.16	7.37	0.90	12.3
69	7.37	8.30	7.16	7.61	0.50	6.5
70	8.75	8.68	5.94	7.79	1.31	16.8
81	8.46	9.42	9.99	9.29	0.63	6.8
85	8.14	8.24	7.12	7.83	0.51	6.5
89	8.34	8.60	6.92	7.95	0.74	9.3
92	8.74	9.51	8.15	8.80	0.56	6.3
95	9.18	8.57	7.87	8.54	0.53	6.3
102	8.48	8.85	6.96	8.10	0.82	10.1
121	9.21	8.89	8.30	8.80	0.38	4.3
124	7.41	7.59	5.88	6.96	0.77	11.0
130	7.34	6.63	5.67	6.55	0.69	10.5
135	6.01	6.08	6.06	6.05	0.03	0.5
151	6.42	6.98	5.39	6.26	0.66	10.5
166	6.86	6.60	6.25	6.57	0.25	3.8
192	7.18	7.00	6.55	6.91	0.27	3.8

Tabla C.3 Registro Método Wenner  
 Cemento Melón Extra  
 Razón A/C: 0.45, T: 15°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
48	13.80	15.05	15.26	14.70	0.65	4.4
49	14.84	15.13	14.38	14.78	0.31	2.1
55	17.77	17.85	17.84	17.82	0.04	0.2
63	19.02	18.73	18.29	18.68	0.30	1.6
64	20.01	20.04	17.94	19.33	0.98	5.1
69	21.07	21.49	19.17	20.58	1.01	4.9
70	21.48	21.37	21.08	21.31	0.17	0.8
81	28.95	29.25	28.78	28.99	0.19	0.7
85	27.81	27.85	25.64	27.10	1.03	3.8
89	26.90	27.27	25.33	26.50	0.84	3.2
92	30.03	30.27	29.11	29.80	0.50	1.7
95	34.29	34.21	33.50	34.00	0.36	1.0
102	33.03	32.74	31.94	32.57	0.46	1.4
121	39.08	39.06	38.87	39.00	0.10	0.2
124	25.64	25.40	24.29	25.11	0.59	2.3
130	25.66	26.65	27.04	26.45	0.58	2.2
135	26.02	26.51	25.41	25.98	0.45	1.7
151	29.76	29.48	27.46	28.90	1.03	3.5
166	31.71	32.33	32.36	32.13	0.30	0.9
192	38.08	38.28	37.13	37.83	0.50	1.3

Tabla C.4 Registro Método Wenner  
 Cemento Melón Extra  
 Razón A/C: 0.55, T: 15°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
48	9.38	10.23	10.72	10.11	0.55	5.5
49	9.50	10.97	10.12	10.20	0.60	5.9
55	12.77	13.17	11.05	12.33	0.92	7.4
63	13.68	13.32	12.96	13.32	0.29	2.2
64	14.32	14.52	13.46	14.10	0.46	3.3
69	15.75	15.90	13.79	15.15	0.96	6.3
70	16.66	16.20	14.14	15.67	1.10	7.0
81	20.60	21.60	22.24	21.48	0.68	3.1
85	19.02	19.14	17.13	18.43	0.92	5.0
89	20.35	20.64	18.41	19.80	0.99	5.0
92	21.89	22.81	23.38	22.69	0.61	2.7
95	23.13	22.74	21.57	22.48	0.66	2.9
102	23.08	22.21	21.23	22.17	0.76	3.4
121	28.09	28.66	27.25	28.00	0.58	2.1
124	20.48	20.17	17.96	19.54	1.13	5.8
130	18.91	20.79	19.81	19.84	0.77	3.9
135	18.94	18.55	18.04	18.51	0.37	2.0
151	20.29	21.16	21.55	21.00	0.53	2.5
166	27.01	27.39	26.11	26.84	0.54	2.0
192	27.94	27.99	26.54	27.49	0.67	2.4

Tabla C.5 Registro Método Wenner  
 Cemento Melón Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.45, T: 15°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
48	15.47	15.98	15.08	15.51	0.37	2.4
49	16.18	16.28	14.10	15.52	1.00	6.5
55	19.49	18.76	18.00	18.75	0.61	3.2
63	20.85	20.37	18.69	19.97	0.93	4.7
64	20.83	21.69	20.78	21.10	0.42	2.0
69	22.57	22.64	21.09	22.10	0.71	3.2
70	23.55	23.28	21.72	22.85	0.81	3.5
81	30.35	31.61	31.91	31.29	0.68	2.2
85	26.40	26.44	24.11	25.65	1.09	4.2
89	26.74	27.42	25.34	26.50	0.87	3.3
92	30.34	31.36	31.30	31.00	0.47	1.5
95	30.77	30.65	28.58	30.00	1.01	3.4
102	29.65	29.42	28.53	29.20	0.48	1.7
121	35.76	35.29	33.96	35.00	0.76	2.2
124	27.80	28.09	27.46	27.78	0.26	0.9
130	27.05	28.06	29.00	28.04	0.80	2.8
135	25.79	25.56	23.83	25.06	0.87	3.5
151	25.85	26.90	25.25	26.00	0.68	2.6
166	34.63	35.22	33.77	34.54	0.59	1.7
192	34.76	35.10	34.41	34.76	0.28	0.8

Tabla C.6 Registro Método Wenner  
 Cemento Melón Bío Bío ARI  
 Razón A/C: 0.55, T: 15°C

<b>T</b> <b>[días]</b>	<b>Medición N° 1</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Medición N° 2</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Medición N° 3</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Promedio</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Desv. Estándar</b> <b>[kΩcm]</b>	<b>Coef. Variación</b> <b>[%]</b>
48	13.05	14.15	14.31	13.84	0.56	4.0
49	14.89	14.90	11.98	13.92	1.37	9.9
55	16.97	17.89	16.69	17.18	0.51	3.0
63	18.75	19.12	17.81	18.56	0.55	3.0
64	20.09	19.65	18.70	19.48	0.58	3.0
69	21.09	21.58	19.80	20.82	0.75	3.6
70	21.15	21.41	21.64	21.40	0.20	0.9
81	28.90	29.45	27.99	28.78	0.60	2.1
85	24.14	24.76	23.75	24.22	0.42	1.7
89	26.60	26.54	23.77	25.64	1.32	5.1
92	30.23	29.83	28.14	29.40	0.91	3.1
95	29.19	28.96	27.96	28.70	0.53	1.9
102	28.21	27.79	26.44	27.48	0.75	2.7
121	33.78	33.58	31.64	33.00	0.97	2.9
124	22.50	22.41	19.61	21.51	1.34	6.3
130	27.09	26.97	24.42	26.16	1.23	4.7
135	23.52	23.77	23.90	23.73	0.16	0.7
151	24.72	24.11	23.17	24.00	0.64	2.7
166	30.17	30.47	28.31	29.65	0.95	3.2
192	31.62	31.71	30.30	31.21	0.64	2.1

Tabla C.7 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.45, T: 30°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
42	9.28	9.61	8.80	9.23	0.33	3.6
47	10.02	8.86	8.78	9.22	0.57	6.1
48	8.88	8.41	10.39	9.23	0.84	9.1
59	11.03	11.87	11.78	11.56	0.38	3.3
63	10.88	9.52	9.60	10.00	0.62	6.2
67	12.53	11.65	12.42	12.20	0.39	3.2
70	11.82	10.85	11.12	11.26	0.41	3.6
73	10.25	10.26	13.24	11.25	1.41	12.5
80	15.83	14.95	14.22	15.00	0.66	4.4
99	16.30	15.14	14.75	15.40	0.66	4.3
110	9.69	9.50	9.81	9.67	0.13	1.3
116	8.50	9.44	9.52	9.15	0.46	5.0
121	10.27	8.86	9.12	9.42	0.61	6.5
137	8.45	9.46	9.09	9.00	0.41	4.6
152	11.92	10.35	10.91	11.06	0.65	5.9
178	9.91	8.33	9.01	9.08	0.65	7.1

Tabla C.8 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Super  
Razón A/C: 0.55, T: 30°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
42	6.73	8.53	7.48	7.58	0.74	9.8
47	8.94	7.89	7.17	8.00	0.73	9.1
48	7.19	7.93	9.06	8.06	0.77	9.5
59	10.38	11.45	11.17	11.00	0.45	4.1
63	9.83	9.01	9.67	9.50	0.35	3.7
67	10.78	9.43	9.79	10.00	0.57	5.7
70	11.63	10.89	10.17	10.90	0.60	5.5
73	12.78	12.59	13.63	13.00	0.45	3.5
80	9.18	8.52	9.29	9.00	0.34	3.8
99	12.49	11.27	12.24	12.00	0.53	4.4
110	7.97	7.03	6.30	7.10	0.68	9.6
116	7.17	7.76	6.99	7.31	0.33	4.5
121	8.13	7.28	6.47	7.29	0.68	9.3
137	7.38	8.41	7.91	7.90	0.42	5.3
152	10.78	9.61	9.40	9.93	0.61	6.1
178	7.04	6.04	7.53	6.87	0.62	9.1

Tabla C.9 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.45, T: 30°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
42	13.11	13.56	12.27	12.98	0.53	4.1
47	15.57	14.11	15.23	14.97	0.62	4.2
48	14.76	15.14	16.60	15.50	0.79	5.1
59	24.21	25.09	25.70	25.00	0.61	2.5
63	23.57	22.35	23.38	23.10	0.53	2.3
67	19.61	18.98	20.21	19.60	0.50	2.6
70	25.71	23.86	24.78	24.78	0.75	3.0
73	23.04	23.19	25.77	24.00	1.25	5.2
80	24.00	22.34	22.66	23.00	0.72	3.1
99	23.99	22.62	23.88	23.50	0.62	2.6
110	21.31	20.39	20.60	20.77	0.39	1.9
116	23.52	25.07	24.54	24.38	0.64	2.6
121	23.34	22.44	22.94	22.91	0.37	1.6
137	22.25	22.84	22.71	22.60	0.25	1.1
152	31.06	30.05	30.33	30.48	0.43	1.4
178	30.09	29.33	29.77	29.73	0.31	1.0

Tabla C.10 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Extra  
Razón A/C: 0.55, T: 30°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
42	11.12	12.13	10.95	11.40	0.52	4.6
47	13.82	12.81	12.61	13.08	0.53	4.1
48	13.21	13.79	15.01	14.00	0.75	5.4
59	19.38	20.06	20.56	20.00	0.48	2.4
63	18.86	16.96	17.88	17.90	0.77	4.3
67	16.92	17.53	19.31	17.92	1.01	5.6
70	24.34	24.10	24.46	24.30	0.15	0.6
73	22.06	22.59	24.35	23.00	0.98	4.3
80	22.66	21.08	22.26	22.00	0.67	3.0
99	22.67	21.72	23.11	22.50	0.58	2.6
110	18.75	17.75	17.04	17.85	0.70	3.9
116	18.98	20.10	19.43	19.50	0.46	2.4
121	17.58	16.90	16.64	17.04	0.40	2.3
137	21.68	23.38	22.43	22.50	0.70	3.1
152	22.52	20.75	21.49	21.59	0.73	3.4
178	25.60	24.82	24.52	24.98	0.45	1.8

Tabla C.11 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Bío Bío ARI  
Razón A/C: 0.45, T: 30°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
42	19.30	18.65	17.20	18.38	0.88	4.8
47	21.64	21.08	21.69	21.47	0.28	1.3
48	22.27	22.19	22.83	22.43	0.28	1.3
59	31.10	31.51	31.77	31.46	0.28	0.9
63	27.86	26.11	27.02	27.00	0.71	2.6
67	28.14	28.95	29.91	29.00	0.72	2.5
70	35.26	33.88	35.26	34.80	0.65	1.9
73	32.03	32.55	34.42	33.00	1.02	3.1
80	31.38	31.08	33.54	32.00	1.09	3.4
99	40.87	39.50	39.62	40.00	0.62	1.5
110	26.76	26.21	25.89	26.29	0.36	1.4
116	25.97	27.03	26.40	26.47	0.43	1.6
121	21.79	20.90	20.44	21.05	0.56	2.7
137	21.87	22.58	21.55	22.00	0.43	2.0
152	31.09	29.76	31.00	30.61	0.61	2.0
178	33.26	33.17	33.29	33.24	0.05	0.2

Tabla C.12 Registro Método Wenner  
Cemento Melón Bío Bío ARI  
Razón A/C: 0.55, T: 30°C

T [días]	Medición N° 1 [kΩcm]	Medición N° 2 [kΩcm]	Medición N° 3 [kΩcm]	Promedio [kΩcm]	Desv. Estándar [kΩcm]	Coef. Variación [%]
42	12.91	13.98	14.30	13.73	0.59	4.3
47	14.95	14.54	15.21	14.90	0.28	1.9
48	15.19	15.36	15.72	15.42	0.22	1.4
59	20.88	22.41	20.99	21.43	0.70	3.2
63	19.68	18.52	19.10	19.10	0.48	2.5
67	21.02	20.12	20.35	20.50	0.38	1.9
70	22.48	22.36	23.86	22.90	0.68	3.0
73	22.50	22.28	24.52	23.10	1.00	4.3
80	23.83	22.02	23.14	23.00	0.75	3.2
99	38.12	37.29	38.58	38.00	0.53	1.4
110	22.42	21.16	21.45	21.68	0.54	2.5
116	25.42	25.97	25.40	25.60	0.27	1.0
121	19.51	19.80	22.22	20.51	1.21	5.9
137	23.74	24.44	24.78	24.32	0.43	1.8
152	38.07	36.78	37.81	37.55	0.56	1.5
178	28.57	27.20	27.15	27.64	0.66	2.4